



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN, SIMULASI CFD DAN EKSPERIMEN
PENGERING SEMPROT:
PERBANDINGAN ANTARA PEMANAS LISTRIK
DENGAN PEMANAS REFRIJERASI DAN *DEHUMIDIFIER***

SKRIPSI

**ZULHANIF
0405020723**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN, SIMULASI CFD DAN EKSPERIMEN
PENGERING SEMPROT:
PERBANDINGAN ANTARA PEMANAS LISTRIK
DENGAN PEMANAS REFRIJERASI DAN *DEHUMIDIFIER***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

ZULHANIF

0405020723

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 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 : Zulhanif

NPM : 0405020723

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Zulhanif
NPM : 0405020723
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Perancangan, Simulasi CFD dan Eksperimen Pengering Semprot :
Perbandingan antara Pemanas Listrik dengan Pemanas Refrijerasi
dan *Dehumidifier*

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 : Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara ()

Penguji : Ardiyansyah, ST., M.Eng. ()

Penguji : Dr. -Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng. ()

Ditetapkan di :

Tanggal :

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. yang telah memberikan nikmat serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul “Perancangan, Simulasi CFD dan Eksperimen Pengering Semprot: Perbandingan antara Pemanas Listrik dengan Pemanas Refrijerasi dan *Dehumidifier*”

Penulis menyadari, bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai masa penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis ingin 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 pengambilan data pengering semprot.
4. Ayah penulis Muqodam dan Ibu penulis Gusneti, terima kasih atas kasih sayang telah diberikan serta dukungan moral dan materi yang telah kalian berikan.
5. Adik-adik penulis Zulandri dan M.A.Budiman atas bantuan mengunduh materi dari internet.
6. Pak Armen Jalaludin, yang telah bersedia memberikan bimbingan dalam pembuatan alat uji pengering semprot.
7. Nur Kholis, teman seperjuangan dalam mengerjakan skripsi ini.
8. Teman-teman Teknik Mesin UI angkatan 2005, A. Sa’roni, Teguh Santoso, Irsyady NH, Fery Hermawan atas doa dan bantuannya.
9. Temen-teman Teknik Mesin UI angkatan 2006 : Ricko, Rendy, Vincent Dito affandi, Dedi Setiono, Imam Taufani, Suhartoyo, Wirayudha Bhakti, Kurniawan Richak, Henri Rosas, Dicky Januarizky yang telah membantu penulis dalam hal tempat menginap dan dukungan morilnya.

Depok, Juni 2010

Penulis

Universitas Indonesia

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Zulhanif
NPM : 0405020723
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: **PERANCANGAN, SIMULASI CFD DAN EKSPERIMEN PENERING SEMPROT: PERBANDINGAN ANTARA PEMANAS LISTRIK DENGAN PEMANAS REFRIJERASI DAN DEHUMIDIFIER**, 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 : Juni 2010

Yang menyatakan,

(Zulhanif)

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Zulhanif
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Perancangan, Simulasi CFD dan Eksperimen Pengering Semprot:
Perbandingan Antara Pemanas Listrik dengan Pemanas Refrijerasi
dan *Dehumidifier*

Dalam upaya peningkatan efisiensi dan efektifitas dari pengering semprot banyak cara dilakukan antara lain dengan menggunakan pemanas listrik (sistem 1), pemanas pompa kalor (sistem 2), pemanas refrijerasi dan *dehumidifier* (sistem 3). Dari ketiga sistem ini dapat ditentukan sistem yang cocok digunakan untuk kondisi lingkungan tertentu.

Untuk mendapatkan karakteristik dari pengering semprot diperlukan perancangan, simulasi CFD dan eksperimen dengan variasi suhu udara dan flow bahan.

Hasil simulasi menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil eksperimen pada sistem 1. Dari kecenderungan ini, untuk sistem 2 dan sistem 3 data simulasi dapat digunakan untuk mendapatkan laju pengeringan. Untuk setiap 1 kW daya yang diberikan, laju pengeringan pada sistem 1 adalah 0.0000427 kg/s, sistem 2 adalah 0.0003235 kg/s dan sistem 3 adalah 0.0003512 kg/s.

Pada simulasi sistem 3 dengan variasi flow udara, suhu udara keluar dan kinerja sistem semakin kecil dengan bertambahnya flow udara. Sedangkan untuk variasi daya kompresor, suhu udara keluar semakin besar dengan bertambahnya daya kompresor dan kinerja sistem semakin kecil dengan bertambahnya daya kompresor.

Kata kunci:

Pengering Semprot, Efisiensi, Simulasi CFD, Pemanas Listrik, Pemanas Pompa Kalor, Pemanas Refrijerasi dan *Dehumidifier*

ABSTRACT

Nama : Zulhanif
Program Studi : Mechanical Engineering
Judul Skripsi : Design, CFD Simulation and Experiment of Spray Dryer:
Comparison between Electric Heater and Refrigeration Heater with
Dehumidifier

In effort to increase efficiency of spray dryer many things can do for instance by using electric heater (first system), heat pump heater (second system) and refrigeration heater with dehumidifier (third system). From these methods, can be choosed which system capable using in environment.

To find spray dryer characteristic needed design, CFD simulation and experiment with air temperature and feed flowrate variation.

CFD simulation results describe same trend with experiment result by using first system. From this trend, for second system and third system CFD simulation can be used to get drying rate. For each 1 kW power used, drying rate in first system is 0.0000427 kg/s, second system is 0.0003235 kg/s and third system is 0.0003512 kg/s.

In third system simulation with air flowrate variation, out air temperature and system effectiveness become smaller with air flowrate become higher. For compressor power variation, out air temperature become higher with compressor power become higher and system effectiveness become smaller with compressor power become higher.

Keywords:

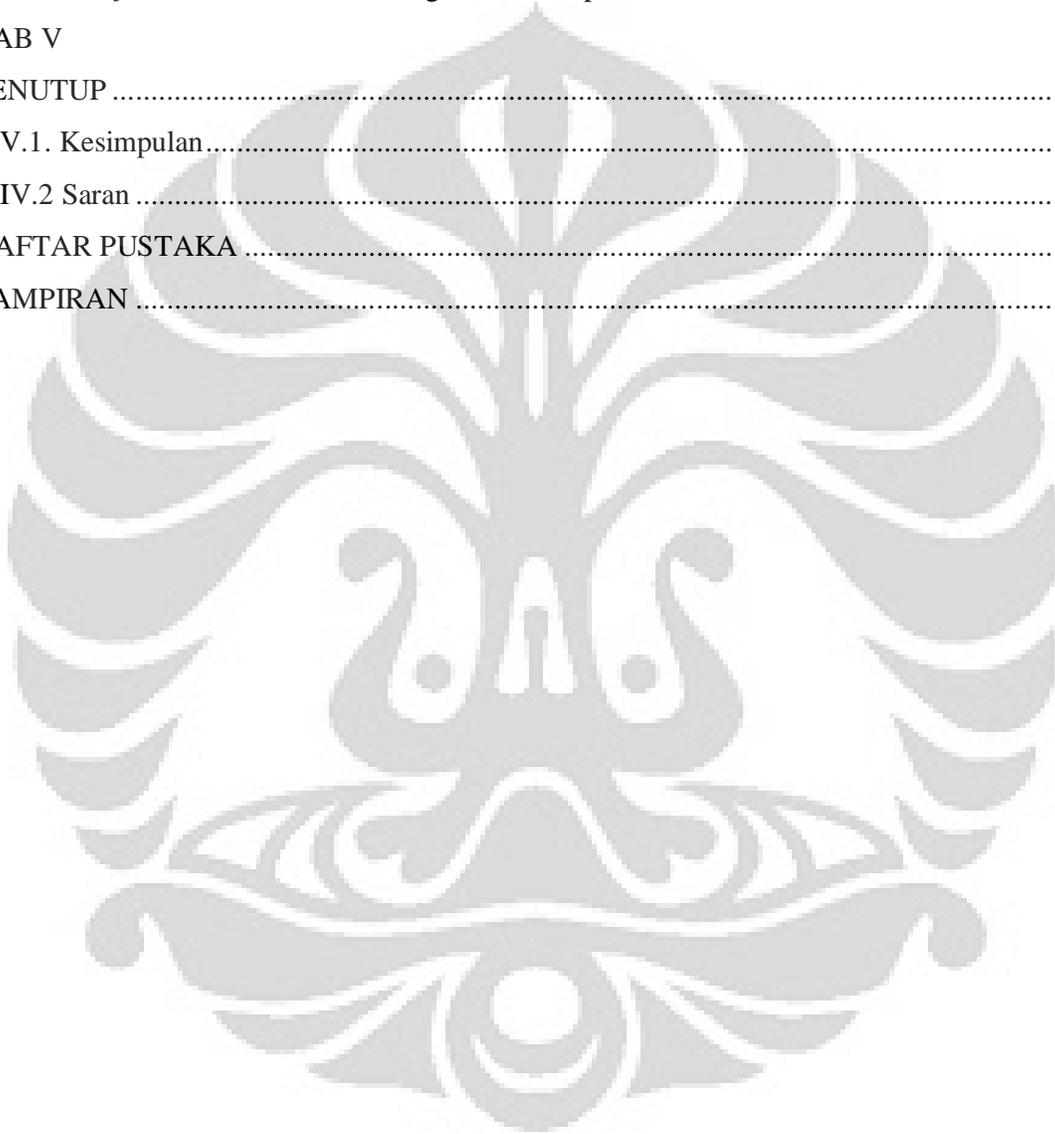
Spray Dryer, Efficiency, CFD Simulation, Electric Heater, Heat Pump Heater, Refrigeration Heater with Dehumidifier

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GRAFIK.....	xv
DAFTAR NOTASI.....	xvi
BAB I	
PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Perumusan Masalah.....	1
I.3 Tujuan Penelitian.....	2
I.4 Batasan Masalah.....	2
I.5 Metodologi Penelitian.....	3
I.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II	
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1. Pengertian Pengeringan.....	5
II.2. Prinsip Dasar Pengeringan.....	5
II.3. Faktor faktor pengeringan	7
II.4 Karakteristik Hidratasi (penguapan air)	9
II.4.1 Kadar Air	9
II.4.2 Aktivitas Air.....	11
II.4.3 Kelembaban Relatif dan Kelembaban Mutlak	12

II.5	Diagram Psikrometrik	14
II.6	Kurva Sorpsi Isotermik	18
II.7	Proses Pengeringan	19
II.8	Pengering Semprot.....	21
II.9	Sistem Refrijerasi.....	27
II.10	Computational Fluid Dynamics (CFD).....	30
II.10.1	Meshing	30
II.10.2	Pre-Processor.....	31
II.10.3	Solver.....	31
II.10.4	Post-Processor	32
BAB III		
METODOLOGI PENELITIAN		
		33
III.1	Metode Penelitian	33
III.1.1	Objek, Waktu, dan Tempat Penelitian	33
III.1.2	Peralatan dan Alat Ukur	34
III.1.3	Alur Kerangka Penelitian	38
III.2	Langkah Perhitungan Perancangan Pengering Semprot	39
III.2.1	Langkah Perhitungan Dimensi Ruang Pengering Utama.....	39
III.2.2	Langkah Perhitungan Daya.....	43
III.2.3	Langkah Perhitungan Perancangan Pemanas Udara Menggunakan Sistem Refrijerasi	44
III.3	Langkah Simulasi CFD Perancangan Pengering Semprot.....	46
III.4	Cara Pengambilan dan Hasil Eksperimen Pengering Semprot	47
III.5	Hasil Perhitungan Perancangan	50
III.5.1	Hasil Perhitungan Perancangan Ruang Pengering Utama	50
III.5.2	Hasil Perhitungan Energi.....	54
III.5.3	Perhitungan Perancangan Pengering Semprot Menggunakan Pemanas Pompa Kalor	56
III.6	Hasil Simulasi CFD Perancangan Pengering Semprot	59
III.7	Hasil Simulasi CFD Data Eksperimen Pengering Semprot	59
III.8	Hasil Perhitungan Pengering Semprot Menggunakan Pemanas Refrijerasi dan <i>Dehumidifier</i> Berdasarkan Data Eksperimen.....	60
BAB IV.....		
		62

ANALISA HASIL PERANCANGAN, SIMULASI CFD DAN EKSPERIMEN	62
IV.1. Analisa Perbandingan Perancangan dengan Eksperimen Pengering Semprot.....	62
IV.2. Analisa Perbandingan Laju Pengeringan Eksperimen dengan Simulasi Eksperimen untuk Keadaan Basah	62
IV.3. Analisa Simulasi Pengering Semprot Menggunakan Pemanas Refrijerasi dan <i>Dehumidifier</i> Berdasarkan Perhitungan Data Eksperimen	63
BAB V	
PENUTUP	69
V.1. Kesimpulan.....	69
IV.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	72



DAFTAR GAMBAR

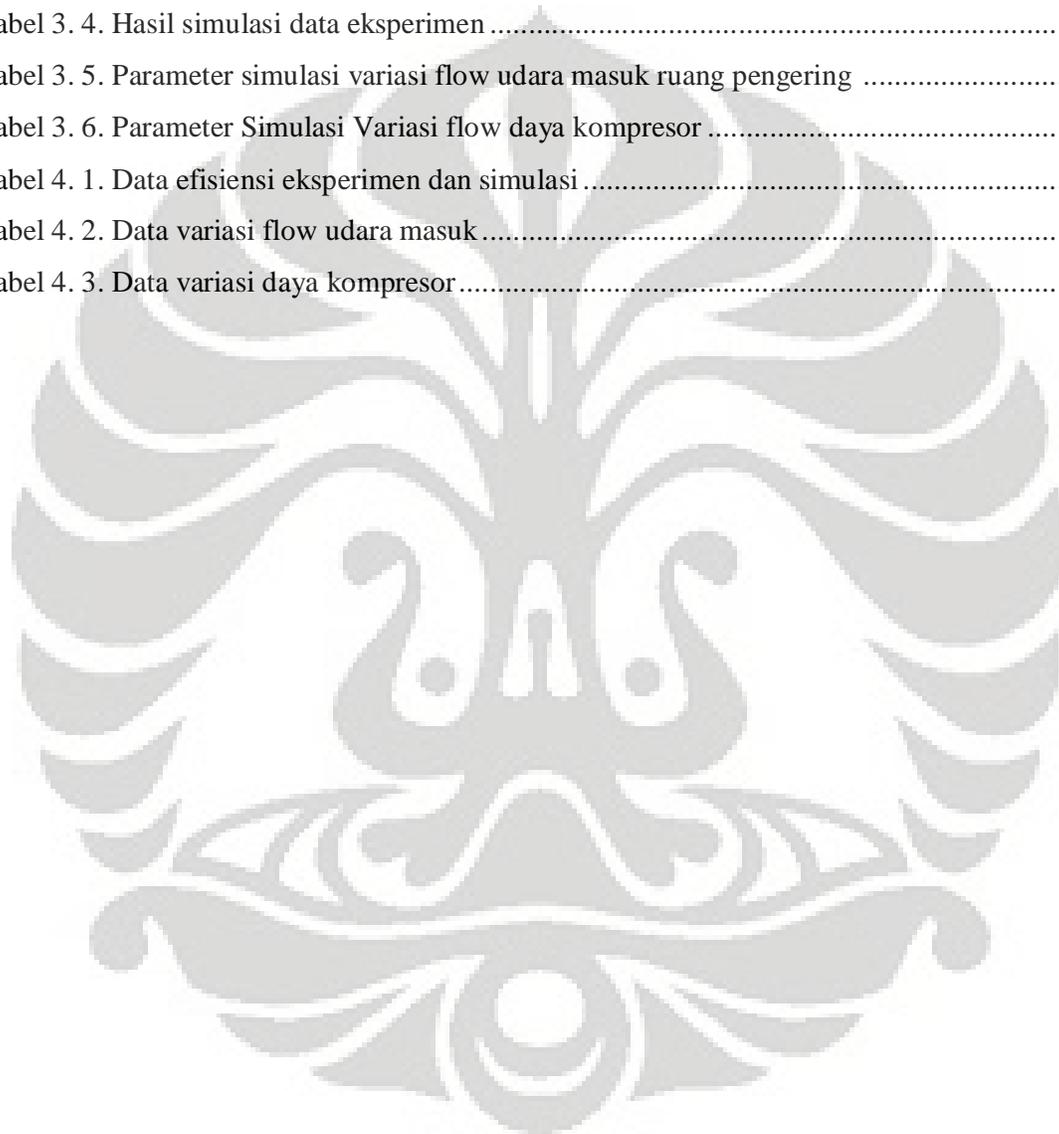
Gambar 2. 1. Air bergerak melalui celah kapiler bahan.....	7
Gambar 2. 2. Bahan menyerap suhu di sekitarnya.....	8
Gambar 2. 3. Arah kecepatan udara saat pengeringan	8
Gambar 2. 4. Aktifitas air vs kadar air berbagai macam jenis makanan.....	12
Gambar 2. 5. Diagram Psikrometrik	14
Gambar 2. 6. Garis Jenuh	15
Gambar 2. 7. Higrometer jenis ventilasi	16
Gambar 2. 8. Psikrometer Sling.....	17
Gambar 2. 9. Kurva isotermik	18
Gambar 2. 10. Aktifitas air vs Kelembaban relatif	18
Gambar 2. 11. Grafik Periode dari Pengeringan.....	20
Gambar 2. 12. Skema Pengering Semprot	22
Gambar 2. 13. Diagram alir sistem refrijerasi	27
Gambar 2. 14. P - h diagram refrijeran	29
Gambar 2. 15. Penggambaran sederhana bagaimana mesh bekerja berdasarkan bentuk domain	31
Gambar 3. 1. Rangkaian pengering semprot	34
Gambar 3. 2. Pressure regulator.....	34
Gambar 3. 3. Pompa fluida dan Adaptor DC	35
Gambar 3. 4. Nozzle.....	35
Gambar 3. 5. Bejana Pengukur Fluida	36
Gambar 3. 6. Blower dan Orifis.....	36
Gambar 3. 7. Kotak Panel.....	37
Gambar 3. 8. Termometer alkohol.....	37
Gambar 3. 9. Skema Pengering Semprot	39
Gambar 3. 10. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas pompa kalor	44
Gambar 3. 11. Diagram p-h R22.....	45
Gambar 3. 12. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas refrijerasi dan dehumidifier	46
Gambar 3. 13. Hasil laju pengeringan pada FLUENT	47
Gambar 3. 14. Skema Pengering Semprot	50

Gambar 3. 15. Rancang Bangun Ruang Pengering Utama	54
Gambar 3. 16. Rancang Bangun Siklon	54
Gambar 3. 17. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas pompa kalor	56
Gambar 3. 18. Diagram p-h R22.....	57
Gambar 3. 19. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas refrijerasi dan dehumidifier	58



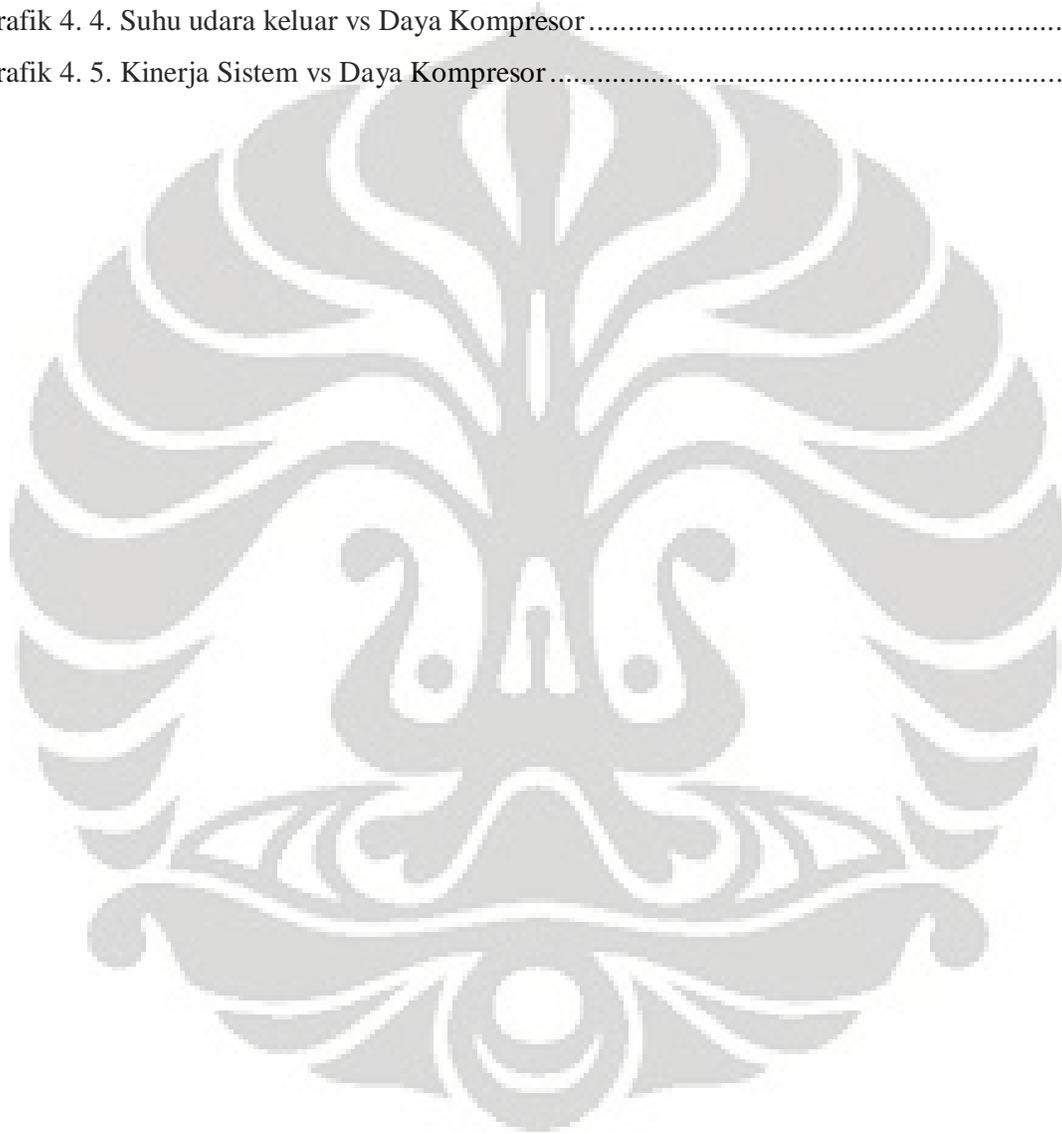
DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Data Eksperimen Pengering Semprot.....	49
Tabel 3. 2. Spesifikasi pemanas pompa kalor	56
Tabel 3. 3. Hasil simulasi perancangan.....	59
Tabel 3. 4. Hasil simulasi data eksperimen	59
Tabel 3. 5. Parameter simulasi variasi flow udara masuk ruang pengering	60
Tabel 3. 6. Parameter Simulasi Variasi flow daya kompresor	61
Tabel 4. 1. Data efisiensi eksperimen dan simulasi	62
Tabel 4. 2. Data variasi flow udara masuk.....	64
Tabel 4. 3. Data variasi daya kompresor.....	66



DAFTAR GRAFIK

Grafik 4. 1. Laju Pengeringan Eksperimen Basah.....	63
Grafik 4. 2. Suhu keluar vs Persentase flow udara masuk	64
Grafik 4. 3. Kinerja Sistem vs Persentase flow udara masuk.....	65
Grafik 4. 4. Suhu udara keluar vs Daya Kompresor.....	66
Grafik 4. 5. Kinerja Sistem vs Daya Kompresor.....	67



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	= \dot{m}_b	(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	= 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	($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Dalam upaya peningkatan nilai tambah komoditi pertanian dan kemampuan daya simpan produk-produk terhadap kerusakan, diperlukan inovasi teknologi pengolahan yang efisien. 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, udara panas merupakan faktor penting untuk menentukan efisiensi dari pengering semprot. Dalam upaya peningkatan efisiensi dari pengering semprot banyak cara dilakukan antara lain dengan menggunakan pemanas listrik atau *pemanas pompa kalor*. Untuk daerah yang lembab dan bahan yang sensitif lebih baik menggunakan pemanas refrigerasi dengan dehumidifier karena dapat dihasilkan udara yang lebih kering sehingga efisiensi pengeringan dapat ditingkatkan.

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 (*constan 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 perancangan, simulasi CFD dan eksperimen terhadap pengering

semprot. Penelitian dilakukan dengan melakukan perhitungan dimensi pengering semprot, kemudian disimulasikan dengan berbagai variasi laju bahan masuk dan suhu udara panas. Melakukan simulasi dari data eksperimen untuk mendapatkan perbandingan efisiensi. Data eksperimen dapat digunakan untuk melakukan simulasi pemanas pompa kalor dan pemanas refrijerasi dan *dehumidifier* untuk mendapatkan kinerja dari sistem tersebut.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik pengering semprot dari beberapa variasi flow bahan masuk dan suhu udara panas.
2. Mengetahui efisiensi pengeringan antara simulasi dengan eksperimen pengering semprot.
3. Mengetahui laju pengeringan dengan menggunakan pemanas listrik, pemanas pompa kalor dan pemanas refrijerasi dengan *dehumidifier*.
4. Mengetahui suhu akhir partikel dan COP sistem dengan variasi flow udara untuk pemanas refrijerasi dengan *dehumidifier*.
5. Mengetahui suhu akhir partikel COP sistem dengan variasi daya kompresor untuk pemanas refrijerasi dengan *dehumidifier*.

I.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, dibatasi pada:

1. Melakukan variasi laju bahan masuk dari 1.2 l/ jam – 6 l/jam.
2. Suhu udara panas pada pengering semprot dari 80⁰C – 160⁰C baik menggunakan pemanas listrik maupun pemanas pompa kalor.
3. Laju udara masuk dari 57 m³/jam – 60 m³/jam.
4. Kondisi lingkungan dianggap ideal selama melakukan eksperimen.
5. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan air.
6. Eksperimen hanya menggunakan pemanas listrik sedangkan untuk pemanas pompa kalor dan pemanas refrijerasi dengan *dehumidifier* digunakan simulasi CFD.

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. Perancangan.

Melakukan perhitungan untuk mendapatkan dimensi pengering semprot dan nilai kecepatan dan suhu udara pengering semprot yang akan dimasukkan dalam simulasi CFD.

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.

4. Pengambilan data.

Data yang diambil dalam penelitian ini adalah data suhu udara kering dan basah 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, sistem refrigerasi, simulasi CFD.

Bab III: Metodologi Penelitian

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

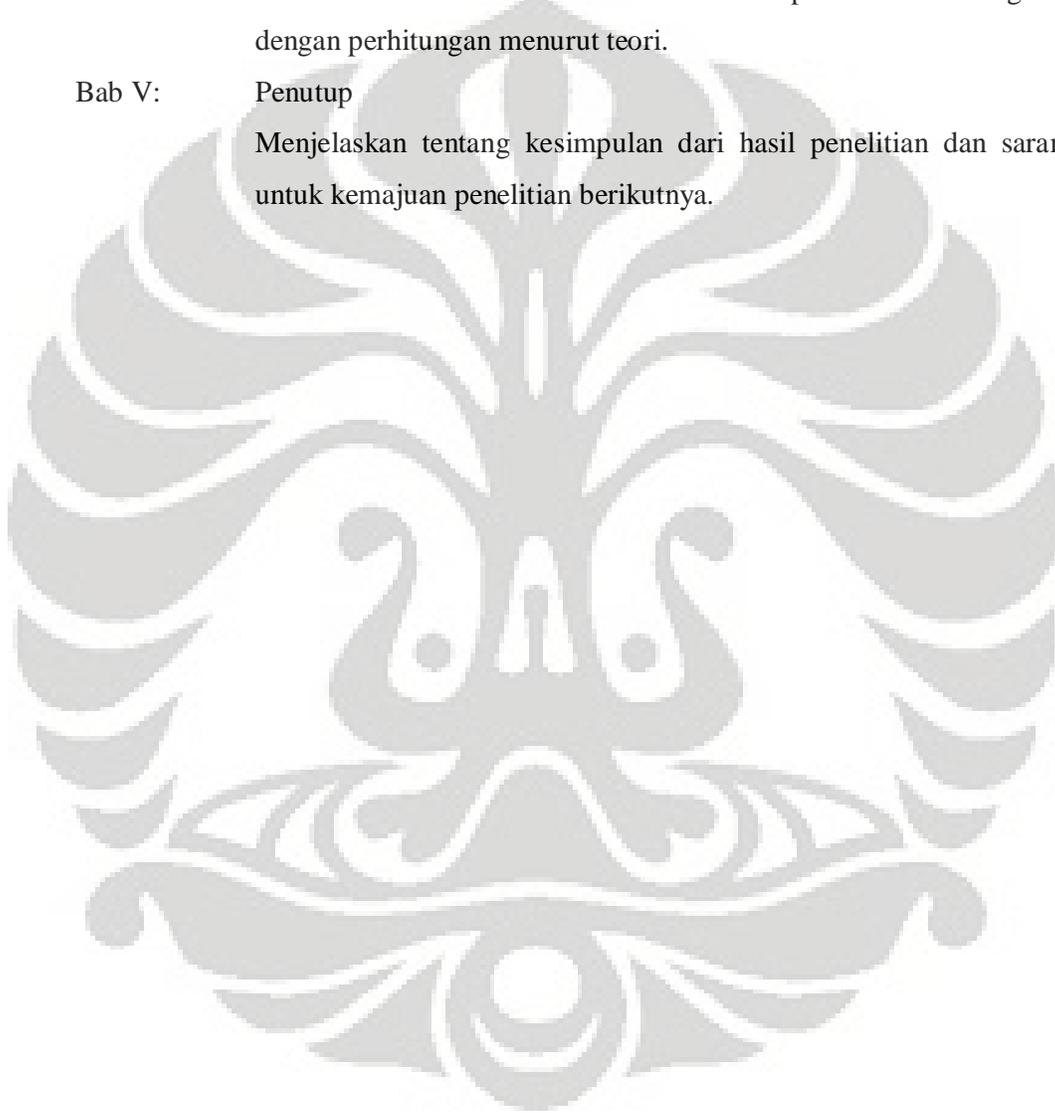
penelitian, proses pengambilan data, proses pembuatan model dan simulasi yang dilakukan.

Bab IV: Analisa Hasil Perancangan, Simulasi dan Eksperimen

Mendapatkan nilai laju pengeringan dari perhitungan, simulasi dan eksperimen. 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 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.

II.2. Prinsip Dasar Pengeringan

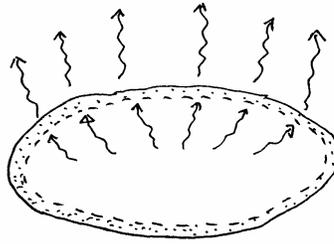
Proses pengeringan pada prinsipnya menyangkut proses perpindahan panas dan massa yang terjadi secara bersamaan (simultan). Pertama-tama panas harus ditransfer dari medium pemanas ke bahan. Selanjutnya setelah terjadi

penguapan air, uap air yang terbentuk harus dipindahkan melalui struktur bahan ke medium sekitarnya. Proses ini akan menyangkut aliran fluida dengan 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. Faktor faktor pengeringan

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam kecepatan pengeringan ialah;

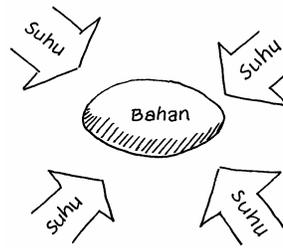
a) Luas Permukaan

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 diirisiris 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.

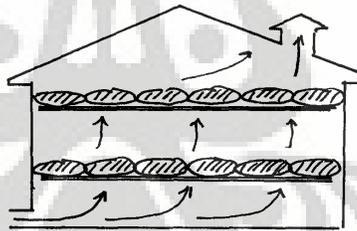


Gambar 2. 2. Bahan menyerap suhu di sekitarnya

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.

a) 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

b) 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 :

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

dengan :

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 :

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

dengan :

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 :

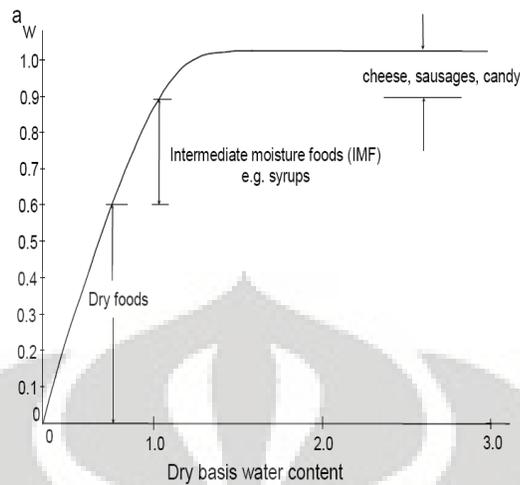
- Air bebas (free water). Air ini terdapat pada permukaan bahan, sehingga dapat digunakan oleh mikroorganisme untuk pertumbuhannya serta dapat dijadikan sebagai media reaksi-reaksi kimia. Air bebas dapat dengan mudah diuapkan pada proses pengeringan. Bila air bebas ini diuapkan seluruhnya, maka kadar 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 fisika. 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.

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 ($\text{water activity} = a_w$) 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 kadar air berbagai macam jenis makanan

Oleh karena itu untuk mencegah pertumbuhan mikrobia, aktifitas 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.

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

dengan :

n_1 = jumlah mol pelarut

n_2 = jumlah mol zat terlarut

$n_1 + n_2$ = jumlah mol larutan

II.4.3. 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.

$$RH = \left[\frac{P}{P_s} \right]_{T} \times 1 \quad (2.4)$$

dengan :

- RH = Kelembaban Relatif (%)
 P = Tekanan parsial uap air pada suhu T (atm)
 Ps = Tekanan uap air jenuh pada suhu T (atm)
 T = Suhu atmosfer (⁰ C)

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

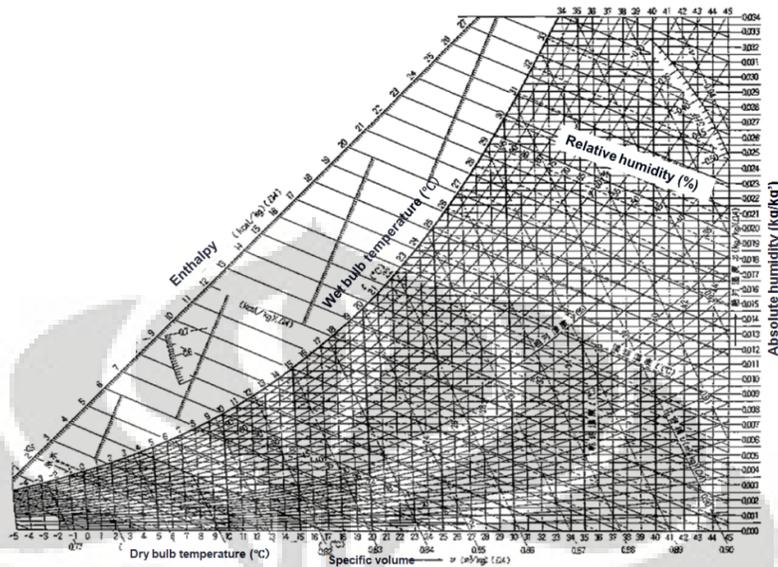
$$a_w = \frac{RH_s}{100} = \frac{P}{P_s} \quad (2.5)$$

dengan :

- 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 kurva 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 thermometer yang ujungnya dibungkus dengan kapas basah.

II.5 Diagram Psikrometrik



Gambar 2. 5. Diagram Psikrometrik

Gambar 2.5 adalah diagram psikometri dimana psikometri adalah 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 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.

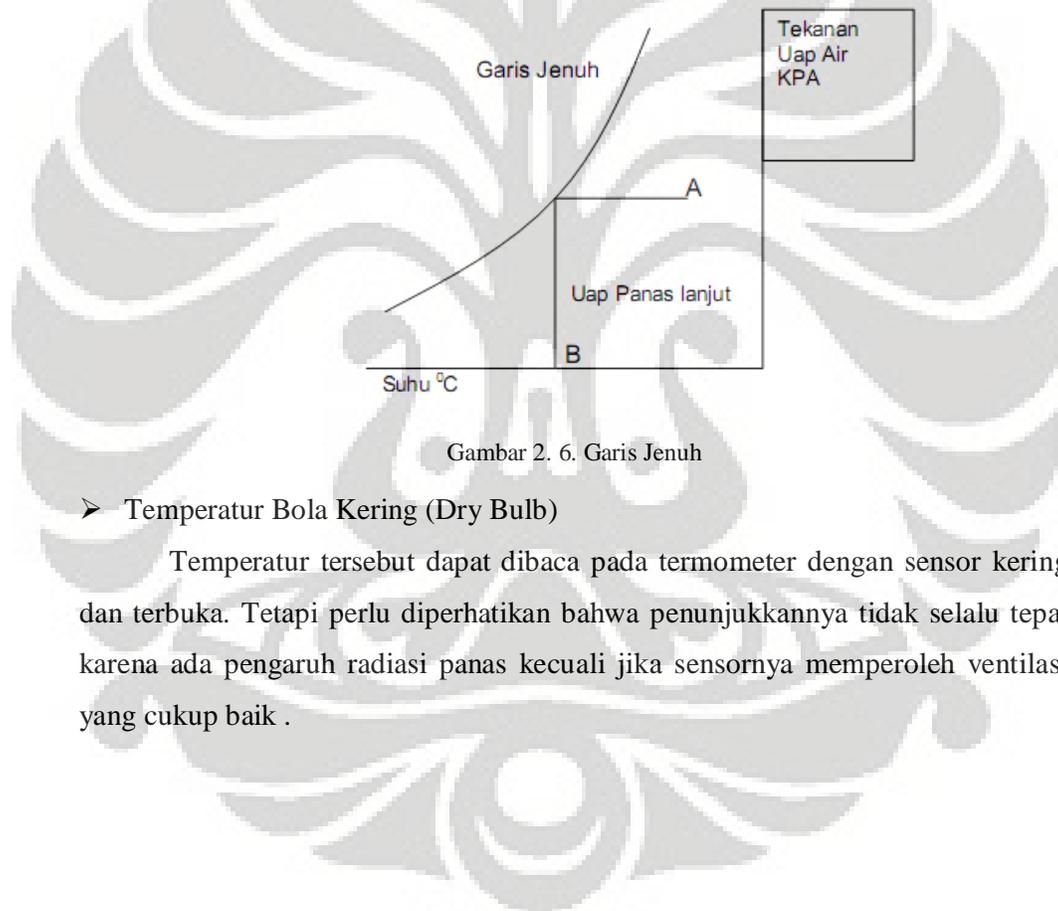
Sifat termal dari udara basah pada umumnya ditunjukkan dengan menggunakan diagram psikometri seperti terlihat pada diagra dan memakai beberapa istilah dan simbol seperti:

➤ **Garis jenuh (saturation line)**

Garis jenuh ini adalah salah satu istilah pada diagram psikometri koordinat-koordinat dimana suhu (t) sebagai basis dan tekanan uap air (p_s) sebagai ordiat. Untuk jelasnya dapat dilihat pada diagram psikrometri. Garis jenuh

dapat ditarik pada diagram tersebut seperti gambar dibawah. Data untuk garis jenuh dapat dilihat langsung pada tabel tentang air jenuh. Daerah sebelah kanan garis jenuh adalah daerah uap air panas lanjut.

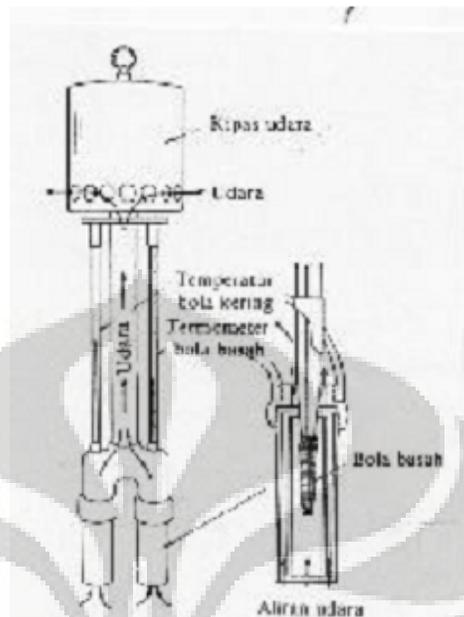
Jika uap ini didinginkan dengan tekanan tetap maka akan dicapai garis nuh yaitu batas uap air mulai mengembun gambar dibawah dapat dianggap berlaku untuk campuran udara uap air. Pada gambar menunjukkan apabila titik A merupakan keadaan suatu campuran udara agar terjadi pengembunan, maka suhu campuran tersebut harus diturunkan hingga B udara pada titik A dikatakan mempunyai suhu titik embun B.



Gambar 2. 6. Garis Jenuh

➤ 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 .

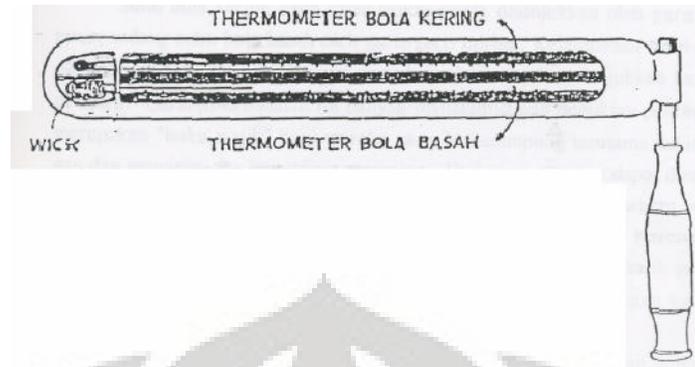


Gambar 2. 7. Higrometer jenis ventilasi

➤ 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.

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.

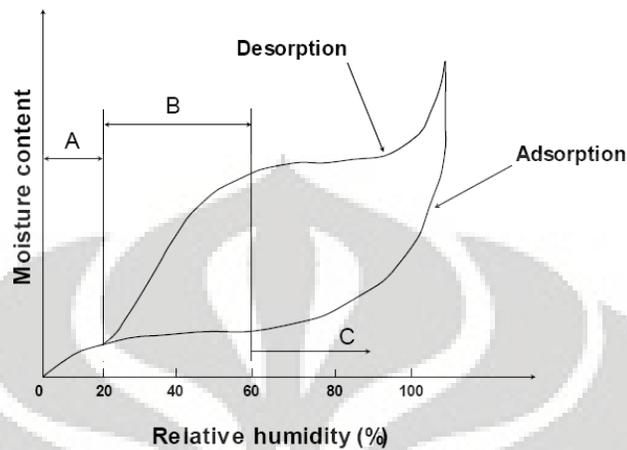


Gambar 2. 8. Psikrometer Sling

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.

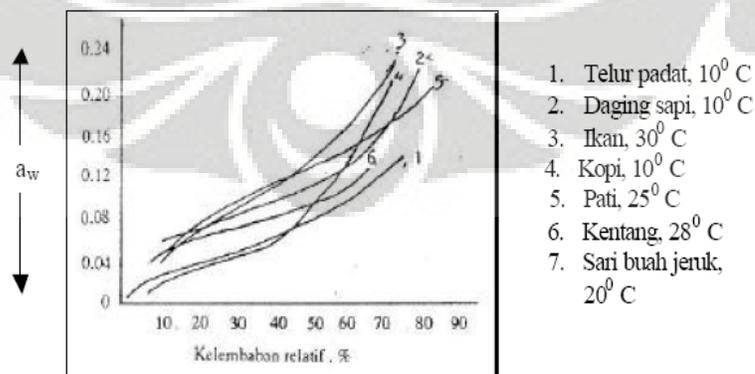
Perbedaan suhu bola kering dan bola basah menunjukkan kelembaban udara itu. Makin besar perbedaan suhu yang ada, maka makin rendah kelembaban nisbi yang ada di udara sekeliling pada saat itu. Suhu bola kering pada diagram psikrometrik ditunjukkan oleh garis tegak lurus, sedangkan suhu bola basah oleh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

II.6 Kurva Sorpsi Isotermik



Gambar 2. 9. 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. 10. 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 aw 0 - 0,20. Air dalam keadaan ini sangat stabil dan tidak dapat dibekukan pada suhu berapapun. Dengan menghilangkan air sampai batas aw ini maka reaksi kimiawi dan enzimatis dalam bahan pangan dapat dihindari. Air pada kisaran aw 0,20 - 0,70 kurang terikat kuat bila dibandingkan dengan air pada kisaran aw 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.

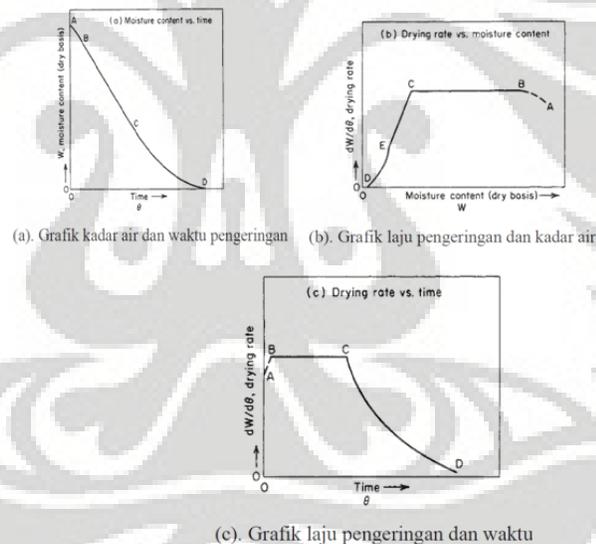
II.7 Proses Pengeringan

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. Lajupengeringan 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. 11. 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.8 Pengering Semprot

Menurut Filkova dan Mujumdar (1995), pengering semprot merubah cairan menjadi produk yang kering dalam satu operasi. Cairan dikabutkan menggunakan *rotary wheel* atau *pressure nozzle* dan hasil spray kontak langsung dengan udara panas. Waktu pengeringan spray dryer sangat cepat jika dibandingkan dengan proses pengeringan lainnya.

Kelebihan *spray dryer* adalah

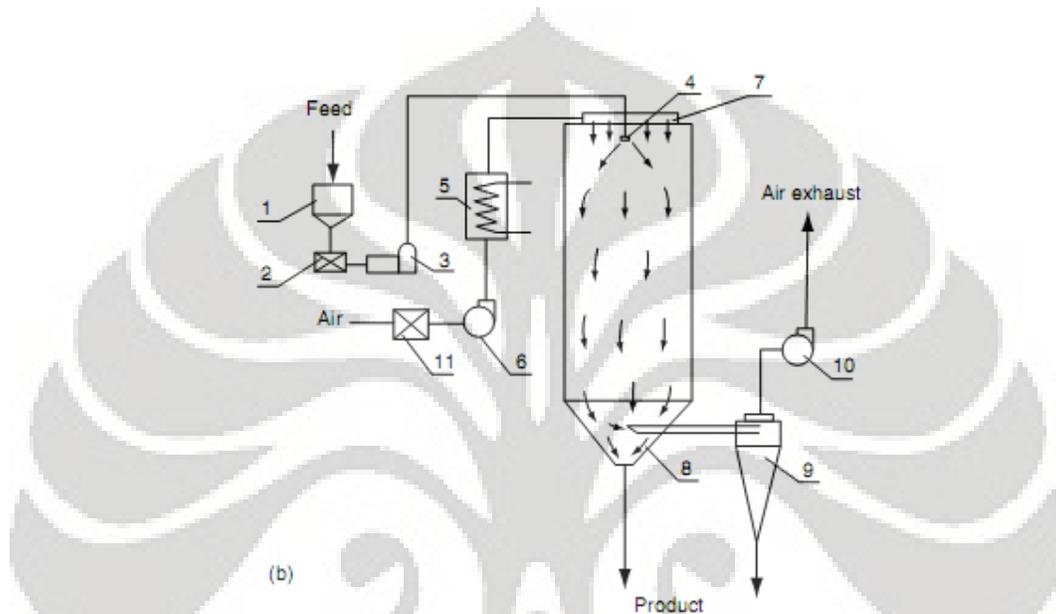
- Sifat dan kualitas produk dapat dikontrol lebih efektif
- Produk yang sensitif terhadap panas dapat dikeringkan pada tekanan atmosfer
- Spray dryer dapat beroperasi pada produksi yang besar secara kontinyu dengan peralatan sederhana

Sedangkan kekurangan *spray dryer* adalah

- Spray dryer tidak fleksibel. Mesin yang di desain untuk produk lembut tidak dapat digunakan untuk produk yang kasar
- Bahan harus dapat dipompa
- Membutuhkan investasi yang besar dibandingkan mesin pengering yang lain

Menurut Jayas dan Sokhansanj (1995), *spray dryer* digunakan untuk dehidrasi cairan. Cairan dimasukkan ke dalam udara panas dalam bentuk kabut. Produk yang

kering dipisahkan dari aliran udara dan dikumpulkan untuk proses selanjutnya. Desain spray dryer bervariasi, mulai yang sederhana sampai yang sangat kompleks. Perbedaan utama dalam desain adalah variasi dalam *atomizer*, pola aliran udara, sistem pemanasan udara dan sistem separasi.



Gambar 2. 12. Skema Pengering Semprot

Bagian-bagian dari unit *spray dryer*:

1. *Feed tank*
2. Filter cairan
3. Pompa umpan
4. *Nozzle atomiser*
5. Pemanas udara (*electric heater*)
6. *Blower*
7. Pendispersi udara (*air disperse*)
8. Ruang pengering (*drying chamber*)
9. *Siklon*
10. *Exhaust blower*
11. Filter udara

Cara kerja *spray dryer* adalah sebagai berikut:

Pertama-tama seluruh air dari bahan yang ingin dikeringkan, diubah ke dalam bentuk butiran-butiran air dengan cara diuapkan menggunakan *atomizer*. Air dari bahan yang telah berbentuk tetesan-tetesan tersebut kemudian di kontakkan dengan udara panas. Peristiwa pengontakkan ini menyebabkan air dalam bentuk tetesan-tetesan tersebut mengering dan berubah menjadi serbuk. Selanjutnya proses pemisahan antara uap panas dengan serbuk dilakukan dengan *cyclone* atau penyaring. Setelah di pisahkan, serbuk kemudian kembali diturunkan suhunya sesuai dengan kebutuhan produksi.

Menurut kouris dan Maroulis (1995), heat transfer pada spray dryer ditunjukkan dalam persamaan :

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad 2 < Re < 200 \quad (2.6)$$

$$h_c = \frac{Nu k}{d} \quad Re = \frac{\rho v d}{u} \quad (2.7)$$

Sedangkan mass transfer ditunjukkan oleh persamaan:

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (2.8)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho Da} \quad (2.9)$$

Menurut Jayas et al. (1995), waktu yang diperlukan untuk mengeringkan partikel kabut (droplet) adalah :

$$t = \frac{\rho_f \lambda d^2}{8k(T - T_{wb})} \quad (2.10)$$

Menurut Filkova dan Mujumdar (1995), diameter rata-rata droplet dihitung menggunakan persamaan:

$$d_p = \frac{9575}{\sqrt[3]{\Delta P}} \quad (2.11)$$

Keterangan :

Universitas Indonesia

Nu	= Bilangan Nusselt	ρ	= Massa jenis , kg/m ³
Re	= Bilangan Reynold	v	= Kecepatan udara, m/s
Pr	= Bilangan Prantl	μ	= Viskositas udara, Pa.s
k	= Konduktifitas udara	d'	= Dimensi droplet, m
Sc	= Bilangan Schmidt	Da	= Difusifitas gas, m ² /s
t	= Waktupengeringan, s	k	= Konduktifitas termal
t _{wb}	= Temperatur bola basah, K	d _p	= Diameter partikel, μ m
ΔP	= Pressure drop, Pa		

Untuk mengetahui waktu pengeringan droplet nilai constant rate period dan falling rate period harus dihitung secara terpisah.

➤ **Constant rate period (periode laju tetap)**

Laju perpindahan massa selama periode laju tetap tergantung dengan jumlah kalor yang terdapat dalam bahan yang dapat dihubungkan dengan laju perpindahan kalor.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dQ}{dt} / \lambda = -\frac{hA(T_a - T_w)}{\lambda} \quad (2.12)$$

T_a = Temperatur bola kering; T_w = temperature bola basah = $T_{\text{permukaan}}$

Koefisien perpindahan panas untuk sebuah partikel bola di $Re < 20$

$$h = \frac{2k_a}{D} \quad (2.13)$$

k_a = konduktivitas termal udara ; D = diameter droplet.

Diameter droplet akan berubah selama periode laju konstan.

Luas permukaan bola = $\pi D^2 = 4\pi r^2$.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{-2k_a}{D} \frac{\pi D^2}{\lambda} (T_a - T_w)$$

$$\int_0^{t_c} dt = \int_{w_o}^{w_c} -\frac{\lambda}{2k_a \pi D (T_a - T_w)} dw$$

$$t_c = \frac{-\lambda}{2k_a \pi (T_a - T_w)} \int_{w_o}^{w_c} \frac{1}{D} dw$$

Dikarenakan diameter droplet akan berubah selama periode laju konstan maka berat droplet juga akan berubah

$$w = \frac{4\pi r^3 \rho}{3} = \frac{\pi D^3 \rho}{6}$$

$$\Delta w = \Delta V \rho_w = \frac{\pi}{6} \rho_w (D^3 - (D - \Delta D)^3)$$

$$\frac{\pi \rho_w}{6} \{D^3 - D^3 + 3D^2 \Delta D - 3D \Delta D^2 + \Delta D^3\}$$

$$\frac{\Delta w}{\Delta D} = \frac{\pi \rho_w}{6} (3D^2 - 3D \Delta D + \Delta D^2)$$

$\Delta D \rightarrow 0$ maka

$$\frac{dw}{dD} = \frac{\pi \rho_w}{6} 3D^2 = \frac{\pi D^2 \rho_w}{2}$$

$$dw = \frac{\pi D^2 \rho_w}{2} dD$$

Laju perubahan dalam berat ekuivalen dengan laju perubahan diameter droplet

$$t_c = \frac{-\lambda}{2k_a \pi (T_a - T_w)} \int_{D_o}^{D_c} \frac{1}{D} \frac{\pi D^2}{2} \rho_w dD$$

$$= \frac{-\lambda \pi \rho_w}{4k_a \pi (T_a - T_w)} \int_{D_o}^{D_c} D dD$$

$$= \frac{-\lambda \rho_w}{4k_a (T_a - T_w)} \left[\frac{D_c^2}{2} - \frac{D_o^2}{2} \right]$$

$$t_c = \frac{\lambda \rho_w (D_o^2 - D_c^2)}{8k_a (T_a - T_w)}$$

(2.14)

➤ *Falling rate period*

Laju perpindahan kalor selama falling rate period dapat ditunjukkan oleh persamaan dibawah ini:

$$q = \frac{dQ}{dt} = h_a A (T_a - T_s) \quad (2.15)$$

Dimana T_s adalah Temperatur permukaan partikel

Sayangnya T_s selalu berubah ubah mengikuti T_w pada akhir falling rate periode

Dengan menggunakan

$$T_s = \frac{T_a + T_w}{2} \quad (2.15)$$

Maka

$$\frac{dQ}{dt} = h_a A \left(T_a - \left(\frac{T_a}{2} + \frac{T_w}{2} \right) \right) = \frac{h_a A}{2} (T_a - T_w) \quad (2.16)$$

Dengan demikian kita perlu mengkonversi persamaan perpindahan kalor per waktu menjadi persamaan perpindahan massa per waktu ini. Hal ini dicapai dengan menggunakan panas laten dikalikan dengan massa partikel

Massa sama dengan kerapatan partikel kering dikalikan dengan volume partikel

$$w = \rho_d V \quad (2.17)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{\lambda w} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{\lambda \rho_d V}$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{\lambda \rho_d V} = \frac{-h_a A (T_a - T_w)}{2 \lambda \rho_d V}$$

Sekarang luas dan volume dapat dinyatakan dalam diameter partikel, sehingga

$$\frac{A}{V} = \frac{\pi D^2}{\pi D^3 / 6} = \frac{6}{D}$$

Dan

$$h_a = \frac{2k_a}{D} \quad (2.18)$$

Asumsi D dalam falling rate periode konstan = D_c

$$\frac{dw}{dt} = - \frac{2k_a}{D_c} \cdot \frac{6}{D_c} \cdot \frac{(T_a - T_w)}{2 \lambda \rho_d}$$

maka

$$\frac{dw}{dt} = \frac{-6k_a (T_a - T_w)}{\lambda \rho_d D_c^2}$$

$$\int_0^{t_f} dt = \frac{-\lambda \rho_d D_c^2}{6k_a (T_a - T_w)} \int_w^{w_f} dw$$

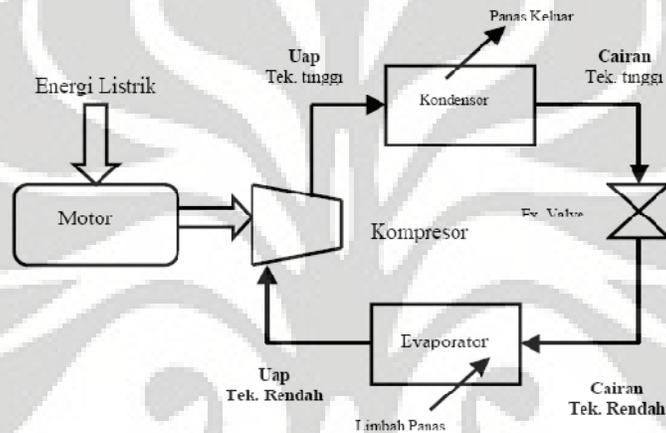
$$t_f = \frac{-\lambda \rho_d D_c^2}{6k_a (T_a - T_w)} (w_f - w_c)$$

maka

$$t_f = \frac{\lambda \rho_d D_c^2}{6k_a (T_a - T_w)} (w_c - w_f) \quad (2.19)$$

II.9 Sistem Refrijerasi

Secara umum sistem refrijerasi kompresi uap yang digunakan untuk memanfaatkan limbah panas dapat digambarkan dengan skema ditunjukkan:



Gambar 2. 13. Diagram alir sistem refrijerasi

Pada dasarnya sistem mesin pendingin (*refrigerator*) adalah juga merupakan suatu sistem pompa kalor, dimana kalor/energi termal dipindahkan dari suatu daerah ke daerah lain. Perbedaan mesin pendingin dengan pompa kalor hanya pada nilai gunanya. Dimana nilai guna suatu sistem refrigerator adalah untuk mendapatkan efek pendinginan oleh unit evaporator pada suatu daerah/ruangan, sedangkan nilai guna dari suatu sistem pompa kalor adalah untuk mendapatkan efek pemanasan oleh unit kondensor dalam suatu ruangan. Unjuk kerja/performansi suatu sistem refrijerasi dapat dinilai dari perbandingan jumlah kalor yang dapat diserap pada evaporator dibandingkan dengan energi listrik masukan pada kompresor dan sering disebut dengan COP (*Coefficient of Performance*), sedangkan unjuk kerja/performansi suatu sistem pemanas pompa kalor juga dapat dilihat dari harga COP nya, yaitu perbandingan energi termal yang dapat dikeluarkan/dibuang pada kondensor dengan energi listrik yang diperlukan pada kompresor, atau dapat dituliskan sebagai berikut:

Universitas Indonesia

$$COP_{HP} = \frac{\text{Energi yang dikeluarkan (kW)}}{\text{Energi yang dimasukkan (kW)}} \quad (2.20)$$

Dari Gambar 2.13, terlihat bahwa dengan penyerapan energi termal (dapat berupa panas buangan) oleh cairan fluida kerja/refrijeran pada evaporator pada kondisi suhu dan tekanan evaporasi, akan meningkatkan enthalpinya sehingga cairan fluida kerja/refrijeran tersebut berubah fasa menjadi uap/gas dengan proses tekanan tetap (*isobar*), dan selanjutnya uap refrijeran akan ditekan oleh kompressor sehingga suhu dan tekanannya naik mencapai tekanan dan suhu kondensasi di kondensor. Pada akhir proses kompresi, uap refrijeran dapat mencapai uap super panas (*super heat*). Selama proses kondensasi di dalam kondensor sejumlah energi akan dikeluarkan/dibuang ke sekitarnya berupa kalor latent (*latent heat*) pada tekanan kondensasi yang konstan, sehingga enthalpi kembali turun.

Jumlah energi baik yang diserap di evaporator maupun yang dikeluarkan di kondensor serta kebutuhan energi pada kompressor dapat dilihat/dihitung dengan menggunakan diagram tekanan-enthalpy (*p-h diagram*) suatu refrijeran.

Dari p-h diagram tersebut maka, koefisien performansi (COP) dapat ditulis sbb:

$$COP_{HP} = \frac{m_R (h_2 - h_3)}{m_R (h_2 - h_1)} \quad (2.21)$$

$$COP_R = \frac{m_R (h_1 - h_3)}{m_R (h_2 - h_1)} \quad (2.22)$$

dimana;

M_r = laju aliran refrijerasi (kg/s)

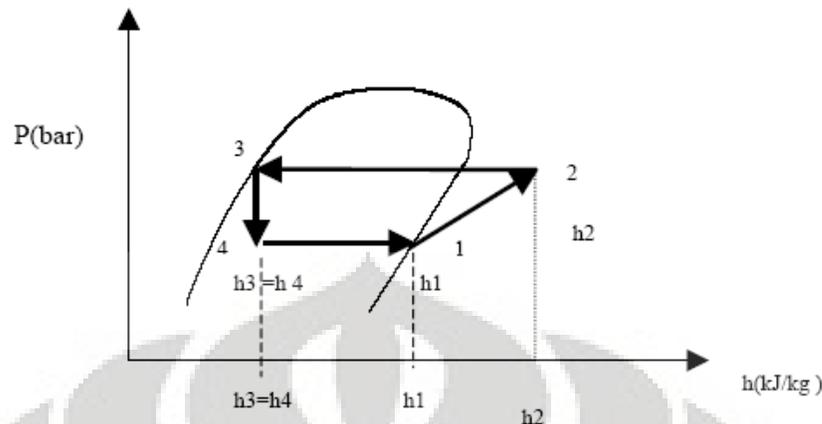
COP_{HP} = COP sistem pemanas pompa kalor

COP_R = COP sistem refrigerator

$h_1 - h_3$ = perubahan enthalpi fluida kerja dalam kondenser (kJ/kg)

$h_2 - h_1$ = perubahan enthalpi fluida kerja dalam kompresor (kJ/kg)

$h_1 - h_4$ = perubahan enthalpi fluida kerja dalam evaporator (kJ/kg)



Gambar 2. 14. P - h diagram refrijeran

Jumlah kalor yang dapat diserap dari lingkungan sekitar/ruangan dingin oleh fluida pendingin (refrijeran) di dalam evaporator, maupun kuantitas kalor yang dapat dilepas/ dikeluarkan oleh fluida pendingin ke lingkungan sekitar/ruangan panas di dalam kondensor sangat tergantung dari efektifitas evaporator serta kondensor tersebut yang berupa unit-unit penukar kalor (*heat exchanger*). Dalam perancangan suatu unit penukar kalor, efektifitas penukar kalor dihitung dari perbandingan laju aliran kalor yang dapat ditransfer dari fluida dingin ke fluida panas atau sebaliknya pada unit penukar kalor, dibandingkan dengan laju aliran kalor maksimum yang dapat terjadi pada penukar kalor jenis aliran lawan (*counter flow*) pada kondisi suhu dan aliran yang sama.

Namun demikian analisa praktis untuk menentukan efektifitas suatu unit penukar kalor (*heat exchanger*) berupa kondensor atau evaporator dapat dinyatakan dengan bilangan yang menyatakan jumlah kalor yang dapat diserap oleh fluida pendingin terhadap laju aliran kalor yang mengalir dilingkungan sekitar evaporator, sebaliknya untuk unit kondensor, dan dapat dinyatakan dengan suatu persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon_E = \frac{Q_{FE}}{Q_{UE}} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_K = \frac{Q_{UK}}{Q_{FK}} \quad (2.24)$$

Dimana ;

Universitas Indonesia

$\varepsilon_E, \varepsilon_K$ = efektifitas evaporator dan efektifitas kondensor, %

Q_{FE} = laju aliran kalor yang terserap oleh fluida refrijeran di dalam evaporator (kg/s)

Q_{UE} = laju aliran kalor dari udara lingkungan ke evaporator (kg/s)

Q_{UK} = laju aliran kalor yang yang dikeluarkan dari udara lingkungan ke kondenser (kg/s)

Q_{FK} = laju aliran kalor dari fluida kerja dalam kondenser (kg/s)

II.10 Computational Fluid Dynamics (CFD)

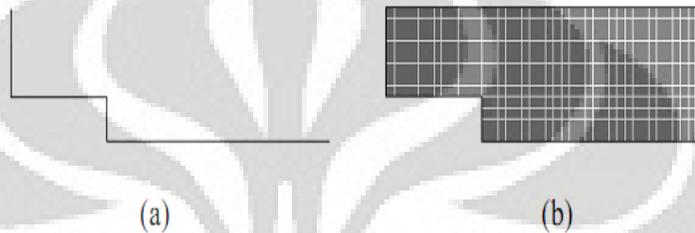
Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah perangkat lunak analisa suatu sistem fisik yang melibatkan aliran fluida, perpindahan kalor dan fenomena lain yang berhubungan dengan cara simulasi dengan bantuan komputer. Dengan kemampuan dan aplikasinya yang luas, sehingga CFD menawarkan kelebihan- kelebihan 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.10.1 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. 15. Penggambaran sederhana bagaimana mesh bekerja berdasarkan bentuk domain

II.10.2 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.10.3 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.10.4 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 perancangan pengering semprot. Selanjutnya adalah melakukan perhitungan dimensi pengering semprot untuk dibuat alat uji pengering semprot. Kemudian, melakukan perhitungan kesetimbangan energi sebagai masukan dalam simulasi CFD. Berdasarkan perhitungan dimensi dan kesetimbangan energi, maka dilakukan simulasi CFD menggunakan software Fluent 6.3 dengan skala 1:1 untuk mengetahui laju pengeringan dari pengering semprot. Setelah melakukan simulasi, maka data dari simulasi dibandingkan dengan data eksperimen. Perbandingan data simulasi dan data eksperimen hanya dilakukan untuk penggunaan pemanas listrik, hal ini dikarenakan waktu yang sedikit dalam pengambilan data eksperimen. Untuk mengetahui laju pengeringan menggunakan pemanas refrigerasi dan *dehumidifier*, maka dibandingkan antara hasil simulasi dan hasil eksperimen menggunakan pemanas listrik apakah terdapat persamaan yang signifikan terhadap kedua data tersebut. Jika terdapat persamaan yang signifikan maka hasil simulasi menggunakan pemanas refrigerasi dan *dehumidifier* dapat digunakan untuk menghitung laju pengeringan sistem.

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 pemanas, tekanan udara pada *nozzle*, laju udara masuk ruang pengering, dan keadaan penampung produk. Pengambilan data dilakukan pada tanggal 18 Juni 2010.

III.1.2 Peralatan dan Alat Ukur

Peralatan yang digunakan dalam proses pengambilan data pada pengering semprot adalah :

- Rangkaian Pengering Semprot (Ruang Pengering Utama, Siklon dan Pemanas Listrik)



Gambar 3. 1. Rangkaian pengering semprot

Pada bagian kanan terdapat pemanas listrik untuk memanaskan udara, pada bagian tengah terdapat ruang pengering utama sebagai tempat terjadinya pengeringan dan pada sisi kiri terdapat siklon sebagai tempat keluarnya udara dan menampung produk yang sudah kering.

- Pengatur Tekanan (*FRL Pressure Regulator*)



Gambar 3. 2. *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. 3. 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. 4. *Nozzle*

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

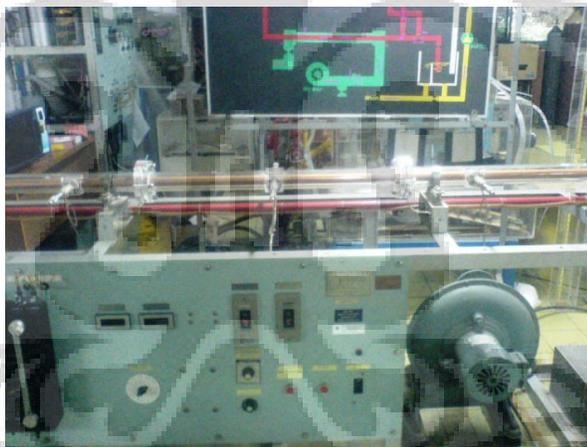
➤ Bejana Pengukur Fluida



Gambar 3. 5. Bejana Pengukur Fluida

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

➤ *Blower* dan Orifis



Gambar 3. 6. *Blower* dan Orifis

Blower digunakan untuk mengalirkan udara ke dalam pemanas listrik, sedangkan orifis digunakan untuk mengukur kecepatan udara dari blower.

➤ Kotak Panel



Gambar 3. 7. 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.

➤ Termometer Alkohol

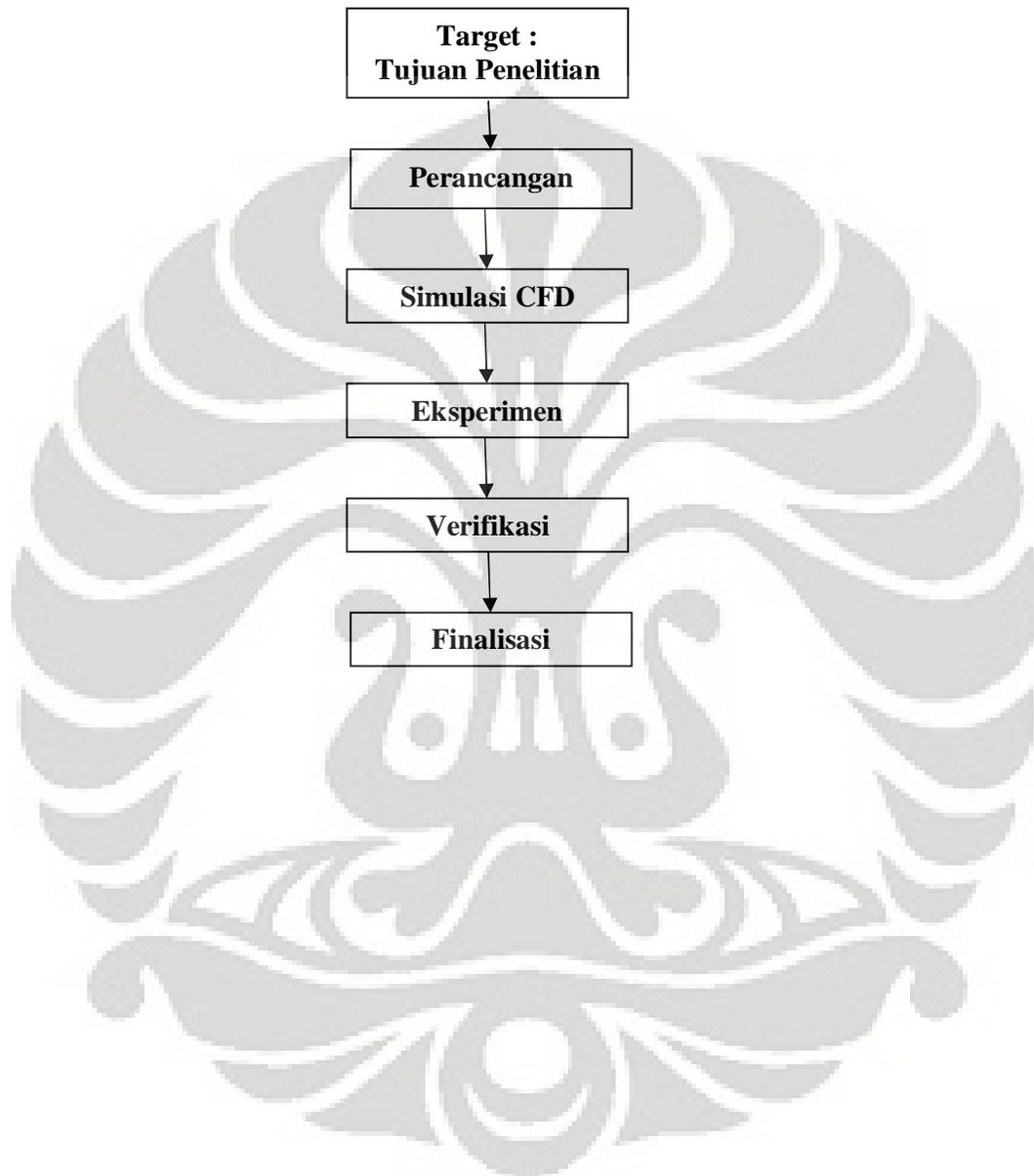


Gambar 3. 8. Termometer alkohol

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

III.1.3 Alur Kerangka Penelitian

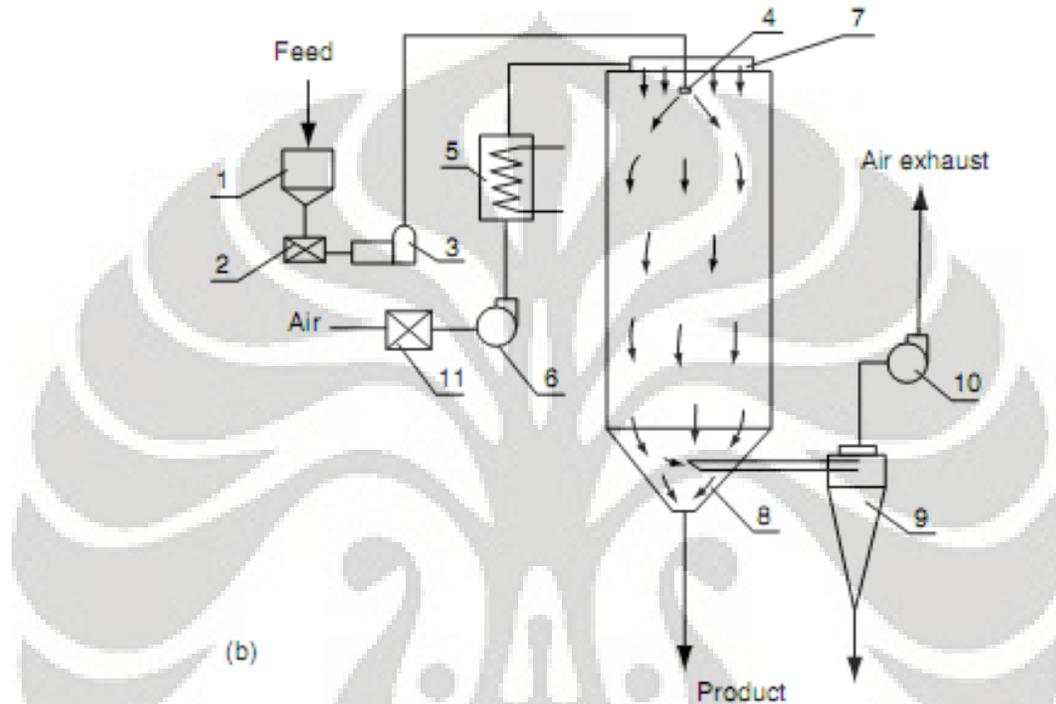
Adapun alur kerangka penelitian ini sebagai berikut:



III.2 Langkah Perhitungan Perancangan Pengering Semprot

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

III.2.1 Langkah Perhitungan Dimensi Ruang Pengering Utama



Gambar 3. 9. Skema Pengering Semprot

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}	(°C)
Relative Humidity	= RH	%
Suhu udara keluar heater	= T_{ud2}	(°C)
Kalor laten penguapan	= λ	(kJ kg ⁻¹)
Kalor jenis produk	= C_{pp}	(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
Kalor jenis bahan	= C_{pb}	(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
Kalor jenis uap air	= $C_{p_{uap}}$	(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
Kalor jenis udara kering	= $C_{p_{udara}}$	(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
Konduktivitas termal udara	= k	(W m ⁻¹ K ⁻¹)
Viskositas udara	= μ	(kg m ⁻¹ s ⁻¹)

➤ Diameter Ruang Pengering Utama

Dalam merancang Ruang Pengering utama hal yang perlu diperhatikan adalah ukuran droplet dan kecepatan udara:

Dengan mengasumsikan diameter tetap selama periode falling rate dengan menggunakan rumus berikut :

$$\text{Massa satu droplet (m}_d\text{)} = \frac{4\pi r^3 \cdot \rho_b}{3} \quad (\text{kg})$$

$$\text{Massa solid dalam droplet (m}_s\text{)} = W_d \cdot TS_1 \quad (\text{kg})$$

$$\text{Massa produk kering dalam droplet (m}_p\text{)} = W_s \cdot TW_2 \quad (\text{kg})$$

$$\text{Volume droplet produk (V}_p\text{)} = \frac{m_p}{\rho_p} \quad (\text{m}^3)$$

$$\text{Jari-jari kritis droplet (r}_c\text{)} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_p}{4\pi}} \quad (\text{m})$$

$$\text{Diameter kritis droplet (D}_c\text{)} = 2 \times r_c \quad (\text{m})$$

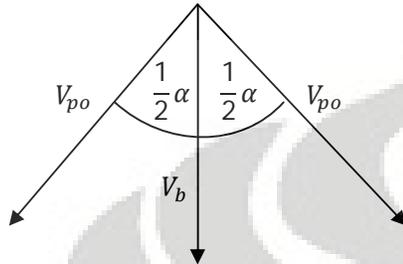
Karena ρ_p and D_p bervariasi. Maka didapatkan rata-ratanya:

$$\rho_p D_p^2 = \frac{\rho_b D_b^2 + \rho_p D_c^2}{2} \quad (\text{kg.m})$$

Untuk menghitung kecepatan bahan keluar *nozzle* diperlukan rumus sebagai berikut

$$\text{Kecepatan aliran bahan } (V_b) = \frac{\dot{m}_b}{A_b} \quad (\text{m s}^{-1})$$

$$A_b = \frac{\pi \cdot D_{\text{nozzle}}^2}{4} \quad (\text{m}^2)$$



$\alpha = \text{sudut nozzle}$

$$V_{po} = \frac{V_b}{\cos\left(\frac{1}{2}\alpha\right)} \quad (\text{m s}^{-1})$$

Untuk menghitung diameter ruang pengering utama digunakan rumus

$$S_{max} = \frac{V_{po} \cdot D_p^2 \cdot \rho_p}{18\mu} \quad (\text{m})$$

$$\text{Diameter ruang pengering utama } (D_{\text{dryer}}) = 2 \cdot S_{max} \cdot n_s \quad (\text{m})$$

$n_s = \text{faktor safety}$

➤ Waktu Pengeringan

Untuk menghitung waktu pengeringan total diperlukan constant rate periode dan falling rate periode.

Untuk mengetahui *Constant Rate Periode* maka digunakan rumus berikut

$$t_c = \frac{\lambda \cdot \rho_w \cdot (D_b^2 - D_c^2)}{8 \cdot k \cdot (T_a - T_c)}$$

Dengan ;

$$\lambda = \text{k calor laten penguapan } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$\rho_w = \text{massa jenis air } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$$

$$D_c = \text{diameter kritis } (\text{m})$$

T_a = suhu udara kering udara panas ($^{\circ}C$)

T_c = suhu udara basah udara panas keluar ruang pengering ($^{\circ}C$)

Untuk mengetahui Falling Rate Periode maka digunakan rumus berikut

$$t_f = \frac{\lambda \cdot \rho_p \cdot D_c^2}{6 \cdot k \cdot (T_a - T_c)} (m_c - m_f)$$

Dengan

m_c = kadar moisture kritis dry bulb basis

m_f = kadar moisture produk dry bulb basis

Setelah mendapatkan constant rate period dan falling rate period maka waktu pengeringan dapat dihitung dengan

$$t = t_c + t_f$$

Dengan

t = waktu pengeringan

t_f = falling rate periode

t_c = constant rate periode

➤ **Kecepatan Udara di dalam ruang pengering Utama**

Untuk mendapatkan kecepatan udara di 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

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

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

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

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

H_a = humidity ratio dari diagram psikrometrik

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

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

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

Energi masuk = Energi keluar

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

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

$$m_a = \frac{m_{pout} \cdot h_{pout} + m_{wout} \cdot h_{wv} - m_{pin} \cdot h_{pin}}{(h_{ain} - h_{out})}$$

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

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

$$\text{Luas ruang pengering utama (} A_{dryer} \text{)} = \frac{\pi}{4} (D_{dryer})^2 \quad (\text{m}^2)$$

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

➤ Tinggi Ruang Pengering Utama

Asumsi droplet jatuh pada kecepatan yang sama dengan udara

$$\text{Tinggi} = V_{udpanas} \times t \times n_s$$

n_s = faktor safety

III.2.2. Langkah Perhitungan Daya

Untuk menghitung daya total yang digunakan terlebih dahulu harus mendapatkan nilai dari daya pemanas dan daya kalor untuk penguapan. Berikut persamaan yang dapat digunakan :

➤ Daya Pemanas

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

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

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

Laju aliran udara	= m_{air}	$(\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$
Humid volume	= v_p	$(\text{m}^3 \text{ kg}^{-1})$
Humidity Ratio	= H	(kg air/kg udara)
Humid heat (Hs)	= $0.24 + 0.45H$	$(\text{kcal/kg } ^\circ\text{C})$

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

➤ **Kalor untuk Menguapkan**

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

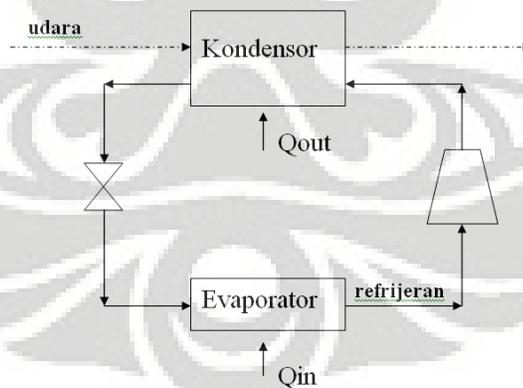
$$\lambda = \text{kalor laten penguapan} \quad (\text{kJ/kg})$$

➤ **Total Energi untuk Udara**

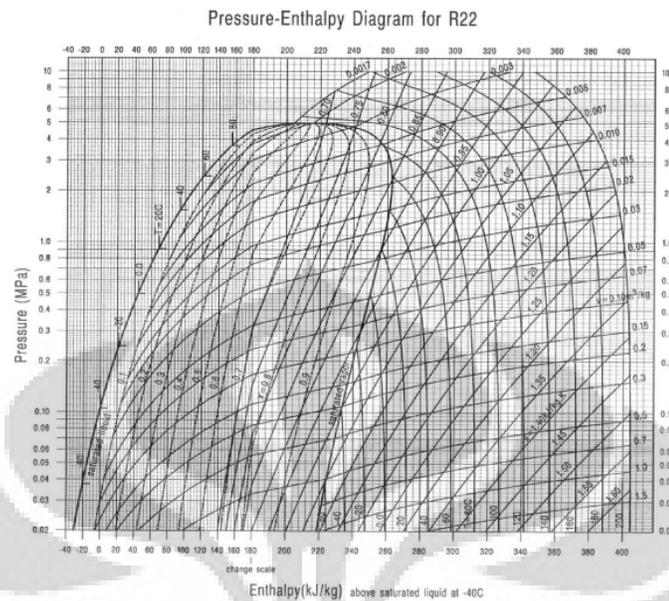
$$\text{Total Energi} = \text{Daya Pemanas} + \text{Kalor Penguapan} \quad (\text{kW})$$

III.2.3. Langkah Perhitungan Perancangan Pemanas Udara Menggunakan Sistem Refrijerasi

➤ **Pemanas Udara Menggunakan Pemanas Pompa Kalor**



Gambar 3. 10. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas pompa kalor



Gambar 3. 11. Diagram p-h R22

Dengan mengacu pada spesifikasi tekanan kompresor unit A/C split, *p-h diagram* jenis R22, maka laju aliran kalor/energi termal yang dikeluarkan/dibuang pada kondensor dan yang diserap pada evaporator ditinjau dari sisi fluida pendingin (*refrijeran*) dapat dianalisis.

Laju aliran massa fluida pendingin/refrijeran dalam siklus sistem pemanas pompa kalor dapat dianalisis dari persamaan berikut:

$$m_F = \frac{\eta_e \cdot P_{komp}}{(h_2 - h_1)} \quad \left(\frac{kg}{s}\right)$$

Energi termal yang dikeluarkan/dibuang ke udara sekitar oleh fluida pendingin (*refrijeran*) dalam proses kondensasi di kondensor, yaitu

$$Q_{out} = m_F \cdot (h_2 - h_3) \quad (kW)$$

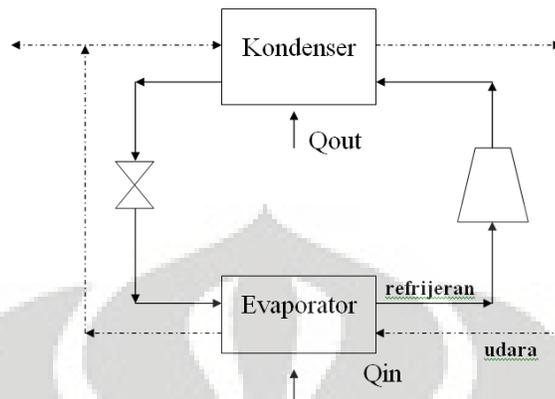
Jika laju aliran udara menggunakan hasil perhitungan pada kesetimbangan energi, maka didapat suhu keluar dari kondenser, yaitu

$$T_{outk} = \frac{Q_{out}}{m_{air} \cdot C_p} + T_{ink} \quad (^\circ C)$$

Jika suhu keluar disamakan dengan suhu keluar menggunakan pemanas listrik, maka didapat laju aliran udara menuju kondensor, yaitu

$$m_{air} = \frac{Q_{out}}{C_p \cdot (T_{outk} - T_{ink})} \quad \left(\frac{kg}{s}\right)$$

➤ **Pemanas Udara Menggunakan Pemanas Refrijerasi dan *Dehumidifier***



Gambar 3. 12. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas refrijerasi dan *dehumidifier*

Energi termal yang diambil oleh fluida pendingin (refrijerasi) dalam proses evaporasi di evaporator, yaitu

$$Q_{in} = m_F \cdot (h_1 - h_3) \quad (kW)$$

Maka laju aliran udara yang melewati evaporator sebanyak

$$m_{udara} = \frac{Q_{in}}{C_p \cdot (T_{ine} - T_{oute})} \quad \left(\frac{kg}{s}\right)$$

Suhu keluar dari kondenser, yaitu

$$T_{outk} = \frac{Q_{out}}{m_{udara} \cdot C_p} + T_{ink} \quad (^\circ C)$$

III.3. Langkah Simulasi CFD Perancangan Pengering Semprot

Simulasi CFD rancang bangun pengering semprot menggunakan software FLUENT 6.3. Untuk menggambar geometri dari rancang bangun pengering semprot digunakan software GAMBIT 6.2.1. Perbandingan geometri simulasi dengan benda sebenarnya adalah 1:1.

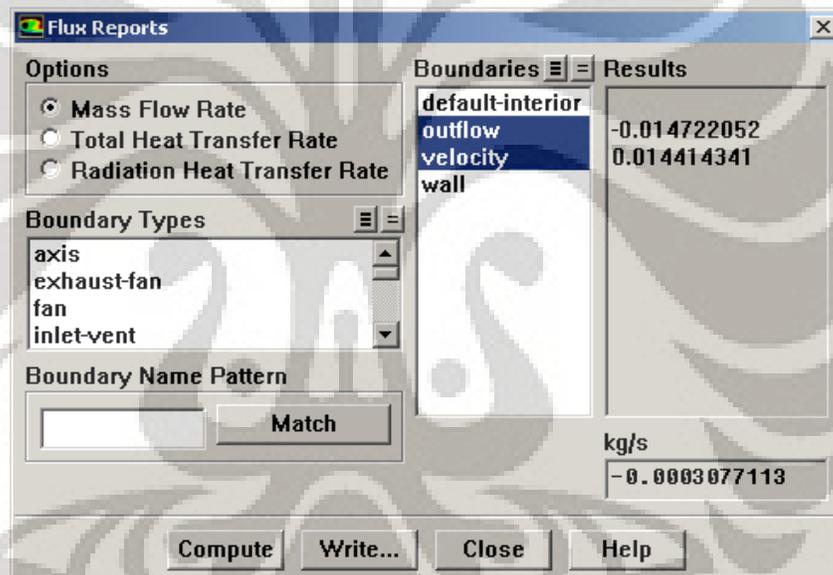
Sebelum melakukan simulasi CFD untuk ruang pengering utama, ada parameter-parameter yang harus diperhatikan antara lain:

Parameter Simulasi Perancangan

- Kecepatan udara masuk = V_{udara} (m/s)
- Suhu udara masuk = T_{udara1} ($^\circ C$)

- 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} ($^{\circ}\text{C}$)
- 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



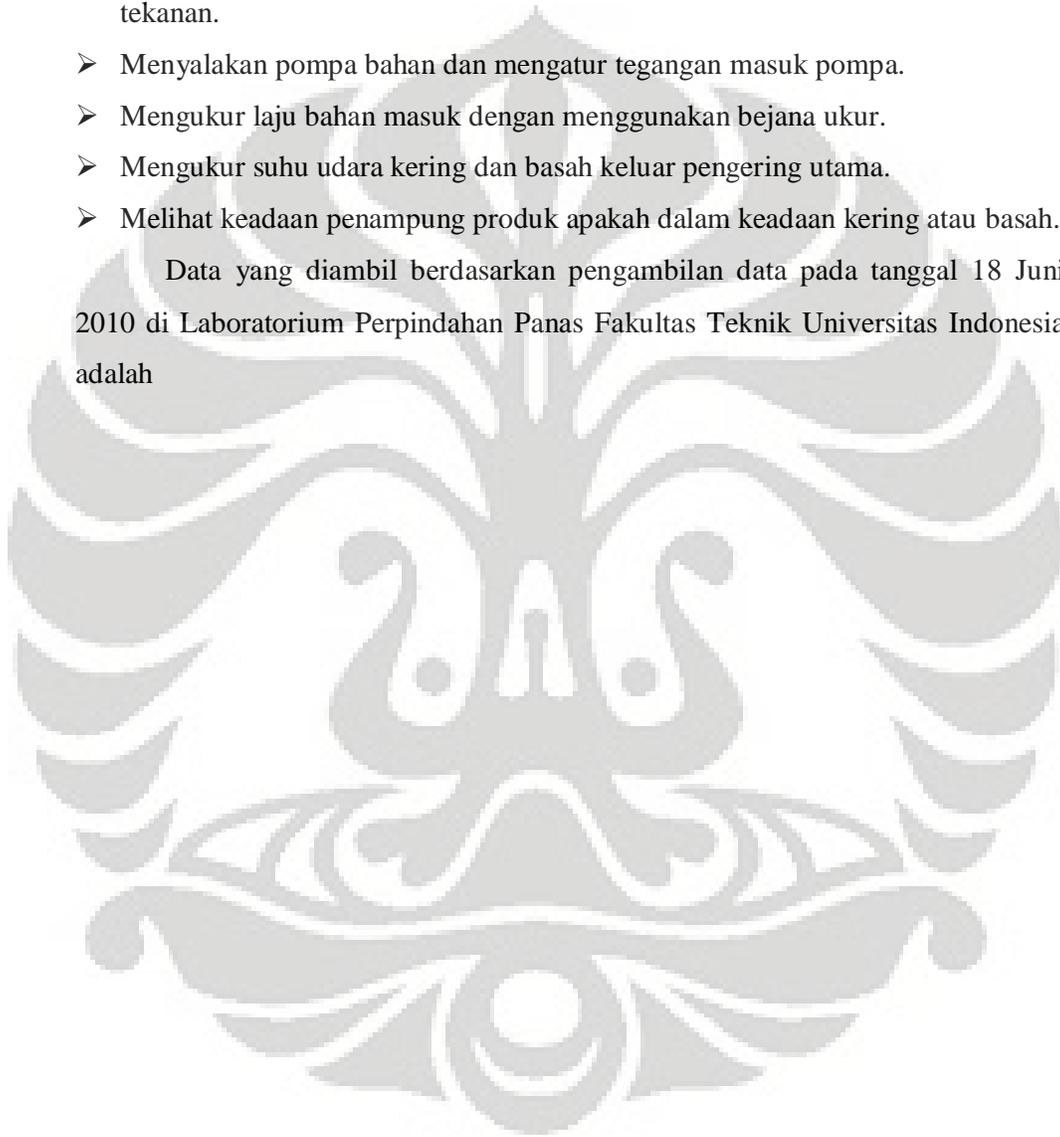
Gambar 3. 13. Hasil laju pengeringan pada FLUENT

III.4. Cara Pengambilan dan Hasil 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:

- Menyalakan *blower* kemudian mengukur kecepatan udara masuk dengan menggunakan orifis dan manometer.
- Menyalakan kotak panel untuk memberikan daya pada pemanas dan mengatur suhu keluar dari pemanas.
- Menyalakan kompresor dan mengatur tekanan dengan menggunakan pengatur tekanan.
- Menyalakan pompa bahan dan mengatur tegangan masuk pompa.
- Mengukur laju bahan masuk dengan menggunakan bejana ukur.
- Mengukur suhu udara kering dan basah keluar pengering utama.
- Melihat keadaan penampung produk apakah dalam keadaan kering atau basah.

Data yang diambil berdasarkan pengambilan data pada tanggal 18 Juni 2010 di Laboratorium Perpindahan Panas Fakultas Teknik Universitas Indonesia adalah



DATA EKSPERIMEN PENGERING SEMPROT

No.	suhu keluar heater	suhu udara basah	flow cairan (l/jam)	flow udara (m ³ /jam)	H1	H2	Laju udara kering (m ³ /jam)	Laju pengeringan (m ³ /jam)	Suhu udara panas	Tekanan udara (bar)	Keadaan penampung produk
1		48.5	1.2	57.0328	0.0191	0.0486	55.963887	1.64925575	160	1	kering
2	96	48	1.2	57.0328	0.0191	0.0551	55.963887	2.01693848	160	1	kering
3	75	37	1.2	60.08849	0.0191	0.0247	58.962307	0.33018892	115	1.5	kering
4	92	38	1.5	57.0328	0.0191	0.0203	55.963887	0.06827594	160	1.5	kering
5	63	34	1.5	57.0328	0.0191	0.0221	55.963887	0.16789166	160	1.5	kering
6	78	37	1.5	57.0328	0.0191	0.0234	55.963887	0.24232363	130	1.5	kering
7	53	36	1.5	57.0328	0.0191	0.0315	55.963887	0.69283292	100	1.5	kering
8	43	37	1.5	57.0328	0.0191	0.0386	55.963887	1.09297471	80	1.5	basah
9	44	34	1.5	57.0328	0.0191	0.0303	55.963887	0.62511662	90	1.5	kering
10	67	36	1.8	60.08849	0.0191	0.0254	58.962307	0.3732314	110	1.5	kering
11	49	36.5	1.8	60.08849	0.0191	0.0346	58.962307	0.91273651	100	1.5	kering
12	50	33	1.8	60.08849	0.0191	0.0253	58.962307	0.36438706	90	1.5	kering
13	48	32	1.8	60.08849	0.0191	0.0239	58.962307	0.28066058	90	1.5	basah
14	55	33.5	1.8	60.08849	0.0191	0.0243	58.962307	0.30719362	90	1.5	kering
15	50	36	2.1	60.08849	0.0191	0.0328	58.962307	0.80719398	90	1	kering
16	45	36	2.4	60.08849	0.0191	0.0349	58.962307	0.93160445	90	0.5	basah
17	44	33.5	2.4	60.08849	0.0191	0.0291	58.962307	0.58667495	80	1	kering
18	56	35.5	2.7	60.08849	0.0191	0.0289	58.962307	0.57547211	110	0.5	kering
19	50	36.5	3	60.08849	0.0191	0.0341	58.962307	0.88679309	100	0.5	basah
20	53	36	3	60.08849	0.0191	0.0315	58.962307	0.72995336	105	0.5	basah
21	58	44	4.8	57.0328	0.0191	0.0553	55.963887	2.02645235	160	1	basah
22	65	43	4.8	57.0328	0.0191	0.0483	55.963887	1.6341455	160	1.5	basah
23	68	42	5.4	57.0328	0.0191	0.0433	55.963887	1.35600498	160	1	basah
24	68	38	6	57.0328	0.0191	0.0305	55.963887	0.63966723	160	1	basah

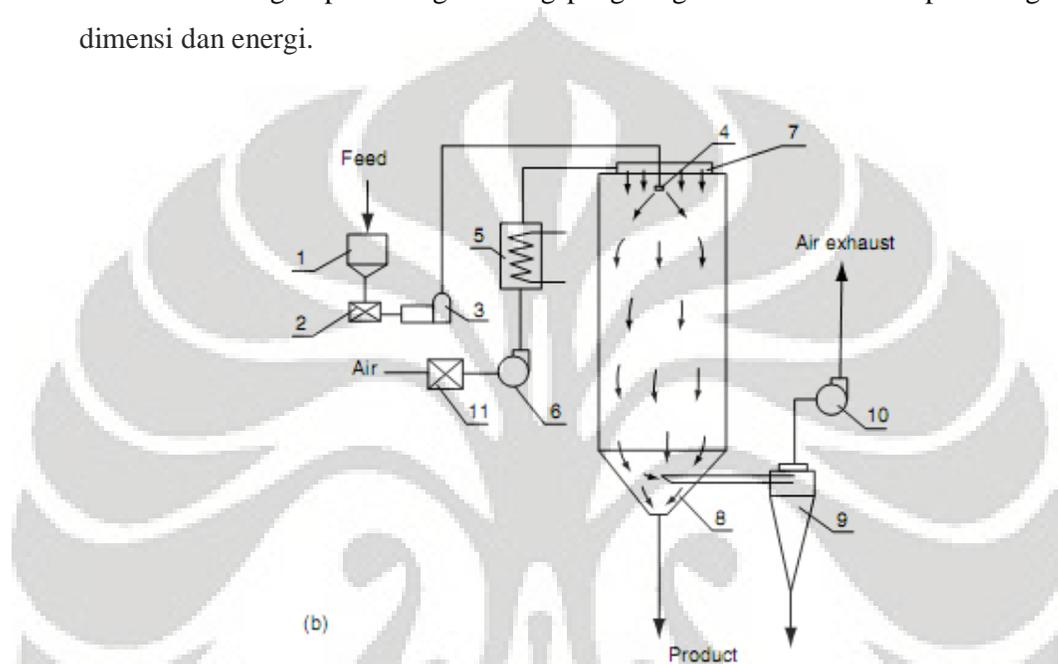
Tabel 3. 1. Data Eksperimen Pengering Semprot

III.5. Hasil Perhitungan Perancangan

Hasil perhitungan perancangan terdiri dari hasil perhitungan dimensi, waktu pengeringan, energi, dan sistem refrigerasi.

III.5.1. Hasil Perhitungan Perancangan Ruang Pengering Utama

Perhitungan perancangan ruang pengering utama terdiri dari perhitungan dimensi dan energi.



Gambar 3. 14. Skema Pengering Semprot

Asumsi

Cairan 20% solid (massa jenis = 1000 kg m^{-3}) $T_0 = 27^\circ \text{C}$

Produk kering = 4% w.w.b. (massa jenis = 1000 kg m^{-3}) $T = 55^\circ \text{C}$

Critical Moisture content = 50% w.w.b.

Nozzle atomiser, diameter nozzle = 1.2 mm. laju aliran cairan = 5 liter/jam

Diameter droplet 50 mikron dari atomiser.

Suhu udara lingkungan = 27°C dan R.H. = 70%, dipanaskan hingga 110°C .

Kalor laten penguapan = 2502 kJ kg^{-1}

Kalor spesifik solid kering = $4.179 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Kalor spesifik air = $4.182 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Kalor spesifik uap air = $1.875 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Kalor spesifik udara kering = $1.005 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Konduktivitas termal udara = $0.032 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Viskositas udara = $1.6 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

➤ **Diameter Ruang Pengering Utama**

Untuk menghitung diameter pengering utama harus dihitung lebih dahulu jangkauan droplet ke arah horizontal.

$$S_{\max} = \frac{V_{po} D_p^2 \rho_p}{18\mu}$$

Sedangkan ρ_p and D_p bervariasi, maka didapatkan rata-ratanya:

$$\rho_p D_p^2 = \frac{\rho_o D_o^2 + \rho_d D_c^2}{2}$$

Asumsi diameter tetap selama periode falling rate

$$\text{Massa satu droplet} = \frac{4\pi r^3 \rho}{3}$$

Harus dihitung berdasarkan ukuran droplet terbesar. Maka didapat beratnya;

$$\text{massadroplet} = \frac{4\pi(25 \times 10^{-6})^3 (1000)}{3} = 6.54 \times 10^{-11} \text{ kg}$$

Massa solid dalam droplet = $6.54 \times 10^{-11} \times 0.2 = 1.31 \times 10^{-11}$

Massa produk kering dalam droplet = $1.31 \times 10^{-11} \times 1.04 = 1.36 \times 10^{-11}$

$$\text{Volume droplet kering} = \frac{\text{mass}}{\text{density}} = \frac{1.36 \times 10^{-11}}{1000} = 1.36 \times 10^{-14} \text{ m}^3$$

Maka Jari-jari kritis = $1.655 \times 10^{-5} \text{ m}$; Diameter kritis = $3.31 \times 10^{-5} \text{ m}$

$$\rho_p D_p^2 (\text{rata - rata}) = \frac{(1000 \times (50 \times 10^{-6})^2) + (1000 \times (33.1 \times 10^{-6})^2)}{2} = 1.8 \times 10^{-6}$$

karena diameter nozzle = 1.2 mm, Q = 5 liter/jam, tekanan = 1,5 bar maka didapat kecepatan keluar nozzle = 10.07 m/s jika sudut nozzle = 13° , maka :

$$V_{po} = 10.07 / \cos(6.5^\circ) = 10.14 \text{ m s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} S_{\max} &= \frac{V_{po} D_p^2 \rho_p}{18\mu} \\ &= \frac{(10.14)(1.8 \times 10^{-6})}{18 \times 1.6 \times 10^{-5}} = 0.0633 \text{ m} \end{aligned}$$

Diameter = $2 S_{\max} = 12.7 \text{ cm}$

Dikali dengan faktor safety (1.2)

Diameter ruang pengering = 15.2 cm

➤ **Waktu Pengeringan**

Untuk menghitung waktu pengeringan total diperlukan constant rate periode dan falling rate periode .

$$t = t_c + t_f$$

Constant Rate Periode

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

$$t_c = \frac{2.502 \times 10^6 \cdot 1000 \cdot \left((50 \times 10^{-6})^2 - (33.1 \times 10^{-6})^2 \right)}{8 \cdot 0.032 \cdot (110 - 38.4)}$$

$$t_c = 0.1916 \text{ s}$$

Falling Rate Periode

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

$$m_c = 0.5 \text{ w.w.b.} = 1.0 \text{ d.w.b.}$$

$$m_f = 0.04 \text{ w.w.b.} = 0.0417 \text{ d.w.b.}$$

$$t_f = \frac{2.502 \times 10^6 \cdot 1000 \cdot (33.1 \times 10^{-6})^2}{6 \cdot 0.032 \cdot (110 - 38.4)} (1.0 - 0.0417)$$

maka $t_f = 0.1911 \text{ s}$

Total Waktu Pengeringan

$$t = 0.1916 + 0.1911 = 0.3827 \text{ s}$$

➤ **Kecepatan Udara Panas**

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

a) Kesetimbangan Massa

Solid masuk = Solid keluar

$$5 \times 0.2 = 0.96 m_p$$

$$m_{\text{wout}} = 3.96 \text{ kg jam}^{-1}$$

$$\text{Total} = 5 \text{ kg jam}^{-1} = m_{\text{pout}} + m_{\text{wout}}$$

$$m_{\text{pout}} = 1.04 \text{ kg jam}^{-1}$$

b) Kesetimbangan Energi

Energi masuk = Energi keluar

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

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

$$m_{\text{pin}} = 5 \text{ kg jam}^{-1}; m_{\text{pout}} = 1.04 \text{ kg jam}^{-1}; m_{\text{wout}} = 3.96 \text{ kg jam}^{-1}$$

Let X = fraksi solid

$$h_{\text{p}} = T (XC_{\text{p}} + (1-X)C_{\text{pwater}})$$

$$h_{\text{pin}} = 300 (0.2(4.179) + 0.8(4.182)) = 1254.42 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_{\text{pout}} = 328 (0.96(4.179) + 0.04(4.182)) = 1370.75 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_{\text{air}} = h_{\text{a}} + H_{\text{a}} h_{\text{wv}}$$

$$= CT + H_{\text{a}}(C_{\text{wv}}T + h_{\text{gs}})$$

$H_{\text{a}} = 0.0157$ dari diagram psikrometrik

$$h_{\text{airin}} = 1.005(383) + 0.0191(1.857(383) + 2502) = 430.319 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_{\text{airout}} = 1.005(328) + 0.0191(1.857(328) + 2502) = 373.59 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_{\text{wv}} = C_{\text{wv}}T + h_{\text{gs}} = 1.875(328) + 2502 = 3117 \text{ kJ kg}^{-1}$$

Kemudian

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

$$5(1254.42) + m_{\text{a}}(430.319) = 1.04 (1370.75) + m_{\text{a}}(373.59) + 3.96(3117)$$

$$m_{\text{a}} = 0.0367 \text{ kg/s}$$

$$\text{Volume spesifik pada } 110^{\circ} \text{ C} = 1.113 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{Laju udara panas} = (0.0366 \times 1.113) = 0.0408 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Luas ruang pengering utama} = \frac{\pi}{4} 0.152^2 = 0.01814 \text{ m}^2$$

$$\text{Kecepatan udara di dalam ruang pengering utama} = 2.25 \text{ m s}^{-1}$$

➤ Tinggi Ruang Pengering Utama

Asumsi droplet jatuh pada kecepatan yang sama dengan udara

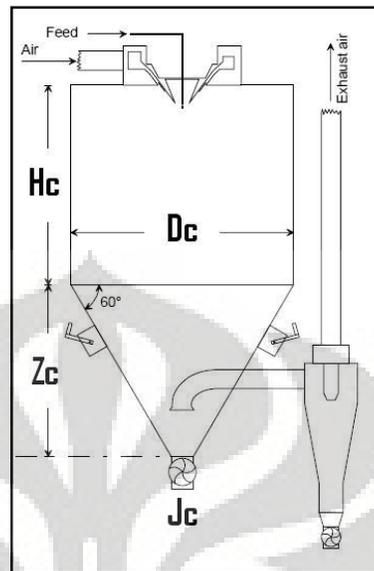
Dikali dengan faktor safety (1.1)

Tinggi = Kecepatan udara di dalam pengering utama x waktu pengeringan

$$= 2.25 \text{ m s}^{-1} \times 0.3827 \text{ s} \times 1.1$$

$$= 0.947 \text{ m} = 94.7 \text{ cm}$$

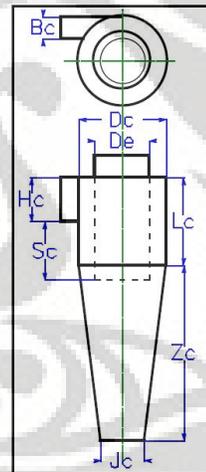
$$\begin{aligned} D_c &= 20 \text{ cm} \\ H_c &= 80 \text{ cm} \\ Z_c &= 18 \text{ cm} \\ J_c &= 6 \text{ cm} \end{aligned}$$



Gambar 3. 15. Rancang Bangun Ruang Pengering Utama

➤ Hasil Perancangan Siklon

$$\begin{aligned} D_c &= 12.1 \text{ cm} \approx 12 \text{ cm} \\ B_c &= 3.02 \text{ cm} \approx 3 \text{ cm} \\ H_c &= 6.03 \text{ cm} \approx 6 \text{ cm} \\ D_e &= 7.54 \text{ cm} \approx 7.5 \text{ cm} \\ L_c &= 12.1 \text{ cm} \approx 12 \text{ cm} \\ S_c &= 7.54 \text{ cm} \approx 7.5 \text{ cm} \\ Z_c &= 24.1 \text{ cm} \approx 24 \text{ cm} \\ J_c &= 6.03 \text{ cm} \approx 6 \text{ cm} \end{aligned}$$



Gambar 3. 16. Rancang Bangun Siklon

III.5.2. Hasil Perhitungan Energi

Untuk menghitung daya total yang digunakan terlebih dahulu harus mendapatkan nilai dari daya pemanas dan daya kalor untuk penguapan. Berikut persamaan yang dapat digunakan ;

➤ Daya Pemanas

$$\text{Suhu dry bulb} = 27^\circ \text{ C}$$

$$\begin{aligned}
 \text{RH} &= 70\% \\
 \text{Dipanaskan hingga} &= 110^\circ \text{C} \\
 \text{Laju aliran udara} &= 0.0408 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \\
 \text{Humid volume} &= 0.8716 \text{ m}^3/\text{kg} \\
 \text{Humidity Ratio (H)} &= 0.1578 \text{ kg air/kg udara} \\
 \text{Humid heat} &= 0.24 + 0.45H \\
 &= 0.247101 \text{ kkal/kg } ^\circ\text{C} \\
 \text{Power Heater} &= \frac{0.0408 \times (110 - 27) \times 0.2471 \times 4.2}{0.8716} \\
 &= 4.036 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

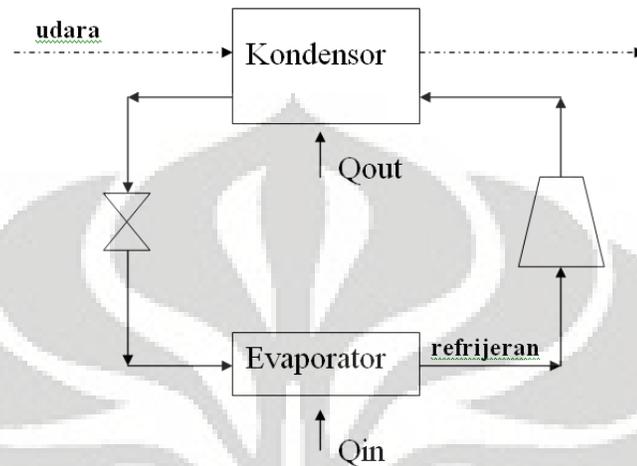
➤ **Kalor untuk Menguapkan**

$$\begin{aligned}
 \text{Heat evaporated} &= \text{laju masukan bahan} \times \text{kalor laten penguapan} \\
 &= 0.001389 \text{ kg/s} \times 2.502 \times 10^3 \text{ kJ/kg} \\
 &= 3.48 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

➤ **Total Energi untuk Udara**

$$\begin{aligned}
 \text{Total Energi} &= \text{Power Heater} + \text{Heat evaporated} \\
 &= 4.036 + 3.48 \\
 &= 7.516 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

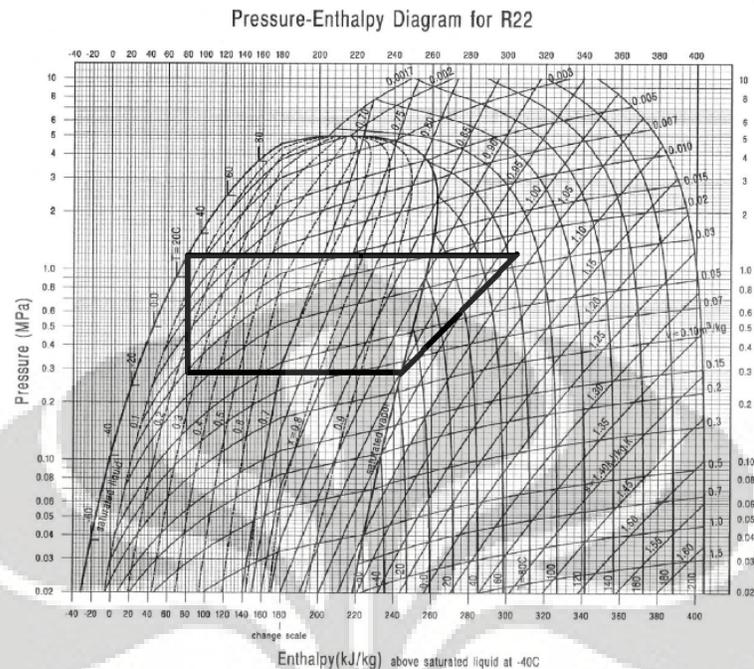
III.5.3. Perhitungan Perancangan Pengering Semprot Menggunakan Pemanas Pompa Kalor



Gambar 3. 17. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas pompa kalor

No.	Uraian	Besar	Satuan
1	suhu masuk kondensor	27	Celcius
2	suhu keluar evaporator	10.2	Celcius
3	suhu masuk evaporator	27	Celcius
4	kalor jenis udara	1.007	kJ/kg.K
5	efisiensi motor kompresor	0.9	
6	h_1	246	kJ/kg
7	h_2	312	kJ/kg
8	h_3	80	kJ/kg
9	P_{komp} spec. produk	1.082	kW

Tabel 3. 2. Spesifikasi pemanas pompa kalor



Gambar 3. 18. Diagram p-h R22

Dengan mengacu pada spesifikasi tekanan kompresor unit A/C split yang digunakan dan tabel, serta *ph diagram* jenis R22, maka laju aliran kalor/energi termal yang dikeluarkan/dibuang pada kondensor dan yang diserap pada evaporator ditinjau dari sisi fluida pendingin (*refrijeran*) dapat dianalisis.

Laju aliran massa fluida pendingin/refrijeran dalam siklus sistem *pemanas pompa kalor* dapat dianalisis dari persamaan berikut:

$$m_F = \frac{\eta_e \cdot P_{komp}}{(h_2 - h_1)} = \frac{0,9 \times 1,082}{(312 - 246)} = 0,01476 \text{ kg/s}$$

Energi termal yang dikeluarkan/dibuang ke udara sekitar oleh fluida pendingin (*refrijeran*) dalam proses kondensasi di kondensor, yaitu

$$Q_{out} = m_F \cdot (h_2 - h_3) = 0,01476 \times (312 - 80) = 3,424 \text{ kW}$$

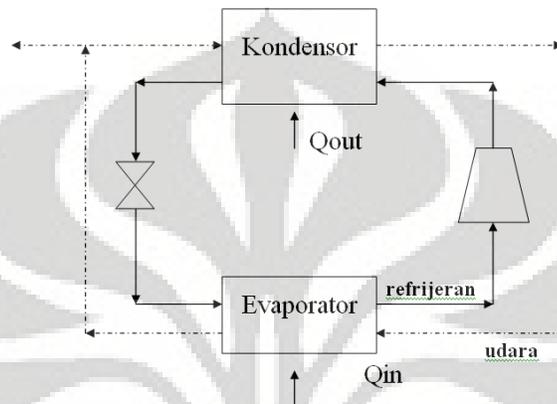
Jika laju aliran udara menggunakan hasil perhitungan pada kesetimbangan energi, maka didapat suhu keluar dari kondensor, yaitu

$$T_{outk} = \frac{Q_{out}}{m_{air} \cdot C_p} + T_{ink} = \frac{3,424}{0,0367 \cdot 1,007} + 27 = 119,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jika suhu keluar disamakan dengan suhu keluar menggunakan pemanas listrik, maka didapat laju aliran udara menuju kondensor, yaitu

$$m_{udara} = \frac{Q_{out}}{C_p \cdot (T_{outk} - T_{ink})} = \frac{3,424}{1,007 \cdot (110 - 27)} = 0,041 \text{ kg/s}$$

III.5.4. Perhitungan Perancangan Pengering Semprot Menggunakan Pemanas Refrijerasi dan *Dehumidifier*



Gambar 3. 19. Skema pemanasan udara menggunakan pemanas refrijerasi dan *dehumidifier*

Energi termal yang diambil oleh fluida pendingin (refrijerasi) dalam proses evaporasi di evaporator, yaitu

$$Q_{in} = m_F \cdot (h_1 - h_3) = 0,01476 \times (246 - 80) = 2,450 \text{ kW}$$

Maka laju aliran udara yang melewati evaporator sebanyak

$$m_{udara} = \frac{Q_{in}}{C_p \cdot (T_{ine} - T_{oute})} = \frac{2,450}{1,0068 \cdot (27 - 10,2)} = 0,145 \text{ kg/s}$$

Udara yang dibutuhkan untuk pemanasan adalah sebanyak 0,0367 maka udara yang dibuang sebelum masuk ke kondensor sebanyak

$$m_{udarabuang} = 0,144 - 0,0367 = 0,1073 \text{ kg/s}$$

Suhu keluar dari kondensor, yaitu

$$T_{outk} = \frac{Q_{out}}{m_{udara} \cdot C_p} + T_{ink} = \frac{3,424}{0,0367 \cdot 1,0068} + 10,2 = 102,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

III.6. Hasil Simulasi CFD Perancangan Pengering Semprot

Parameter Simulasi	Pemanas listrik	Pemanas pompa kalor	Pemanas refrigjerasi dengan <i>dehumidifier</i>
Kecepatan udara masuk (V_{udara})	17	17	17
Suhu udara masuk (T_{udara})	110	119.65	102.87
Kelembaban udara masuk (H)	0.01578	0.01578	0.00776
Diameter droplet	50	50	50
Jumlah partikel sekali semprot	114	114	114
Suhu bahan masuk	27	27	27
Kecepatan bahan masuk	10.14	10.14	10.14
Sudut <i>Nozzle</i>	13	13	13
Laju bahan masuk	0.00139	0.00139	0.00139
Hasil Simulasi			
Laju pengeringan	0.00032	0.00035	0.00038

Tabel 3. 3. Hasil simulasi perancangan

III.7. Hasil Simulasi CFD Data Eksperimen Pengering Semprot

Parameter Simulasi	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
Kecepatan udara masuk (V_{udara})	6.6	6.6	6.6
Suhu udara masuk (T_{udara})	160	160	160
Kelembaban udara masuk (H)	0.0191	0.0191	0.0191
Diameter droplet	35	35	35
Jumlah partikel sekali semprot	50	50	50
Suhu bahan masuk	27	27	27
Kecepatan bahan masuk	17.35	17.35	17.35
Sudut <i>Nozzle</i>	13	13	13
Laju bahan masuk	0.00133	0.0015	0.00167
Hasil Simulasi			
Laju pengeringan	0.0006612	0.0004551	0.0003319

Tabel 3. 4. Hasil simulasi data eksperimen

III.8. Hasil Perhitungan Pengering Semprot Menggunakan Pemanas Refrijerasi dan *Dehumidifier* Berdasarkan Data Eksperimen

➤ Menghitung Daya Kompresor

$$q_{udara} = m_{udara} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = 0.01933 \times 1 \times (110 - 27) = 1.6044 \text{ kW}$$

$$\text{Kalor penguapan} = m_{bahan} \cdot \lambda = 0.0005 \times 2231 = 1.1155 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} \text{Daya Pemanas} &= q_{udara} + \text{kalor penguapan} = 1.6044 + 1.1155 \\ &= 2.7199 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\text{Daya Pemanas} = Q_{kondensator}$$

$$Q_{kondensator} = Q_{in} + P_{komp}$$

$$2.7199 = 2.45 + P_{komp}$$

$$P_{komp} = 0.2699 \text{ kW}$$

➤ Menghitung Suhu Keluar Kondensator

Maka laju aliran udara yang melewati evaporator sebanyak

$$m_{udara} = \frac{Q_{in}}{C_p \cdot (T_{ine} - T_{oute})} = \frac{2.45}{1,0068 \cdot (27 - 10,2)} = 0,145 \text{ kg/s}$$

Suhu keluar dari kondensator, yaitu

$$T_{outk} = \frac{Q_{out}}{m_{air} \cdot C_p} + T_{ink} = \frac{2.7199}{0,145 \cdot 1,0068} + 10,2 = 28.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Flow udara masuk (%)	100	83.33	66.67	50	33.33	16.67
Kecepatan udara masuk (V_{udara})	49.8	41.5	33.2	24.9	16.6	8.3
Suhu udara masuk (T_{udara})	28.8	32.5	38.13	47.44	66.1	121.9
Kelembaban udara masuk (H)	0.00776	0.00776	0.00776	0.00776	0.00776	0.00776
Diameter droplet	35	35	35	35	35	35
Jumlah partikel sekali semprot	50	50	50	50	50	50
Suhu bahan masuk	27	27	27	27	27	27
Kecepatan bahan masuk	17	17	17	17	17	17
Sudut <i>Nozzle</i>	13	13	13	13	13	13
Laju bahan masuk	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005

Tabel 3.5 Parameter simulasi variasi flow udara masuk ruang pengering

Daya kompresor (kW)	0.27	0.405	0.54	0.675	0.81
Flow udara masuk (kg/s)	0.01933	0.01933	0.01933	0.01933	0.01933
Kecepatan udara masuk (V_{udara})	8	8	8	8	8
Suhu udara masuk (T_{udara})	398.5	404.2	409.9	415.7	421.4
Kelembaban udara masuk (H)	0.00776	0.00776	0.00776	0.00776	0.00776
Diameter droplet	35	35	35	35	35
Jumlah partikel sekali semprot	50	50	50	50	50
Suhu bahan masuk	27	27	27	27	27
Kecepatan bahan masuk	17	17	17	17	17
Sudut <i>Nozzle</i>	13	13	13	13	13
Laju bahan masuk	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005

Tabel 3.6 Parameter simulasi variasi daya kompresor

BAB IV
ANALISA HASIL PERANCANGAN, SIMULASI CFD DAN
EKSPERIMEN

IV.1. Analisa Perbandingan Perancangan dengan Eksperimen Pengering Semprot

Pada perancangan dan eksperimen terdapat perbedaan nilai dikarenakan oleh perbedaan kondisi lingkungan dan hal lain dalam melakukan eksperimen. Nilai-nilai yang berbeda antara perancangan dan eksperimen antar lain :

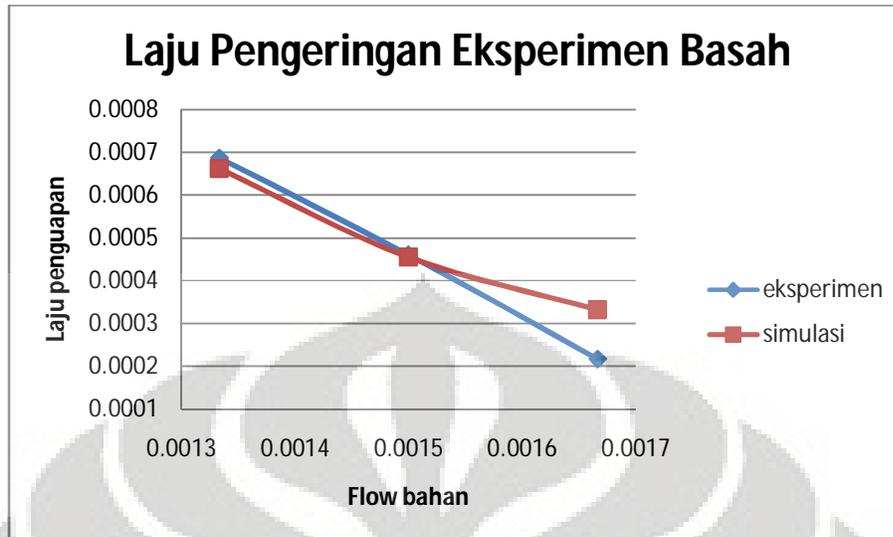
Parameter	Perancangan	Eksperimen
Diameter droplet	50 mikron	35 mikron
RH udara	70 %	81 %
Suhu Udara	110	80-160
Flow udara	0.00367 kg/s	0.001933 kg/s
Flow bahan	5 l/jam	1.2 – 6 l/jam
Jumlah partikel sekali semprot	114	50
Tekanan udara masuk <i>nozzle</i>	1 bar	1 – 1.5 bar

Diameter droplet pada perancangan besarnya 50 mikron sedangkan pada eksperimen sebesar 35 mikron. Hal ini dikarenakan pada eksperimen flow bahan bervariasi sehingga ukuran droplet jadi bervariasi. Kami mengambil ukuran droplet pada eksperimen yaitu 35 mikron. Akibat perubahan diameter maka jumlah partikel sekali semprot juga berubah. Flow udara pada perancangan lebih besar daripada eksperimen. Hal ini dikarenakan *blower* yang digunakan pada eksperimen hanya dapat menyalurkan udara maksimal sebesar 0.001933 kg/s.

IV.2. Analisa Perbandingan Laju Pengeringan Eksperimen dengan Simulasi Eksperimen untuk Keadaan Basah

Flow bahan (kg/s)	Laju pengeringan eksperimen (kg/s)	Laju pengeringan simulasi (kg/s)	Efisiensi eksperimen	Efisiensi simulasi
	0.00133	0.000686742	0.0006612	0.51505664
0.0015	0.000459535	0.0004551	0.30635668	0.3034
0.00167	0.000216776	0.0003319	0.13006567	0.1991

Tabel 4. 1. Data efisiensi eksperimen dan simulasi



Grafik 4. 1. Laju Pengeringan Eksperimen Basah

Dari grafik 4.1. didapat bahwa semakin besar flow bahan yang masuk ke ruang pengering maka semakin kecil laju penguapannya. Ini dikarenakan jumlah bahan yang diuapkan menguapkan semakin sedikit. Menurut hasil dari tabel diatas efisiensi maksimal akan di dapat pada flow bahan 0.00065 kg/s. Pada grafik dan tabel juga dapat dilihat perbandingan antara simulasi dan eksperimen memiliki kecenderungan yang sama.

IV.3. Analisa Simulasi Pengering Semprot Menggunakan Pemanas Refrijerasi dan *Dehumidifier* Berdasarkan Perhitungan Data Eksperimen

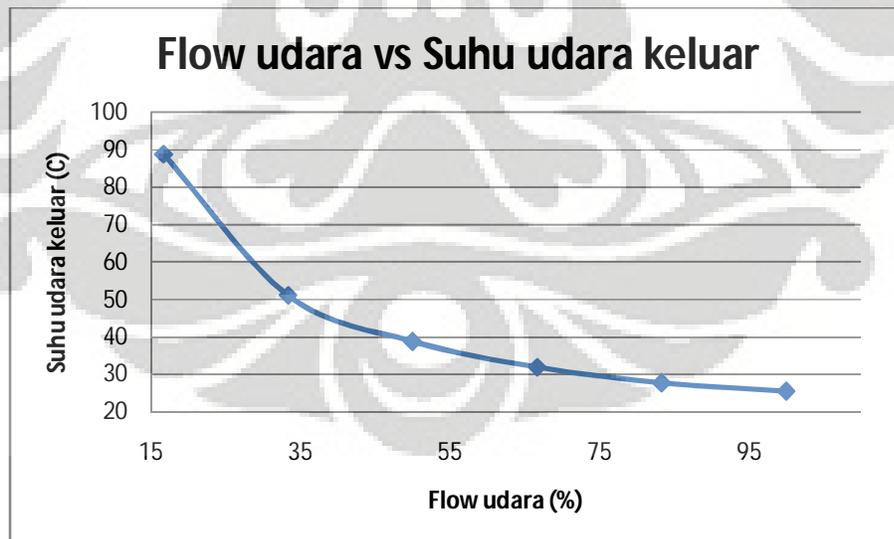
➤ Variasi Flow Udara

Suhu akhir partikel keluar dapat dianalogikan sama dengan suhu udara keluar ruang pengering karena partikel bergerak dengan kecepatan yang relatif sama dengan udara. Setelah partikel mengalami proses pengeringan konstan (*constan rate periode*), maka partikel akan mengalami proses pengeringan difusi (*falling rate periode*). Pada proses ini air dalam partikel menguap melalui celah-celah partikel. 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). Untuk itulah flow udara masuk divariasikan untuk melihat berapa suhu keluar akhir partikel sehingga dapat mencegah terjadinya *overheat* (hangus) pada material.

Laju Pengeringan (kg/s)	Flow udara (%)	COP _{dry}	COP _R	Kinerja sistem	Suhu udara masuk (°C)	Suhu udara keluar (°C)	Kalor laten (kJ/kg)	P _{komp} (kW)
0.0003674	100	3.317	0	3.317	28.8	25.61	2432	0.269
0.0003567	83.33	3.21	0.408	3.618	32.5	27.74	2424	0.269
0.0003242	66.67	2.902	0.817	3.718	38.13	31.91	2411	0.269
0.0003111	50	2.76	1.225	3.985	47.44	38.74	2390	0.269
0.0003018	33.33	2.626	1.633	4.259	66.1	51.1	2344	0.269
0.0001919	16.67	1.637	2.042	3.679	121.9	88.82	2298	0.269

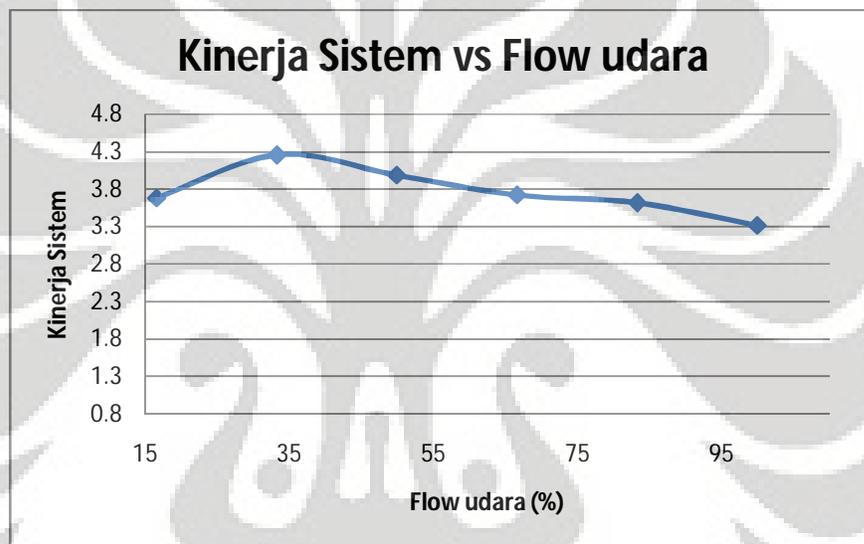
Tabel 4. 2. Data variasi flow udara masuk



Grafik 4. 2. Suhu keluar vs Persentase flow udara masuk

Dari grafik 4.2, didapat bahwa semakin besar flow udara yang masuk ke ruang pengering maka semakin kecil suhu udara keluar ruang pengering. Ini dikarenakan suhu udara masuk ruang pengering semakin kecil dengan flow udara yang semakin besar. 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.

$$\text{kapasitas panas} = m_{\text{udara}} \cdot C_p$$



Grafik 4. 3. Kinerja Sistem vs Persentase flow udara masuk

Dari grafik 4.3. didapat bahwa semakin besar flow udara yang masuk ruang pengering maka kinerja sistem semakin kecil. Ini dikarenakan laju pengeringan semakin kecil dengan meningkatnya flow udara. Kinerja sistem berbanding lurus dengan laju pengeringan.

$$\text{kinerja}_{\text{sistem}} = \frac{\text{laju}_{\text{pengeringan}} \times \text{kalor}_{\text{laten}} + \text{flow}_{\text{udara}} \cdot Q_{\text{in}}}{P_{\text{kompresor}}}$$

Pada saat flow udara semakin besar maka kinerja 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 terbang maka laju pengeringannya menjadi kecil sehingga kinerja sistem menjadi turun.

$$v_{udara} = \frac{Q_{udara}}{A}$$

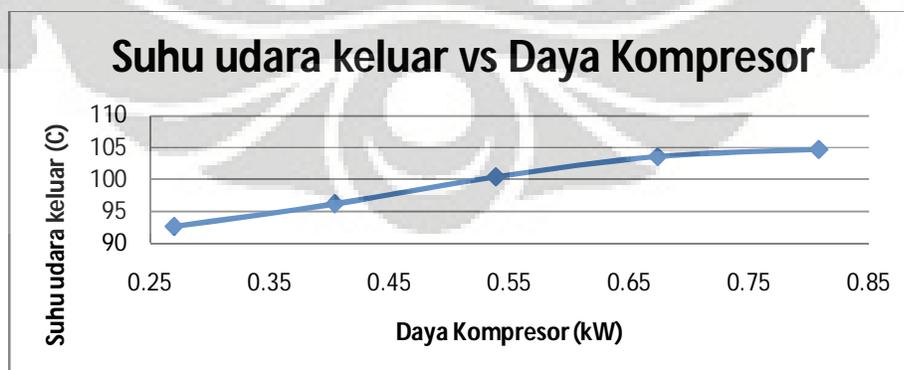
Pada saat flow udara 16.67 %, kinerja sistem menurun karena flow udara yang masuk kecil mengakibatkan kecepatan udara menjadi kecil sedangkan suhu udara masuk besar mengakibatkan nilai kalor laten penguapan menjadi berkurang sehingga laju pengeringannya menjadi kecil.

➤ Variasi Daya Kompresor

Selain menggunakan variasi flow udara, untuk mendapatkan daya yang efisien untuk heat sensitive material agar tidak hangus adalah memvariasikan daya kompresor. Dampak dari variasi daya ini adalah flow refrijeran juga bervariasi

Daya kompresor (kW)	Laju pengeringan (kg/s)	Flow refrigeran (kg/s)	Suhu udara masuk (°C)	Suhu udara keluar (°C)	Kalor laten (kJ/kg)	COP _{dry}	COP _R	Kinerja sistem
0.26939	0.0002252	0.01476	125.5	92.654	2192	1.832	0.725	2.557
0.404085	0.00018	0.01476	131.2	96.178	2171	0.967	0.725	1.692
0.53878	0.0001569	0.01476	136.9	100.43	2153	0.627	0.725	1.352
0.673475	0.0001835	0.01476	142.7	103.6	2138	0.583	0.725	1.308
0.80817	0.0002225	0.01476	148.4	104.72	2125	0.585	0.725	1.31

Tabel 4. 3. Data variasi daya kompresor

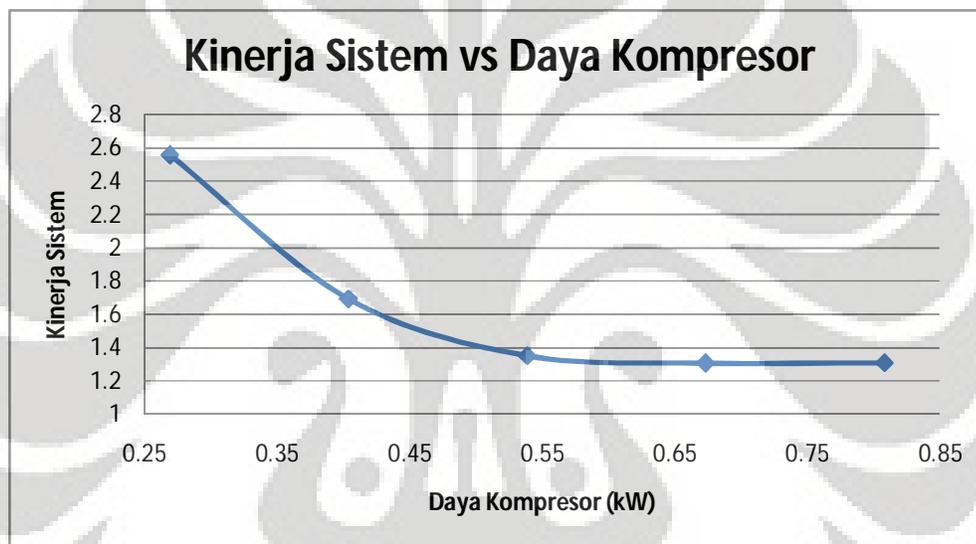


Grafik 4. 4. Suhu udara keluar vs Daya Kompresor

Dari grafik 4.4, didapat bahwa semakin besar daya kompresor yang diberikan maka semakin besar suhu udara masuk ruang pengering. Ini dikarenakan flow refrigeran semakin besar seiring dengan naiknya daya kompresor sehingga mengakibatkan daya kalor yang keluar dari kondensor menjadi besar. Jika laju udara masuk dan suhu udara masuk kondensor tetap maka suhu keluar kondensor menjadi besar.

$$q_{kondensor} = m_{refrijeran} \cdot (h_2 - h_3)$$

$$q_{kondensor} = m_{udara} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$



Grafik 4. 5. Kinerja Sistem vs Daya Kompresor

Dari grafik 4.5, didapat bahwa semakin besar daya kompresor yang diberikan maka semakin kecil kinerja sistem. Walaupun laju pengeringan naik dengan bertambahnya daya kompresor tapi semakin besar daya kompresor maka suhu udara naik mengakibatkan penurunan kalor laten penguapan. Kenaikan laju pengeringan tidak signifikan dibandingkan penurunan kalor laten. Ini yang menyebabkan daya pengeringan menjadi kecil sedangkan daya kompresor semakin besar maka kinerja sistem yang didapat akan semakin kecil.

$$Kinerja_{sistem} = \frac{laju_{pengeringan} \times kalor_{laten} + flow_{udara} \cdot Q_{in}}{P_{kompresor}}$$

Untuk mengatur flow refrijeran dengan perbedaan tekanan yang sama maka harus diatur pada katup ekspansi. Untuk memperbesar flow refrijeran, hambatan dalam katup ekspansi harus diperkecil karena flow refrijeran berbanding terbalik dengan hambatan katup ekspansi.

$$m_{refrijeran} = \frac{\Delta p}{R}$$



BAB V

PENUTUP

V.1. Kesimpulan

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

1. Laju pengeringan semakin kecil dengan bertambahnya flow bahan. Semakin tinggi suhu udara dengan flow bahan yang sama maka laju pengeringan semakin besar.
2. Efisiensi pengeringan antara simulasi dengan eksperimen memiliki kecenderungan yang sama.
3. Pada simulasi, laju pengeringan pemanas refrijerasi dengan *dehumidifier* (0.00038 kg/s) lebih besar dibandingkan pemanas listrik (0.00032 kg/s) dan pemanas pompa kalor (0.00035 kg/s).
4. Pada simulasi pemanas refrijerasi dan *dehumidifier* dengan variasi flow udara, suhu udara keluar dan kinerja sistem semakin kecil dengan bertambahnya flow udara.
5. Pada simulasi pemanas refrijerasi dan *dehumidifier* dengan variasi daya kompresor, suhu udara keluar semakin besar dengan bertambahnya daya kompresor sedangkan kinerja sistem semakin kecil dengan bertambahnya daya kompresor.

IV.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. Melakukan *facing* pada simulasi untuk mengetahui sifat partikel dalam menentukan kondisi keluar partikel.

4. Melakukan simulasi pengering semprot dengan menggunakan pemanas refrigerasi dan *dehumidifier* dengan variasi flow udara dari evaporator ditambah dengan flow udara sekitar.



DAFTAR PUSTAKA

Birchal V. S., dan Passos M. L. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 22, No. 02, pp. 293 - 302, April - June, 2005.

Supriono. (2003). Mengukur faktor faktor dalam proses pengeringan.

Treybal, R.E., *Mass Transfer Operations*, McGraw-Hill, 1981, Chapter: Humidification and Drying.

Modeling and simulation of milk emulsion drying in spray drying .

Arun S. Mujumdar dan Sakamon Devahastin .Chapter 1: Fundamental principle of drying.

Iva Filkova', Li Xin Huang, and Arun S. Mujumdar. Chapter 10: Industrial Spray Drying Systems.

Chakraverty, A., dan D. S. De. *Post Harvest Technology of Cereals and Pulses*, Oxford and IBH Publishing Co, 1981, Chapter 2 : Psychrometry

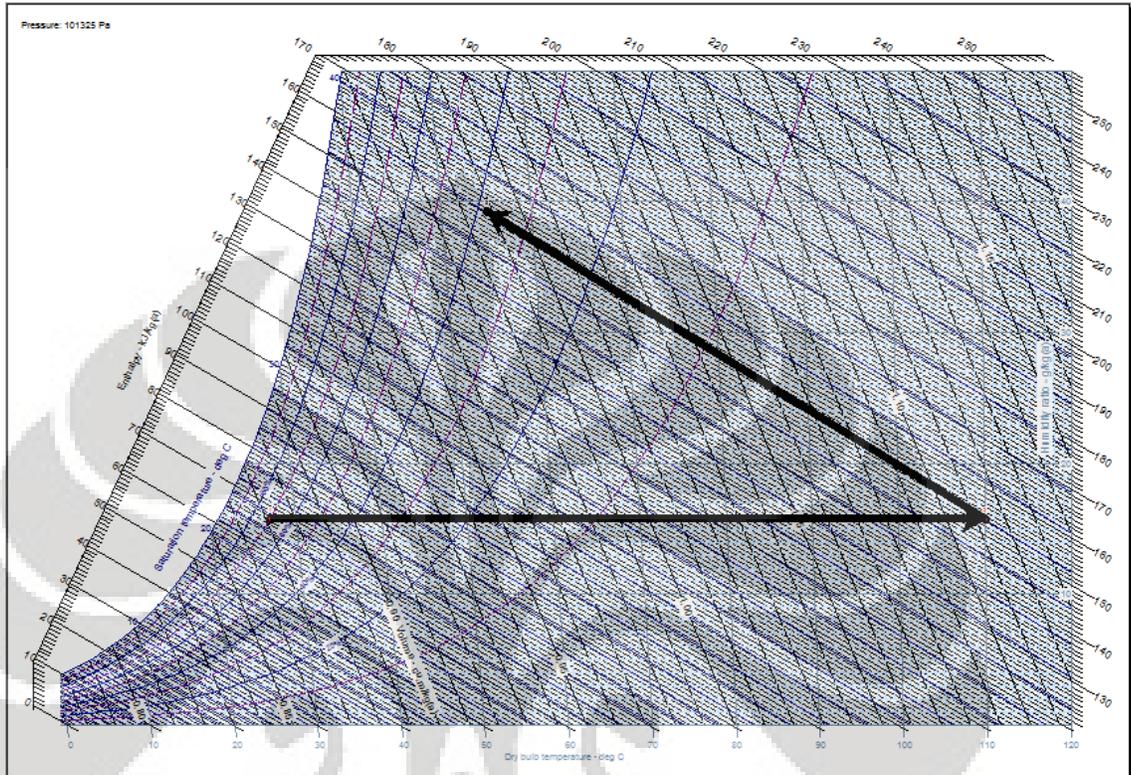
"Pengeringan Butiran Jagung Tipe *Deep-Bed*: Pemodelan dan Simulasi", *Prosiding Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo 1999*, Teknik Kimia ITB Bandung, hal. pp. VI.47-VI.54, (1999).

<http://www.niro.com/NIRO/CMSDoc.nsf/WebDoc/ndkk5hmc6zSprayDryersSprayDryers>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data psikrometrik udara menggunakan pemanas listrik

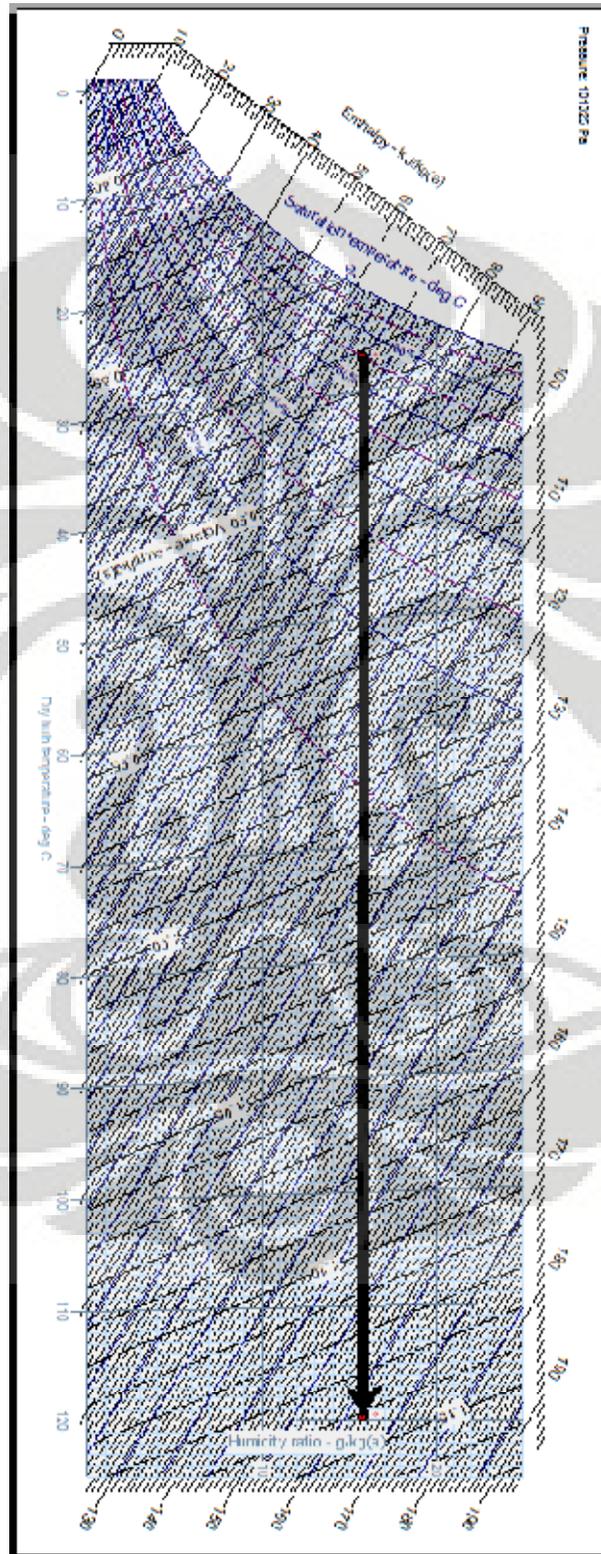
STATE POINT & PROCESS REPORT				
Report Date: Thursday, June 17, 2010				
Altitude: 0(Meters)				
Barometric Pressure: 760(mm Hg)				
Atmospheric Pressure: 101.325(kPa)				
State Label				
	Label Text	Direction	DB(deg C)	WB(deg C)
1	1	Above	27.0000	22.7753
2	2	Above	110.0000	39.0142
3	3	Above	55.0000	39.0140
(Cont.)				
	RH(%)	W(a/ka)	h(kJ/ka)	v(m3/ka)
1	70.0000	15.7838	67.4033	0.8716
2	1.7490	15.7840	153.6053	1.1131
3	37.9692	39.2675	157.4391	0.9879
(Cont.)				
	DP(deg C)	d(kg(a)/m3)	dm(kg(m)/m3)	
1	21.0638	1.1473	1.1655	
2	21.0639	0.8984	0.9126	
3	36.1309	1.0122	1.0520	
(Cont.)				
	AW(kg/m3)	vp(Pa)		
1	0.0181094	2507.6699		
2	0.0141802	2507.6972		
3	0.0397476	6017.0931		
State Point				
	Pt Label	DB(deg C)	WB(deg C)	RH(%)
1	1	27.0000	22.7753	70.0000
2	2	110.0000	39.0142	1.7490
3	3	55.0000	39.0140	37.9692

Lampiran 2. Diagram psikrometrik udara menggunakan pemanas listrik

Lampiran 3. Data psikrometrik udara menggunakan pemanas pompa kalor

STATE POINT & PROCESS REPORT				
Report Date: Wednesday, June 30, 2010				
Altitude: 0(Meters)				
Barometric Pressure: 760(mm Hg)				
Atmospheric Pressure: 101.325(kPa)				
State Label				
	Label Text	Direction	DB(deg C)	WB(deg C)
1	1	Above	27.0000	22.7753
2	2	Above	119.6500	40.3294
(Cont.)				
	RH(%)	W(g/kg)	h(kJ/kg)	v(m ³ /kg)
1	70.0000	15.7838	67.4033	0.8716
2	1.2759	15.7800	163.6608	1.1412
(Cont.)				
	DP(deg C)	d(kg(a)/m ³)	dm(kg(m)/m ³)	
1	21.0638	1.1473	1.1655	
2	21.0599	0.8763	0.8901	
(Cont.)				
	AW(kg/m ³)	vp(Pa)		
1	0.0181094	2507.6699		
2	0.0138279	2507.0774		
State Point				
	Pt Label	DB(deg C)	WB(deg C)	RH(%)
1	1	27.0000	22.7753	70.0000
2	2	119.6500	40.3294	1.2759
(Cont.)				
	W(g/kg)	h(kJ/kg)	v(m ³ /kg)	DP(deg C)
1	15.7838	67.4033	0.8716	21.0638
2	15.7800	163.6608	1.1412	21.0599
(Cont.)				
	d(kg(a)/m ³)	dm(kg(m)/m ³)	AW(kg/m ³)	
1	1.1473	1.1655	0.0181094	

Lampiran 4. Diagram psikrometrik udara menggunakan pemanas pompa kalor

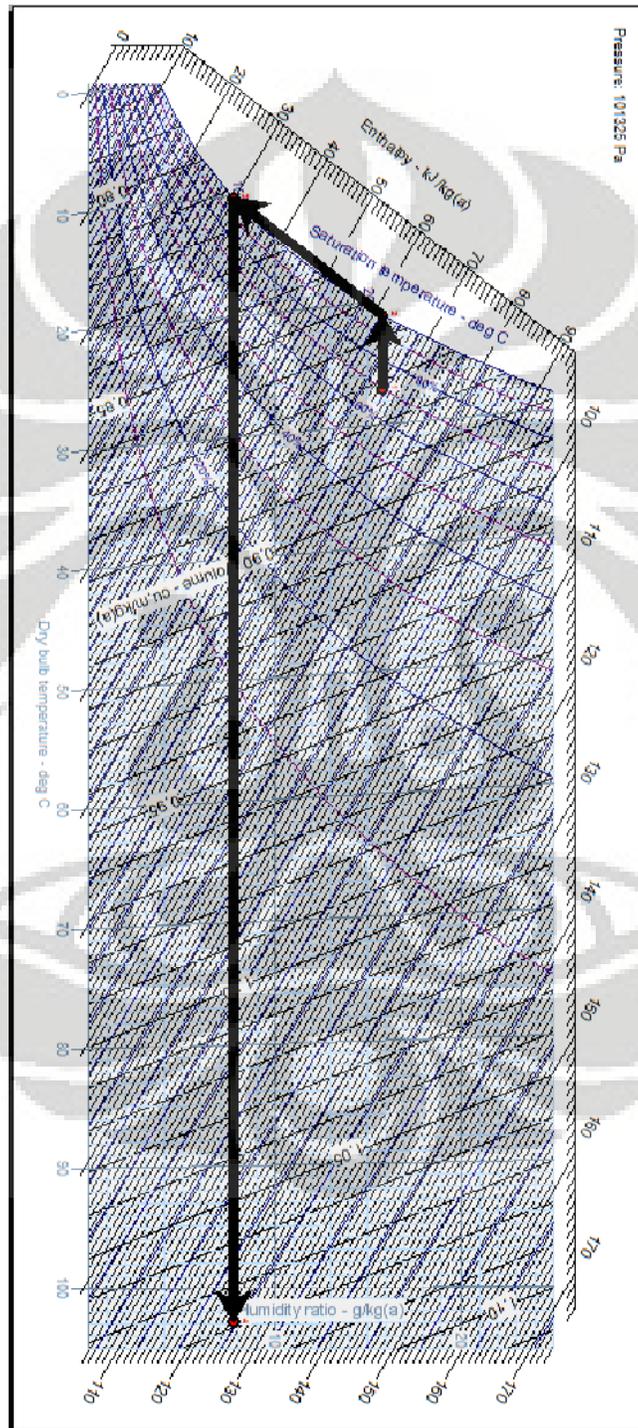


Universitas Indonesia

Lampiran 5. Data psikrometrik udara menggunakan pemanas refrigerasi dan dehumidifier

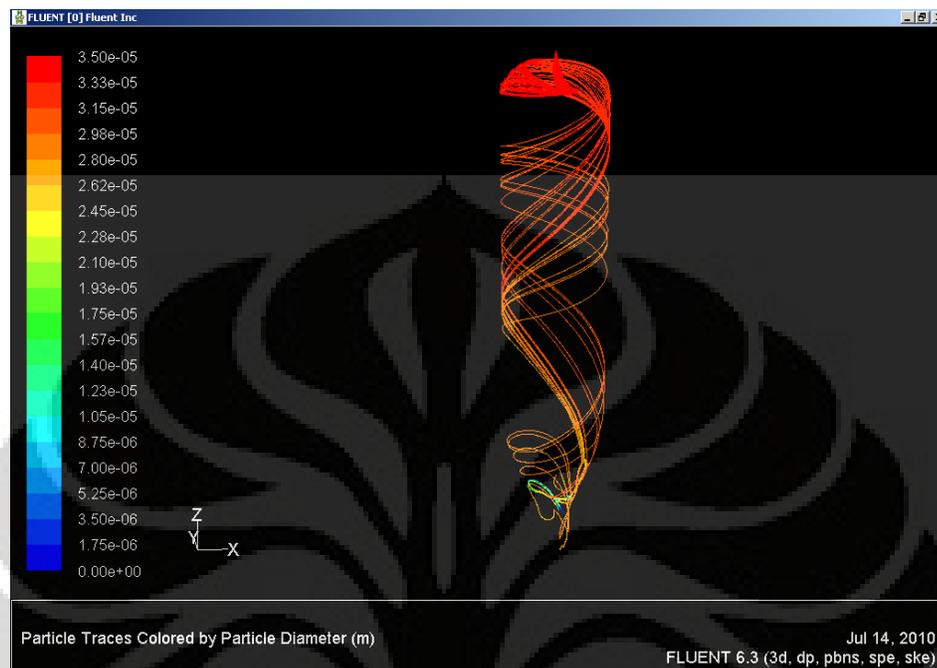
STATE POINT & PROCESS REPORT				
Report Date: Wednesday, June 30, 2010				
Altitude: 0(Meters)				
Barometric Pressure: 760(mm Hg)				
Atmospheric Pressure: 101.325(kPa)				
State Label				
	Label Text	Direction	DB(deg C)	WB(deg C)
1	1	Above	27.0000	22.7753
2	2	Above	21.0599	21.0599
3	3	Above	10.2000	10.2000
4	4	Above	102.8700	34.8994
(Cont.)				
	RH(%)	W(g/kg)	h(kJ/kg)	v(m ³ /kg)
1	70.0000	15.7838	67.4033	0.8716
2	100.0000	15.7800	61.2448	0.8543
3	100.0000	7.7651	29.8177	0.8124
4	1.1123	7.7600	124.5781	1.0787
(Cont.)				
	DP(deg C)	d(kg(a)/m ³)	dm(kg(m)/m ³)	
1	21.0638	1.1473	1.1655	
2	21.0599	1.1706	1.1890	
3	10.2000	1.2310	1.2405	
4	10.1897	0.9271	0.9343	
(Cont.)				
	AW(kg/m ³)	vp(Pa)		
1	0.0181094	2507.6699		
2	0.0184716	2507.0774		
3	0.0095588	1249.3959		
4	0.0071941	1248.5860		
State Point				
	Pt Label	DB(deg C)	WB(deg C)	RH(%)
1	1	27.0000	22.7753	70.0000

Lampiran 6. Diagram psikrometrik udara menggunakan pemanas refrigerasi dan dehumidifier

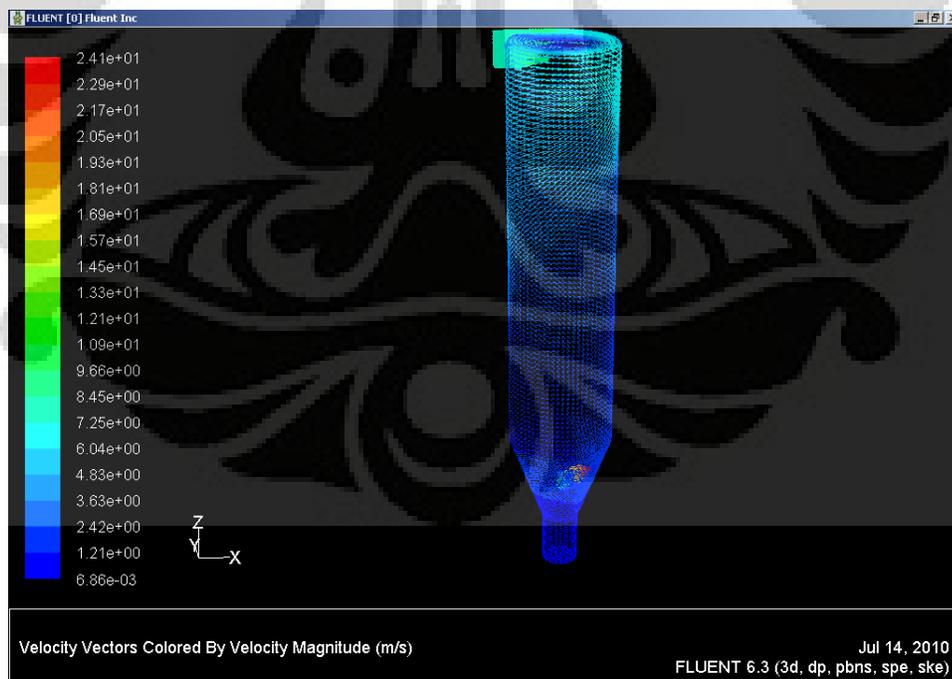


Universitas Indonesia

Lampiran 7. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 16.67 %

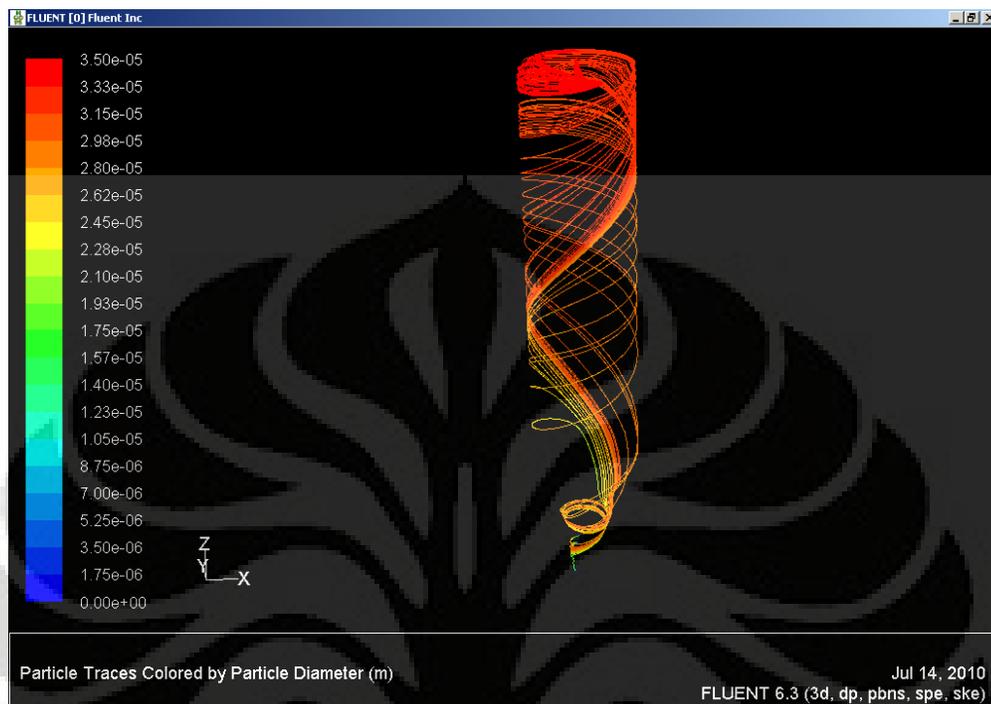


Perubahan diameter partikel pada flow udara 16.67 %

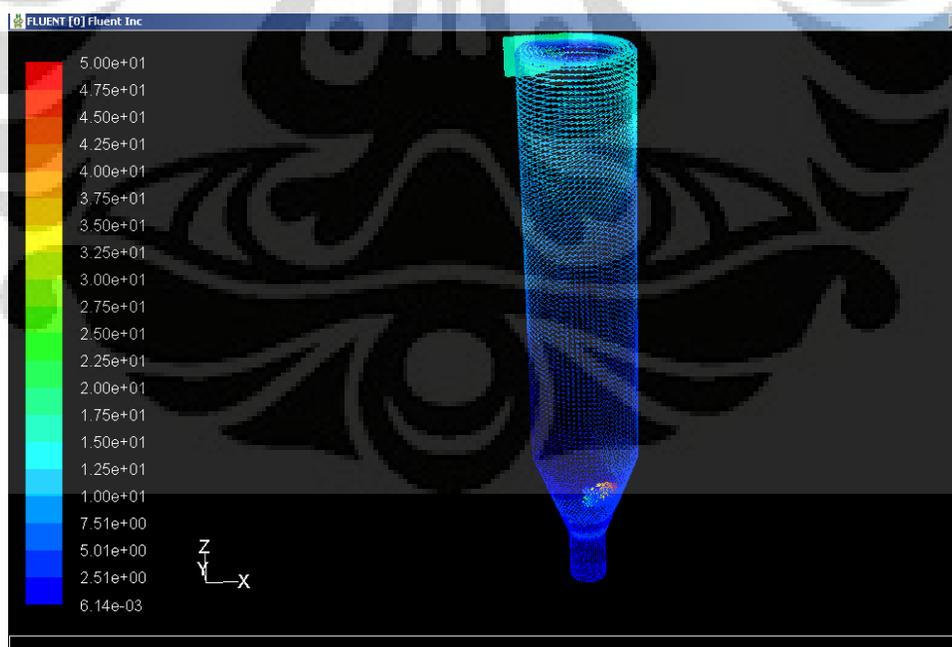


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 16.67 %

Lampiran 8. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 33.33 %

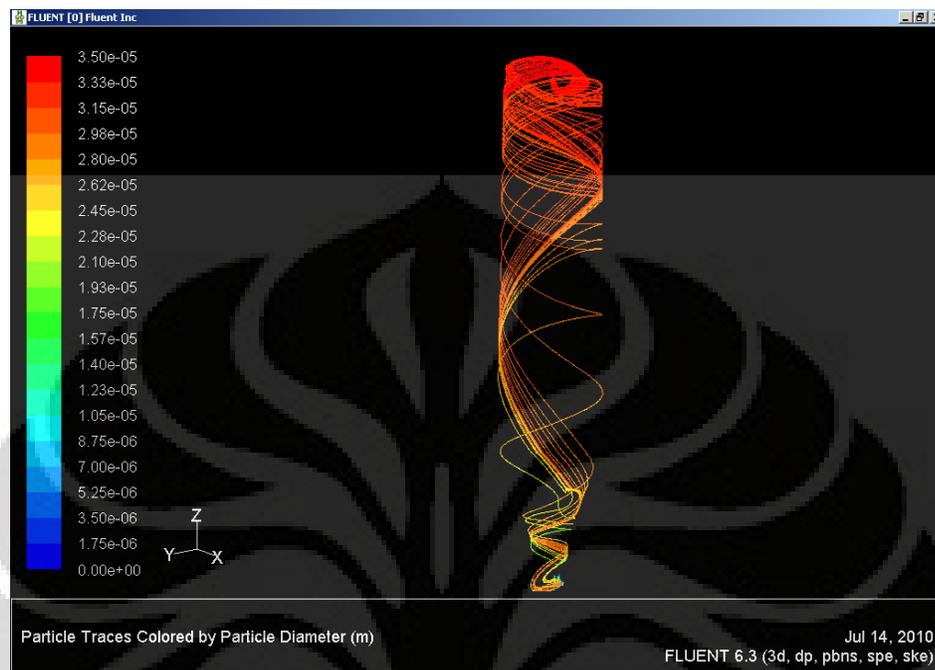


Perubahan diameter partikel pada flow udara 33.33 %

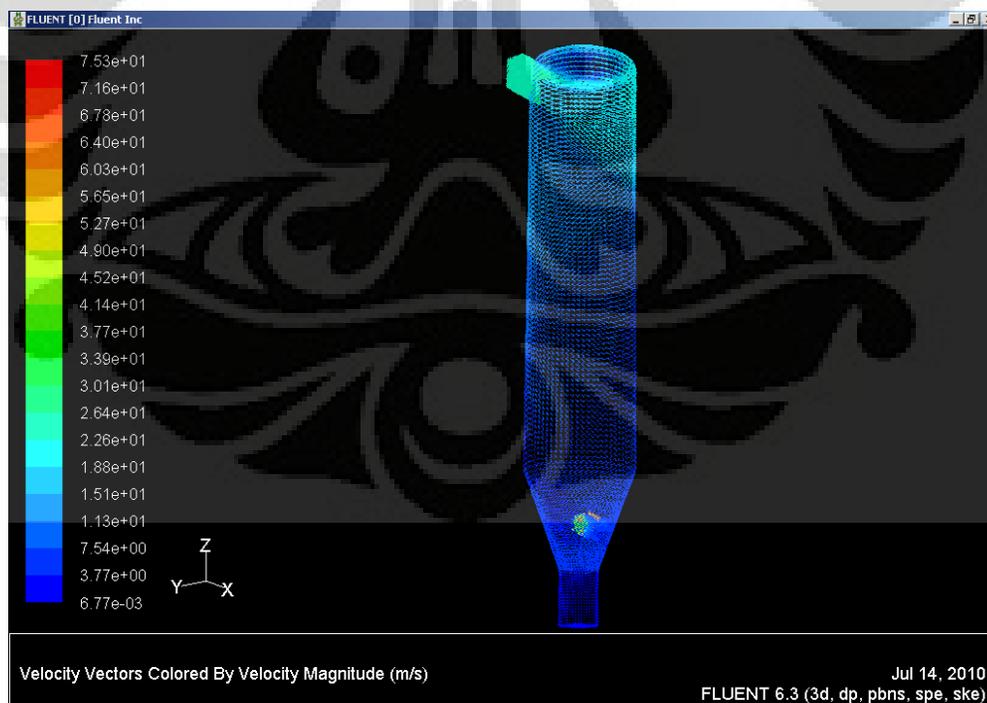


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 33.33 %

Lampiran 9. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 50 %



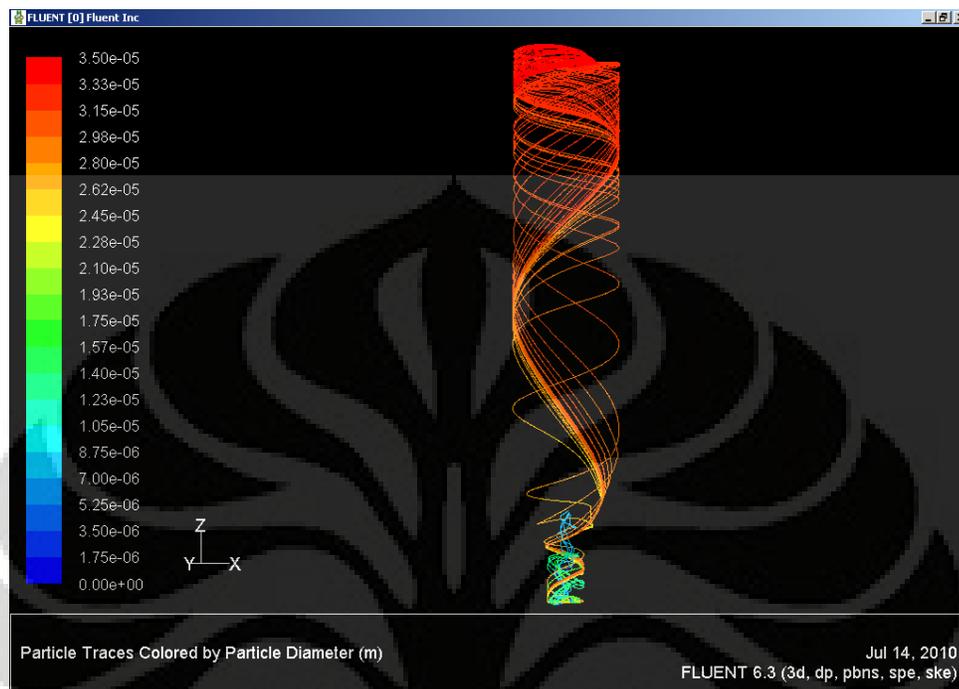
Perubahan diameter partikel pada flow udara 50 %



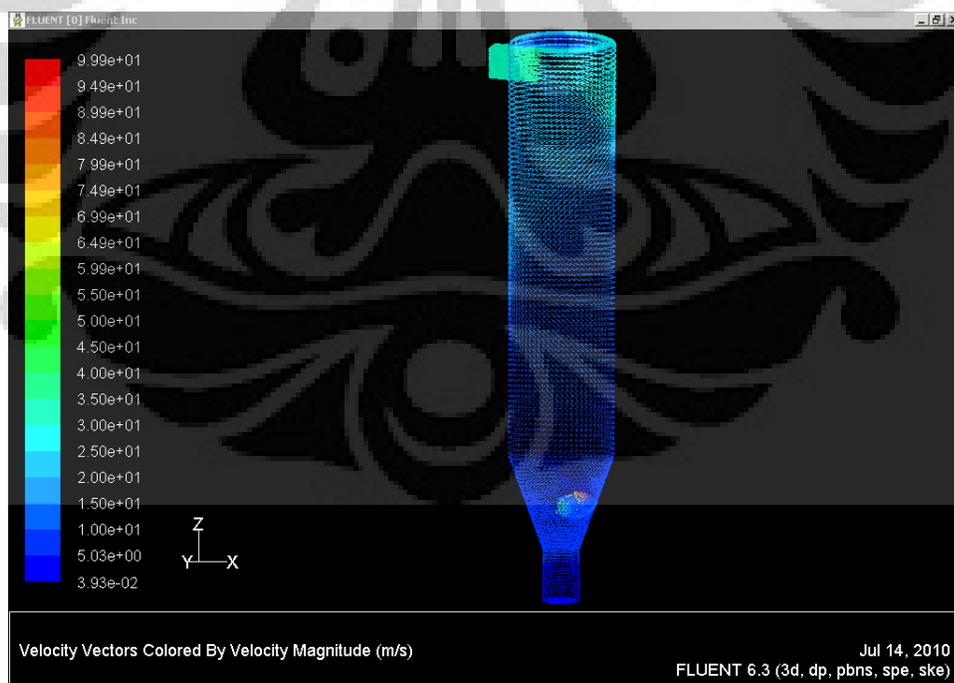
Distribusi kecepatan udara pada flow udara 50 %

Universitas Indonesia

Lampiran 10. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 66.67 %



Perubahan diameter partikel pada flow udara 66.67 %



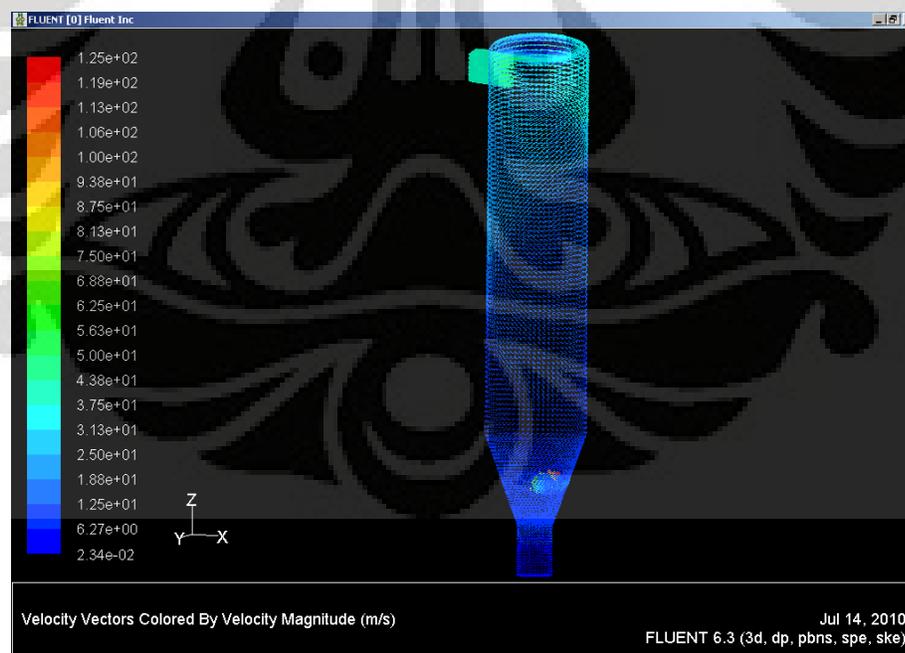
Distribusi kecepatan udara pada flow udara 66.67 %

Universitas Indonesia

Lampiran 11. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 83.33 %

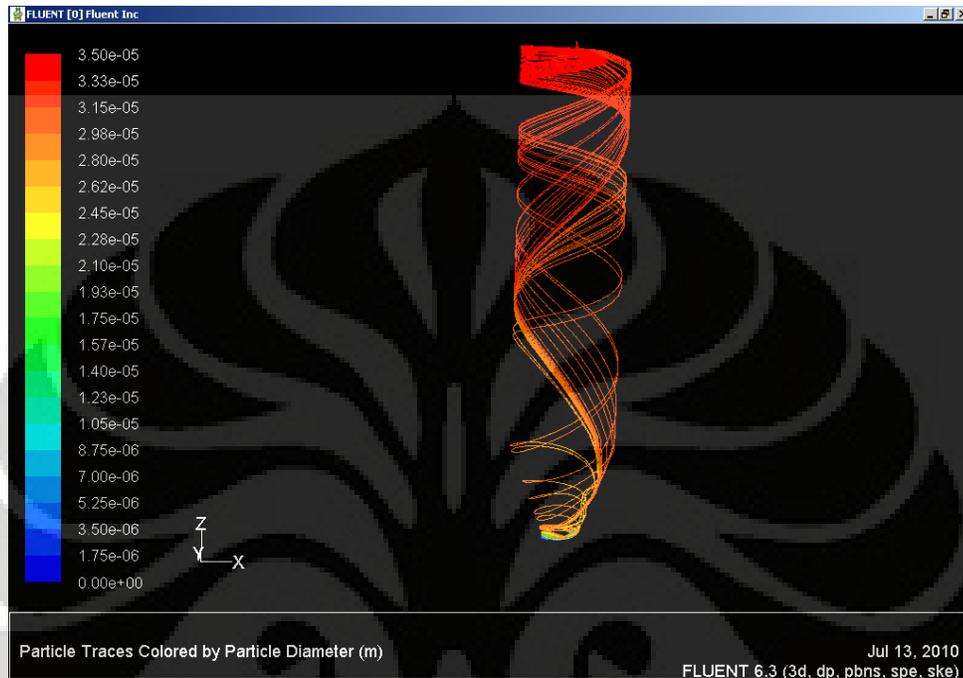


Perubahan diameter partikel pada flow udara 83.33 %

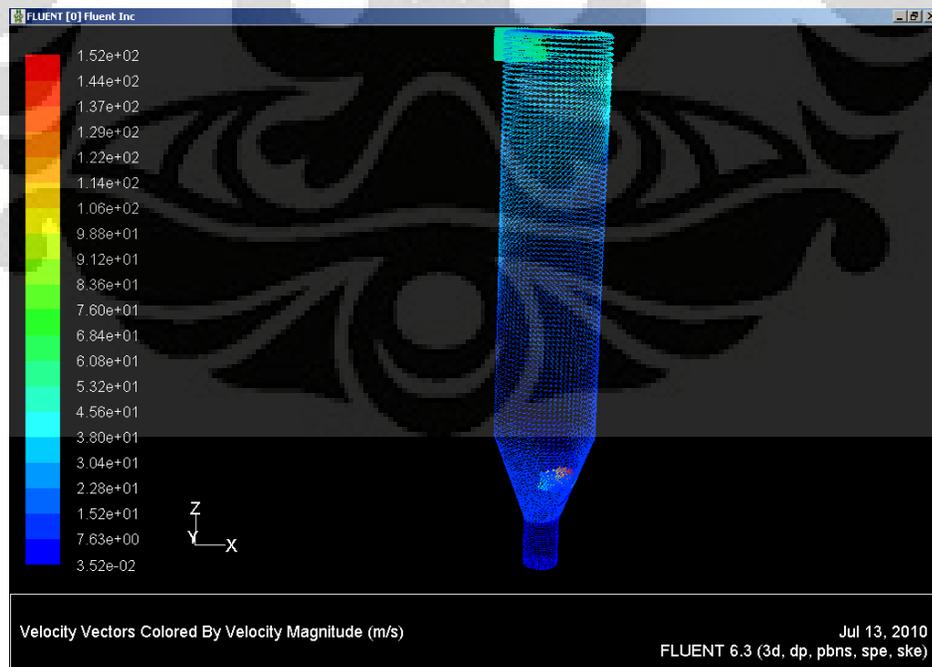


Distribusi kecepatan udara pada flow udara 83.33 %

Lampiran 12. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Kecepatan Udara pada Flow Udara 100 %

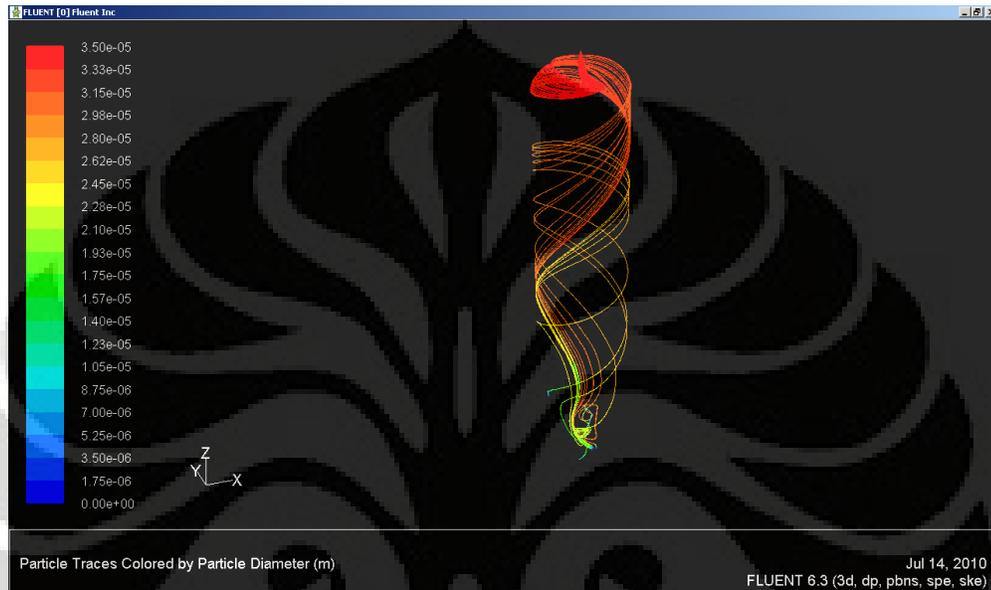


Perubahan diameter partikel pada flow udara 100 %



Distribusi kecepatan udara pada flow udara 100 %

Lampiran 13. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Suhu Udara pada Daya Kompresor 0.27 kW



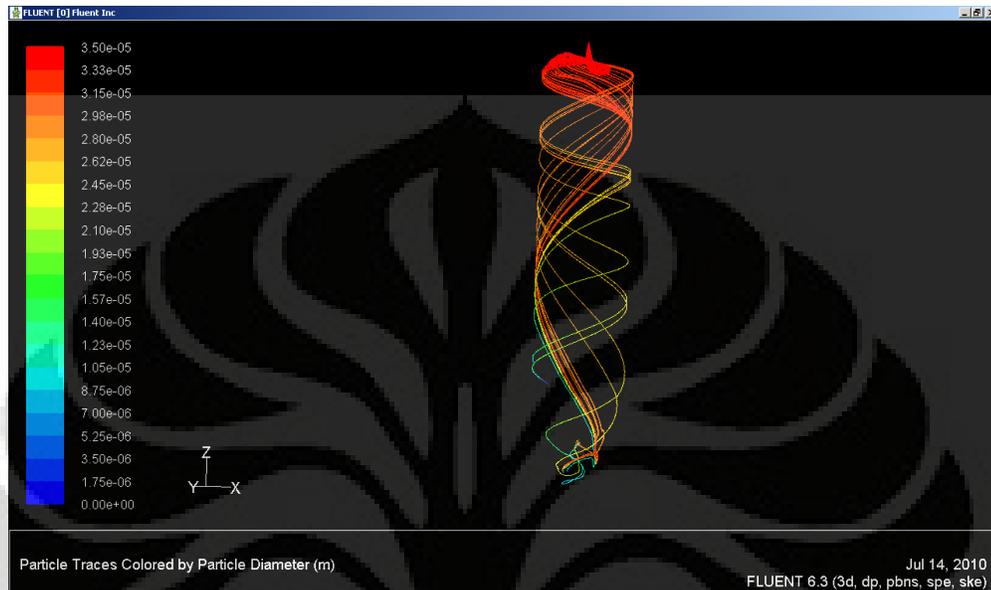
Perubahan diameter partikel pada daya kompresor 0.27kW



Distribusi suhu udara pada daya kompresor 0.27 kW

Universitas Indonesia

Lampiran 14. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Suhu Udara pada Daya Kompresor 0.405 kW

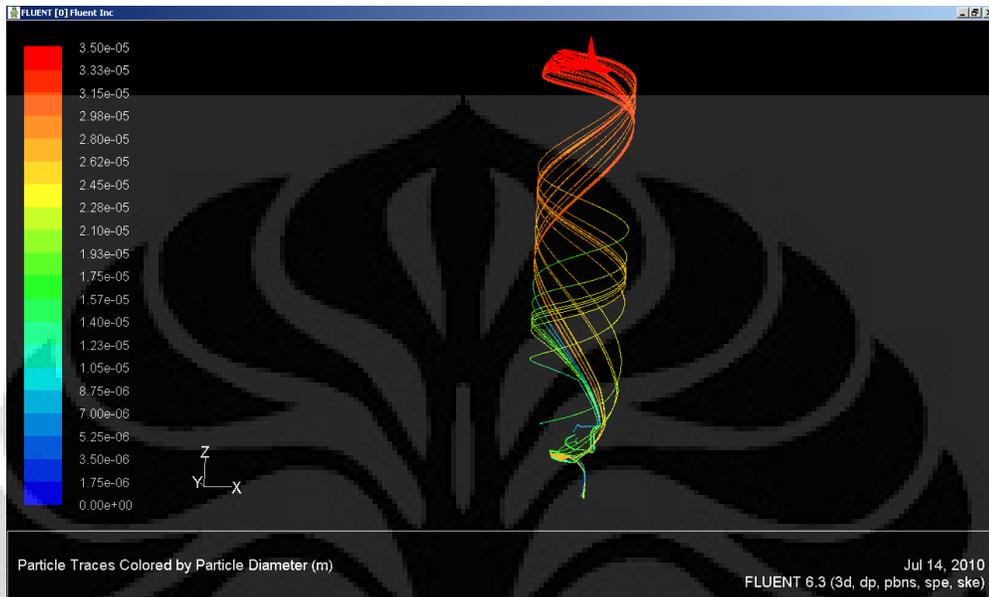


Perubahan diameter partikel pada daya kompresor 0.405 kW

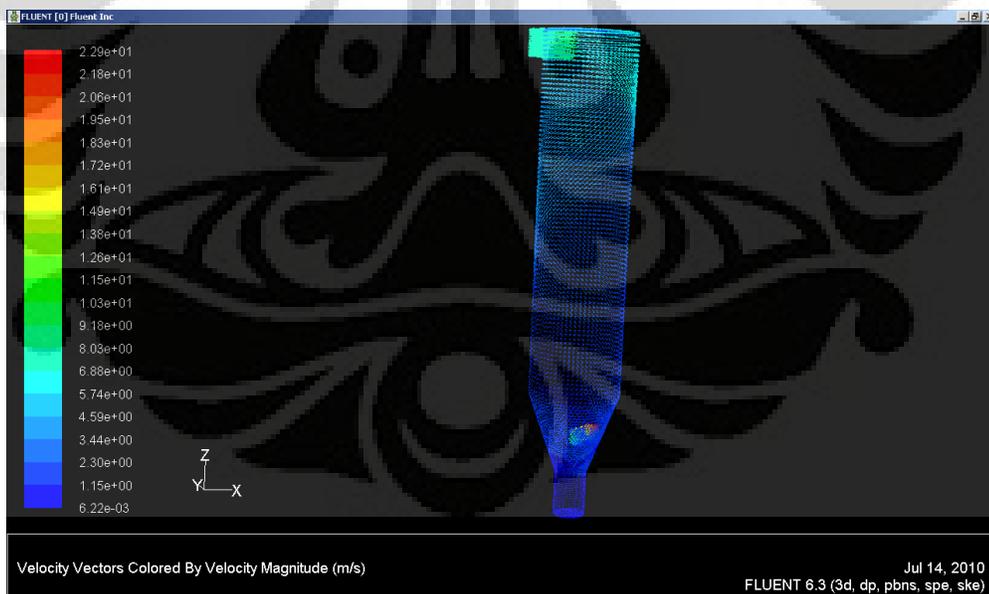


Distribusi suhu udara pada daya kompresor 0.405 kW

Lampiran 15. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Suhu Udara pada Daya Kompresor 0.54 kW

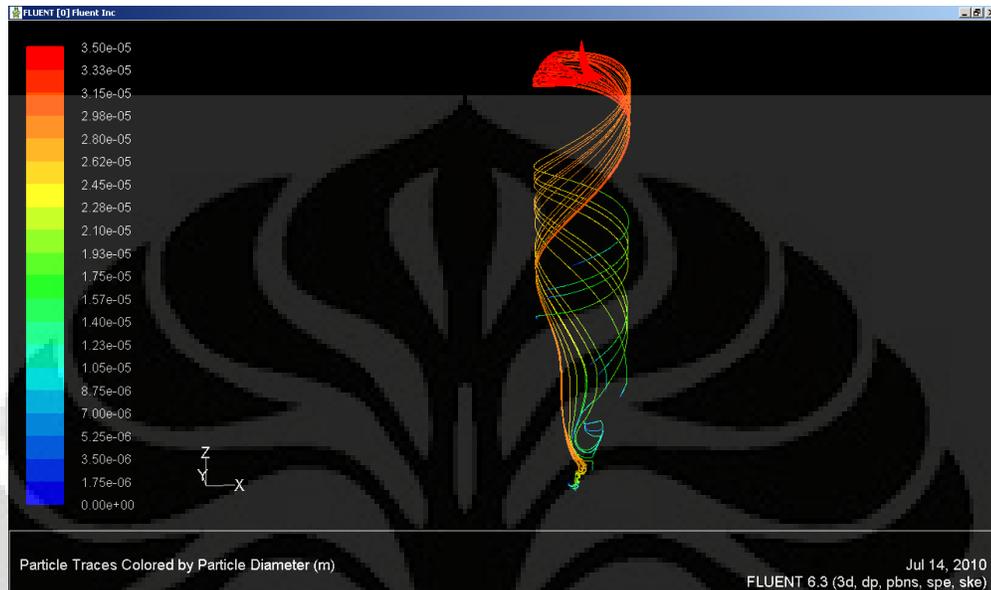


Perubahan diameter partikel pada daya kompresor 0.54kW



Distribusi suhu udara pada daya kompresor 0.54 kW

**Lampiran 16. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Suhu Udara pada
Daya Kompresor 0.675 kW**

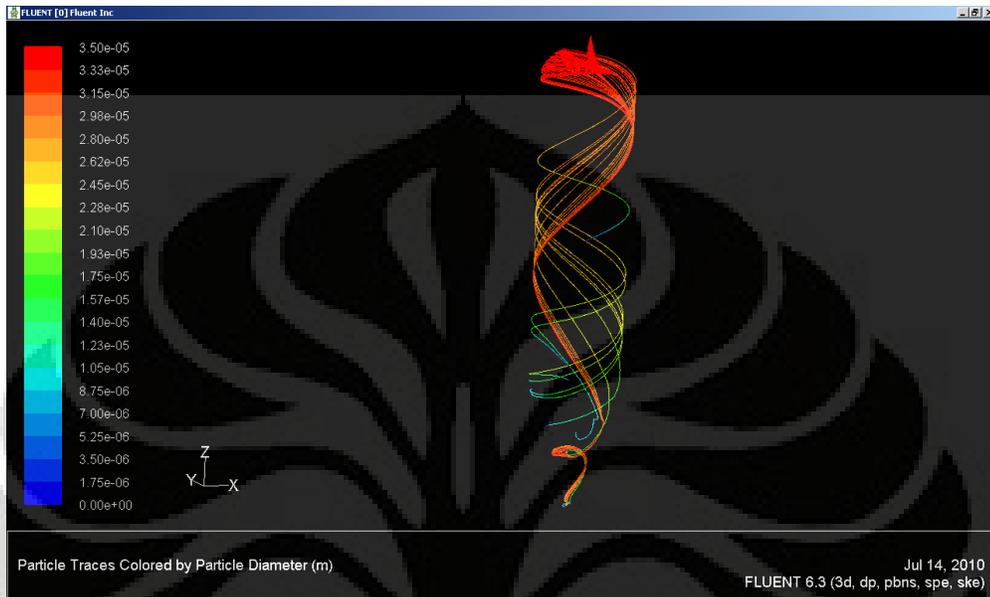


Perubahan diameter partikel pada daya kompresor 0.675 kW

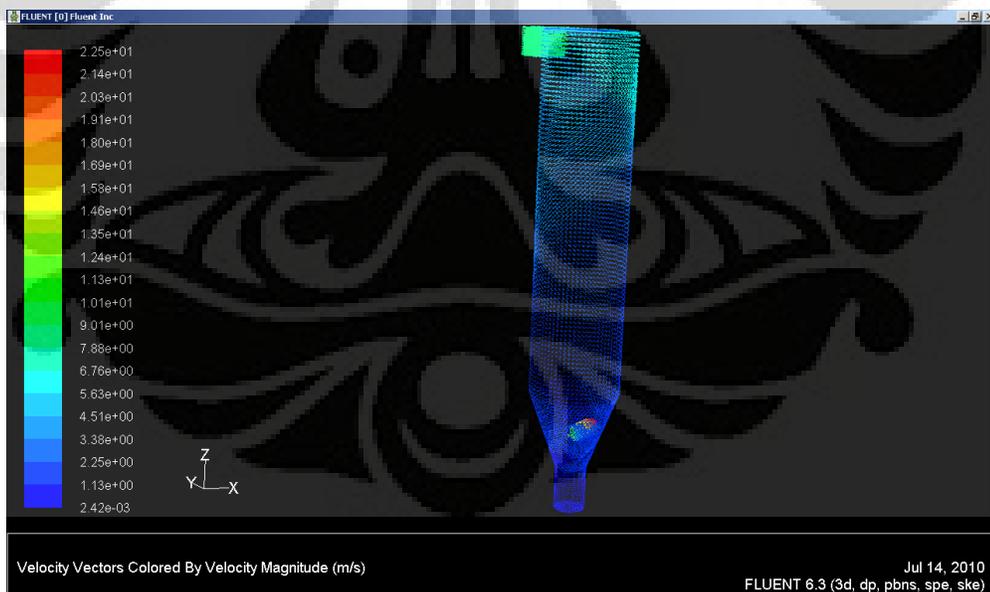


Distribusi suhu udara pada daya kompresor 0.675 kW

Lampiran 17. Perubahan Diameter Partikel dan Distribusi Suhu Udara pada Daya Kompresor 0.81kW



Perubahan diameter partikel pada daya kompresor 0.81 kW



Distribusi suhu udara pada daya kompresor 0.81 kW