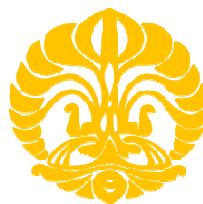


**PENGARUH KELEMBABAN, DEBIT UDARA DAN
DEBIT BAHAN TERHADAP KINERJA SPRAY DRYER**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister teknik

**IRWAN MUSTAJAB
0906657823**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2012**

i

Universitas indonesia

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Irwan Mustajab

NPM : 0906657823

Tanda Tangan : 

Tanggal : 11-01-2012


HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Irwan Mustajab
NPM : 0906657823
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Pengaruh kelembaban, debit udara dan debit bahan terhadap kinerja spray dryer

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Dr. Ir. Budihardjo, Dipl. Ing ()

Penguji : Dr. Agus Pamitran, ST., Meng ()

Penguji : Ir. Imansyah Ibnu Hakim, Meng ()

Ditetapkan di : Departemen Teknik Mesin

Tanggal : 27- 1- 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini tepat pada waktunya. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam penyusunan Tesis ini banyak kesulitan yang dihadapi, Tetapi berkat bantuan dari berbagai pihak, penyusunan tesis ini dapat terselesaikan tepat pada waktunya. Oleh karena itu melalui kesempatan ini penulis mengungkapkan rasa terima kasih yang setulus-tulusnya kepada:

1. Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, MT selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi arahan, bimbingan dan persetujuan sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik;
2. Seluruh staf pengajar Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan dan mengajarkan ilmunya.
3. Teman satu bimbingan Maulana, Pandi dan Nurkholis atas kebersamaannya dalam menghadapi semua kendala penyelesaian tesis ini
4. Ayah penulis Aom Budiman dan Ibu Oneng Herlina, istri tercinta dan anak2, beserta adik-adiku atas segala dukungan dan doanya, penulis ucapkan terimakasih banyak
5. Seluruh staff laboratorium DTM, Mas Udi, Pak Syarif, Mas Nurul, Pak Yasin yang telah memberikan keleluasaan memakai fasilitas laboratorium.
6. Teman-teman seperjuangan kelas magister Teknik Mesin UI angkatan 2009 atas kebersamaan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini belum sempurna. Oleh karena itu, penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Semoga Tesis ini dapat memberikan banyak manfaat dan wawasan khususnya bagi penulis dan pembaca pada umumnya.

Depok, Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Irwan Mustajab
NPM : 0906657823
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

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:

**PENGARUH KELEMBABAN, DEBIT UDARA DAN
DEBIT BAHAN TERHADAP KINERJA SPRAY DRYER**

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 : Januari 2012

Yang menyatakan,



Irwan Mustajab

ABSTRAK

Nama : Irwan Mustajab
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Pengaruh kelembaban & Debit Udara Dehumifier Terhadap kinerja Spray Dryer

Spray dryer adalah salah satu alat yang digunakan untuk memperpanjang umur simpan bahan, baik produk makanan atau produk farmasi yang sebagian besar materi penyusunnya sensitive terhadap panas. Pada penelitian awal untuk belimbing, *spray dryer* tanpa sistem refrigerasi evaporator dan kondensor membutuhkan suhu udara pengering 110°C , temperature tersebut dapat merusak vitamin C pada bahan sampai 50%, sehingga nilai gizi produk menurun.

Tingginya temperature udara pengering yang mencapai 110°C , karena kondisi udara depok memiliki kelembaban yang tinggi sekitar 85 %. Untuk mengatasinya maka didesain *spray dryer* dengan memanfaatkan evaporator dan kondensor suatu sistem refrigerasi, dengan harapan bisa menurunkan kelembaban tersebut dengan mengalirkan udara lingkungan ke sistem refrigerasi evaporator dan kondensor, sehingga udara yang memasuki *spray dryer* relative sudah kering.

Evaporator berfungsi sebagai dehumidifier sedangkan kondensor berfungsi sebagai heater, sehingga panas yang diberikan oleh udara di evaporator akan diambil kembali oleh udara tersebut. Berdasarkan riset terdahulu (simulasi), maka penambahan komponen evaporator dan kondensor pada *spray dryer* akan menghasilkan udara pengering dengan kelembaban spesifik 0.0066 (berasal dari udara dengan kelembaban spesifik 0,0182). Dengan demikian pengeringan bisa bekerja dengan lebih cepat dan pada temperature yang rendah sehingga produk yang dihasilkan akan berbentuk serbuk kering atau caramel dengan vitamin C dan gizi yang lainnya tidak terlalu rusak karena pemanasan.

Kata kunci:

Spray dryer, siklon separator, pemanas listrik, *dehumidifier*, *heat pump*

ABSTRACT

Name : Irwan Mustajab
Study Program : Teknik Mesin
Title : Influence of Air Humidity, Mass Flow of air and Mass flow of material on Spray Dryer Performance

Spray dryer is one of the devices can be processed to make material organic more longer for kept, both the food product or pharmacy product which is most of the component sensitive with heating process. From the research previously for fruit product “belimbing”, Spray dryer without refrigeration system need temperature for drying 110°C , with that high temperature can be damage vitamin content around 50%, so the gizi product decreased.

The reason high temperature for drying 110°C , because of the humidity in depok so high around 85%, to handle that need to design Spray dryer with using evaporator & condenser of refrigeration system, with goal can be decreased the humidity with flow the environment air to that refrigeration system, so the air which entering the Spray dryer has been dried.

The evaporator working as dehumidifier and condenser as heater, so the heat given by air in evaporator will be used again. Based on the research previously from simulation, the effect of adding component evaporator & condenser on Spray dryer will produce dry air with the specific humidity 0,0066 (come from air specific humidity 0,0182). So then the spray dryer can work more fast & low temperature make the product as dry dust or caramel with the vitamin C & other organic material In good condition, not damage because of drying process with low temperature

Keywords:
Spray dryer, cyclone separator, Electric Heater, dehumidifier, heat pump

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR NOTASI	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pengertian Pengerinan	5
2.2 Prinsip Dasar Pengerinan	5
2.3 Laju Pengerinan	7
2.4 Karakteristik Hidratasi (Penguapan Air)	8
2.4.1 Kadar Air	9
2.4.2 Aktivitas Air	11
2.5 Konsep Dasar <i>Spray drying</i>	12
2.5.1 Prinsip Kerja <i>Spray Drying</i>	12
2.5.2 Komponen komponen <i>Spray Drying</i>	13
2.5.3 Penurunan Tekanan (Pressure Drop) dan Laju aliran	21
2.6 Proses Pengerinan	23
2.7 Metode Pengerinan <i>Spray Dryer</i>	25
2.8 Pengerinan Sistem Pengatur Udara.....	30
2.8.1 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap	32
2.8.2 Udara Kering dan Udara Atmosfer	33
2.8.3 Kelembaban Udara Spesifik dan Relatif Pengerinan	34
2.8.3 Temperatur Titik Embun (Dew-point Temperature).....	35
2.8.5 Pengukuran Kelembaban.....	35
2.8.6 Grafik Kelembaban (Psychrometric Chart)	36
2.8.7 Pendinginan dengan Penurunan Kelembaban.....	38
2.9 Heat pump.....	39
2.10 Flow Katup Ekspansi	42
2.11 Perhitungan Laju Aliran Udara	43
3. METODOLOGI PENELITIAN	46

3.1 Metode Penelitian	46
3.2 Alur Kerangka Penelitian.....	46
3.3 Skema Pengering Semprot	47
3.4 Cara Pengambilan data dan Hasil Eksperimen Pengering Semprot ..	49
3.5 Deskripsi Sistem Alat Pengujian.....	50
3.5.1 Komponen Sistem	50
3.6 Bahan Uji.....	55
3.7 Variasi Parameter Pengeringan	56
3.8 Menghitung Kelembaban Udara Keluaran Evaporator.....	56
3.9 Proses Pengkondisian Udara	57
3.10 Contoh Perhitungan Dari Data Ekperimen.....	59
3.11 Perhitungan Kinerja Spray Dryer.....	61
3.12 Data Pengujian Spray Dryer	62
4. ANALISA DATA HASIL EKSPERIMEN	63
4.1 Data Hasil Pengujian	63
4.2 Temperatur Minimum Kering Berdasarkan ω Udara Konstan	63
4.2.1 Analisa Temperatur Minimum Kering Berdasarkan Kelembaban ω	63
.....	63
4.2.2 Analisa Temperatur Minimum Kering ω Konstan Terhadap	64
Variable Bebas	64
4.3 Temperatur Minimum Kering Berdasarkan m Udara Konstan	64
4.3.1 Temperatur Minimum Kering Berdasarkan m Udara	64
4.3.2 Temperatur Minimum Kering Berdasarkan m Udara Konstan	65
Terhadap Variable Bebas	65
4.4 Kinerja Sistem Berdasarkan m Udara Konstan.....	65
4.4.1 Perbandingan Kinerja Spray dryer Dehumidifier Berdasarkan m	66
Udara	66
4.4.2 Kinerja Spray Dryer Pada m Udara Konstan Terhadap Variable	66
Bebas.....	66
5. KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pergerakan Air di Dalam Celah Kapiler Bahan	6
Gambar 2.2	Penyerapan Suhu oleh Bahan	7
Gambar 2.3	Aktifitas air vs moisture content berbagai macam jenis makanan	11
Gambar 2.4	Bentuk Nozel.....	14
Gambar 2.5	Tipe <i>Pneumatic Two-Fluid Nozzles</i>	15
Gambar 2.6	Skema Drying Chamber	16
Gambar 2.7	Bentuk Drying Chamber	16
Gambar 2.8	Bentuk Cyclone Separator.....	17
Gambar 2.9	Skema Proses Cyclone Separator	18
Gambar 2.10	Masukan Inlet Siklon	19
Gambar 2.11	Bentuk Downcomer	20
Gambar 2.12	Diagram Spray Drying	21
Gambar 2.13	Grafik Periode dari Pengeringan	24
Gambar 2.14	Skema Pengering Semprot	26
Gambar 2.15	Siklus Refrigerasi	31
Gambar 2.16	Siklus Refrigerasi Kompresi Uap.....	32
Gambar 2.17	Skema Thermometer Wetbulb	35
Gambar 2.18	Diagram Psikometric.....	37
Gambar 2.19	Diagram Alir Kerja Refrijeran Pada Sistem Heat Pump.....	39
Gambar 2.20	P - h Diagram Refrijeran	41
Gambar 2.21	Valve Needle.....	42
Gambar 2.22	Koefisien Buang Untuk <i>Orifice</i> Konsentrik Dalam Pipa.....	44
Gambar 3.1	Skema <i>Spray Dryer</i>	47
Gambar 3.2	Rangkaian <i>Spray Dryer</i>	50
Gambar 3.3	<i>Blower</i> dan <i>Inverter</i>	50
Gambar 3.4	<i>Orifice</i>	51
Gambar 3.5	Manometer Air	51
Gambar 3.6	(a) Kondensor ,(b) Evaporator dan (c) Kompresor	52
Gambar 3.7	(a) Ruang Pengeringan dan <i>cyclone</i> (b) Fin Heating Element...	53
Gambar 3.8	<i>Pressure Regulator</i>	53
Gambar 3.9	Pompa Booster	54
Gambar 3.10	Pompa Peristaltik.....	54
Gambar 3.11	<i>Pneumatic Nozzle</i>	55
Gambar 3.12	Bejana Pengukur Fluida	55
Gambar 3.13	Kontak Panel dan Termometer Digital	56
Gambar 3.14	Termometer	56
Gambar 3.15	Diagram Psikrometrik	57
Gambar 3.16	Proses Pemanasan Udara pada Tipe Pemanas Listrik.....	58
Gambar 3.17	Proses Dehumidifikasi dan Pemanasan Udara	59
Gambar 3.18	Data Hasil Pengujian <i>Spray Dryer</i>	62
Gambar 4.1	Grafik Temperatur minimum kering berdasarkan ω udara konstan	63
Gambar 4.2	Grafik Temperatur minimum kering berdasarkan \dot{m} udara konstan	64
Gambar 4.3	Kinerja sistem Berdasarkan \dot{m} Udara Konstan.....	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Eksperimen.....	70
Lampiran 2 Temperatur Minimum Kering \dot{m} Udara = 0.011880 m ³ /s	80
Lampiran 3 Temperatur Minimum Kering \dot{m} Udara = 0.01524 m ³ /s ..	81
Lampiran 4 Temperatur Minimum Kering \dot{m} Udara = 0.01927 m ³ /s ..	82
Lampiran 5 Temperatur Minimum Kering \dot{m} Udara = 0.02155 m ³ /s ..	83
Lampiran 6 Kinerja Sistem \dot{m} Udara = 0.011880 m ³ /s.....	84
Lampiran 7 Kinerja Sistem \dot{m} Udara = 0.01927 m ³ /s.....	85
Lampiran 8 Kinerja Sistem \dot{m} Udara = 0.02155 m ³ /s	86
Lampiran 9 Kinerja Sistem \dot{m} Udara = 0.01524 m ³ /s	87
Lampiran 10 Minimum Kering ω = 0.0067 kg/kg da.....	88
Lampiran 11 Minimum Kering ω = 0.0082 kg/kg da.....	88
Lampiran 12 Minimum Kering ω = 0.0106 kg/kg da	89
Lampiran 13 Minimum Kering ω = 0.0138 kg/kg da.....	89
Lampiran 14 Minimum Kering ω = 0.0187 kg/kg da.....	90

DAFTAR NOTASI

Temperatur dry bulb	= T_{db}	($^{\circ}\text{C}$)
Temperatur Lingkungan	= T_{ling}	($^{\circ}\text{C}$)
Kuantitas Panas Eksperimen	= Q_{eks}	(kJ/kg)
Kuantitas Panas Eksperimen	= Q_{sim}	(kJ/kg)
Dipanaskan Hingga	= T_{in}	($^{\circ}\text{C}$)
Laju Aliran Udara	= \dot{m}_{ud}	($\text{m}^3 \text{ jam}^{-1}$)
Laju Bahan	= \dot{m}_{bhn}	($\text{m}^3 \text{ jam}^{-1}$)
Kalor Jenis Udara Kering	= $C_{p_{ud}}$	($\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Temperatur Dry Bulb	= T_{db}	($^{\circ}\text{C}$)
RH Udara Masuk	= w	(%)
Dipanaskan Hingga	= T_{in}	($^{\circ}\text{C}$)
Laju Aliran Udara	= \dot{m}_{ud}	($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Humidity Volume	= v_p	($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$)
Humidity Ratio	= H	(kg air/kg udara)
Humid Heat	= H_s	(kkal/kg $^{\circ}\text{C}$)
kalor Laten Penguapan	= λ	(kJ/kg)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Spray dryer merupakan salah satu alat pengering yang digunakan untuk memperpanjang umur simpan bahan, baik produk makanan atau produk farmasi yang sebagian besar materi penyusunnya sensitive terhadap panas. Pada penelitian sebelumnya *spray dryer* tanpa sistem refrigerasi evaporator dan kondensor membutuhkan suhu udara pengering 110°C , temperature tersebut dapat merusak vitamin C pada bahan sampai 50%, sehingga nilai gizi produk menurun.

Tingginya temperature udara pengering yang mencapai 110°C , karena kondisi udara depok memiliki kelembaban yang tinggi sekitar 85 %. Untuk mengatasinya maka didesain *spray dryer* dengan memanfaatkan evaporator dan kondensor suatu sistem refrigerasi, dengan harapan bisa menurunkan kelembaban tersebut dengan mengalirkan udara lingkungan ke sistem refrigerasi evaporator dan kondensor, sehingga udara yang memasuki *spray dryer* relative sudah kering.

Karakter Evaporator sebagai pendingin udara juga menurunkan kelembaban berfungsi dehumidifier sedangkan kondensor yg membuang panas dari fluida refrigerant ke udara lingkungan berfungsi sebagai heater, sehingga panas yang diberikan oleh udara di evaporator akan diambil kembali oleh udara tersebut. Berdasarkan riset terdahulu (simulasi), maka penambahan komponen evaporator dan kondensor pada *spray dryer* akan menghasilkan udara pengering dengan kelembaban spesifik 0.0066 (berasal dari udara dengan kelembaban spesifik 0,0182). Dengan demikian pengeringan bisa bekerja dengan lebih cepat dan pada temperature yang rendah sehingga produk yang dihasilkan akan berbentuk serbuk kering atau caramel dengan vitamin C dan gizi yang lainnya tidak terlalu rusak karena pemanasan.

1.2 Perumusan Masalah

berdasarkan latar belakang diatas, penulis melakukan penelitian yang bertujuan mendapatkan kinerja alat spray dryer, yang sudah disimulasikan pada tahap perancangan terdahulu, diharapkan bias mendapatkan karakteristik alat spray dryer dengan memanfaatkan system refrigerasi, sebagai dehumidifier sekaligus heat pump untuk memanfaatkan panas buangnya. Hasil data eksperimen yang didapat bisa mencerminkan variasi laju bahan yang dikombinasikan dengan kecepatan udara pengering, untuk mendapatkan variasi temperature panas pengeringan bahan pada suhu rendah, sesuai dengan harapan penelitian yang menghasilkan alat spray dryer performance tinggi pada temperature pengeringan yang rendah

1.3 Tujuan Penelitian

1. Meneliti pengaruh kelembaban & kecepatan udara masuk terhadap penguapan tetesan air yang disemprotkan didalam silinder vertical, sehingga didapat suhu minimum pengeringan
2. Mengetahui karakteristik dan Kinerja pengering semprot dari variasi data input parameter nya adalah sebagai berikut:
 - Flow Udara : 0.01180; 0.01524; 0.1927; 0.02155 (m³/s)
 - Laju aliran massa bahan : 0,12; 0,21; 0,27; 0,39 (kg/jam)
 - Temperatur udara keluar evaporator : 8°; 11°; 15°; 19° ; 24° (Celcius)

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, dibatasi pada:

1. variasi laju bahan masuk dan suhu udara panas pada pengering semprot
2. Jenis nosel yang digunakan berkaitan dengan desain ruang pengering cyclone separator
3. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan air.
4. Evaporator dan condenser mempengaruhi temperature, yang diharapkan tidak melebihi batas kerusakan vitamin dan kandungan bermanfaat bahan tersebut, ketika proses pengeringan dengan suhu relative tinggi

1.5 Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini, metode untuk mengumpulkan sumber data dan informasi adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur.

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

2. Pengambilan data.

Data yang diambil dari eksperimen ini adalah laju bahan, temperatur udara kering, laju aliran udara & data suhu udara kering suhu udara basah ketika masuk dan keluar ruang pengering utama.

3. Pengolahan dan penyusunan data

Data yang didapat selanjutnya diolah mengikuti algoritma perhitungan kinerja system secara keseluruhan, selanjutnya hasil pengolahan data disusun secara sistematis, sehingga memudahkan dalam perhitungan & analisisnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pembahasan dan pemahaman materi atau pokok bahasan dari karya tulis ini, maka penulis membuat perumusan mengenai isi setiap bab secara berurutan. Adapun sistematika penulisannya sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

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

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori-teori pendukung yang menjelaskan tentang konsep pengeringan dan karakteristik pengering semprot.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

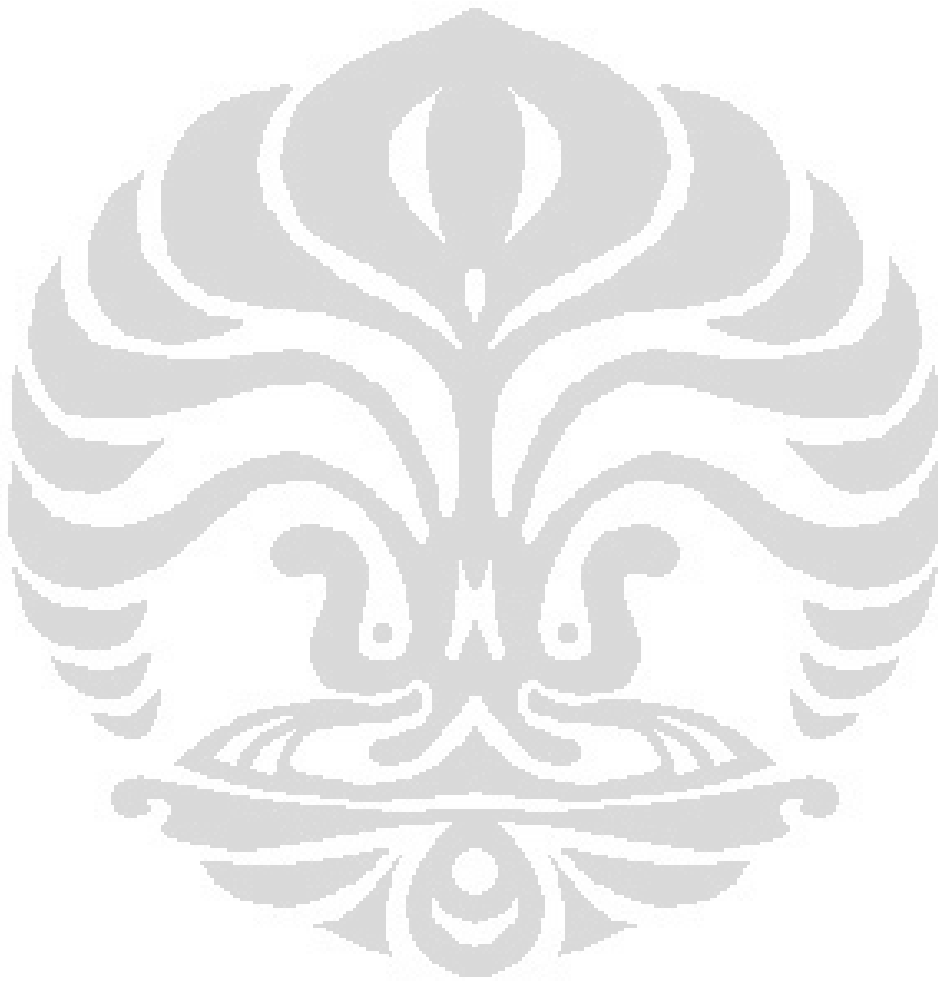
Berisi tentang deskripsi tahapan-tahapan yang harus dilakukan selama kegiatan penelitian, peralatan dan alat ukur yang diperlukan selama penelitian dan proses pengambilan data.

BAB 4 ANALISA HASIL EKSPERIMEN

Bab ini berisi tentang data yang diperoleh selama pengujian dan analisa mengenai data yang diperoleh sehingga selanjutnya dapat ditarik sebuah kesimpulan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan beberapa saran untuk kemajuan penelitian berikutnya



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Pengeringan

Pengeringan merupakan proses penghilangan sejumlah air dari material. 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. 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, enzimatis dan kimiawi.

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. 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.

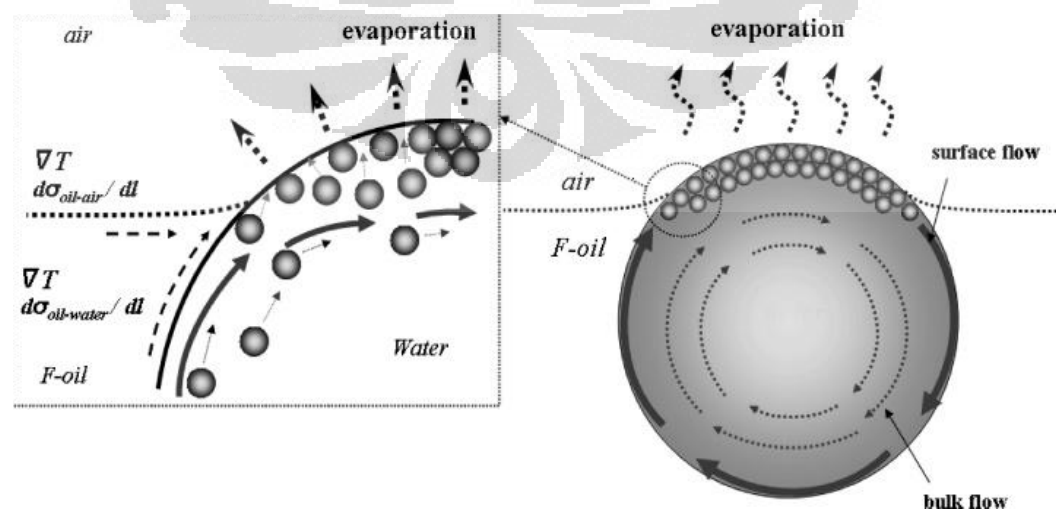
2.2 Prinsip Dasar Pengeringan

Proses pengeringan pada prinsipnya menyangkut proses perpindahan panas dan massa yang terjadi secara bersamaan (simultan). Pertama-tama panas harus ditransfer dari medium pemanas ke bahan. Selanjutnya setelah terjadi penguapan air, uap air yang terbentuk harus dipindahkan melalui struktur bahan ke medium sekitarnya. Proses ini akan menyangkut aliran fluida di mana cairan harus ditransfer melalui struktur bahan selama proses pengeringan berlangsung. Jadi panas harus disediakan untuk menguapkan air dan air harus mendifusi melalui berbagai macam tahanan agar supaya dapat lepas dari bahan dan berbentuk uap air yang bebas.

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

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

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



Gambar 2.1. Pergerakan air didalam celah kapiler bahan

2.3 Laju pengeringan

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam kecepatan pengeringan ialah;

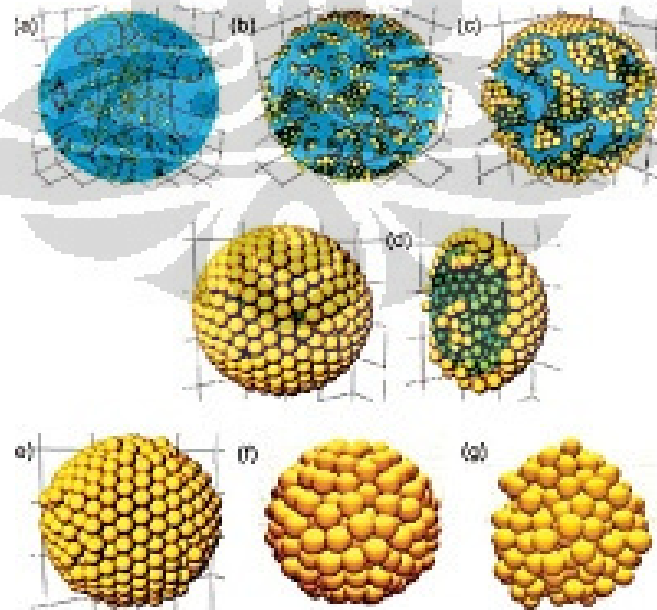
a) Luas Permukaan

Air menguap melalui permukaan bahan, sedangkan air yang ada di bagian tengah akan merembes ke bagian permukaan dan kemudian menguap. Untuk mempercepat pengeringan umumnya bahan pangan yang akan dikeringkan dipotong-potong atau 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. Penyerapan suhu oleh bahan

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.

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 tetampung dan disingkirkan dari bahan pangan. Sebaliknya jika tekanan udara semakin besar maka udara disekitar pengeringan akan lembab, sehingga kemampuan menampung uap air terbatas dan menghambat proses atau laju pengeringan.

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

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

2.4 Karakteristik Hidratasi (penguapan air)

Karena proses utama dalam pengeringan adalah proses penguapan air, maka perlu terlebih dahulu diketahui karakteristik hidratasi bahan pangan yaitu sifat-sifat bahan yang meliputi interaksi antara bahan pangan dengan molekul air

yang dikandungnya dan molekul air di udara sekitarnya. Peranan air dalam bahan pangan dinyatakan dengan kadar air dan aktivitas air (a_w), sedangkan peranan air di udara dinyatakan dengan kelembaban relatif (RH) dan kelembaban mutlak (H).

2.4.1 Kadar Air

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

$$m = \frac{W_m}{W_t + W_d} \times 100\% = \frac{W_m}{W_t} \times 100\% \quad (2 - 1)$$

di mana :

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

W_m = berat air dalam bahan (g)

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

W_t = berat total (g)

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

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100\% \quad (2 - 2)$$

di mana :

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

W_m = berat air dalam bahan (g)

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

Berat bahan kering mutlak adalah berat bahan setelah mengalami pengeringan dalam waktu tertentu sehingga beratnya konstan. Pada proses pengeringan, air yang terkandung dalam bahan tidak dapat seluruhnya diuapkan, meskipun demikian hasil yang diperoleh disebut juga sebagai berat bahan kering.

Di dalam analisis bahan pangan, biasanya kadar air bahan dinyatakan dalam persen berat kering. Hal ini disebabkan perhitungan berdasarkan berat

basah mempunyai kelemahan yaitu berat basah bahan selalu berubah-ubah setiap saat, sedangkan berat bahan kering selalu tetap. Metode pengukuran kadar air yang umum dilakukan di Laboratorium adalah metode oven atau dengan cara destilasi. Pengukuran kadar air secara praktis di lapangan dapat dilakukan dengan menggunakan moisture meter yaitu alat pengukur kadar air secara elektronik.

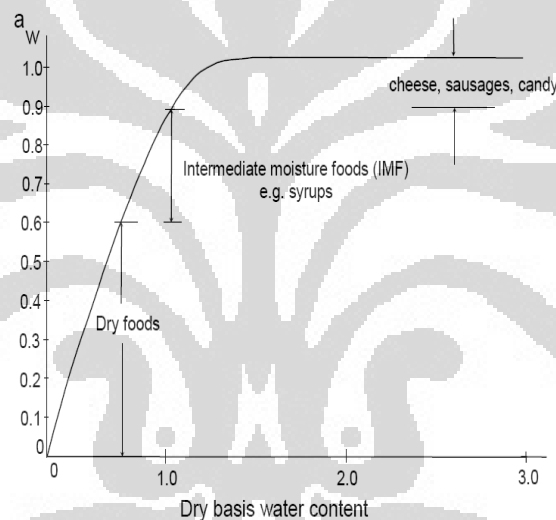
Kandungan air pada suatu bahan hasil pertanian terdiri dari 3 jenis yaitu :

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

Partikel-partikel ini ada yang bermuatan listrik positif atau negative sehingga dapat saling tarik menarik. Kekuatan ikatan yang ada dalam ketiga jenis air tersebut berbeda-beda dan untuk memutuskan ikatannya diperlukan energi penguapan. Besarnya energi penguapan untuk air bebas paling rendah, kemudian diikuti oleh air terikat secara fisik dan air terikat secara kimia yang paling besar.

2.4.2 Aktivitas Air

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



Gambar 2.3. Aktivitas air vs moisture content 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.

$$a_w = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (2 - 3)$$

di mana :

n_1 = jumlah mol pelarut

n_2 = jumlah mol zat terlarut

$n_1 + n_2$ = jumlah mol larutan

2.5 Konsep Dasar *Spray Drying*

adalah proses pemindahan kadar air dari suatu zat dengan proses thermal untuk mencapai keadaan yang sepenuhnya hanya berupa solid. Kapasitas kalor adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur suatu zat sebesar 1° . Energi kalor yang diserap oleh suatu zat atas perubahan temperatur ditentukan oleh persamaan $q = mC_p \Delta T$, di mana q adalah kalor yang diserap, m adalah massa zat, C_p adalah kapasitas kalor zat pada tekanan konstan, dan ΔT adalah perubahan temperatur.

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

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

2.5.1 Prinsip kerja *Spray Drying*

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

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

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

2.5.2 Komponen-Komponen *Spray Dryer*

Spray dryer memiliki beberapa unit komponen untuk menjalankan fungsinya.

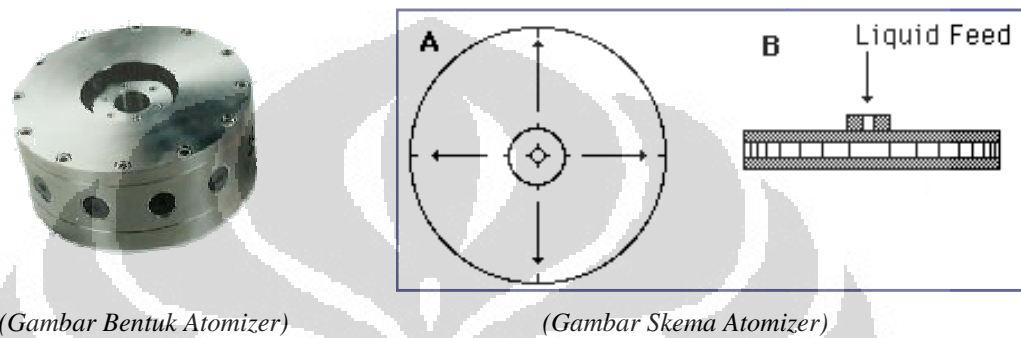
Atomizer

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

1. *Rotary atomizer*

Atomizer tipe ini menggunakan gaya sentrifugal. Pertama-tama, *liquid feed* masuk kedalam sebuah cakram (*disc*) yang berputar dengan kecepatan tinggi, kemudian *feed* mengalir keluar permukaan menuju pori-pori dan hancur dalam bentuk percikan (*spray*) *droplets*. *Rotary atomizer* menggunakan sistem bertekanan rendah. Karakteristik dari *spray* dapat lebih

beragam tergantung dari jenis *feed*, *feed rate*, kecepatan putar *atomizer* dan desain (bentuk) *atomizer*. Desain dari *wheel* pada *atomizer* memiliki *vanes*, *spacers* atau *bushing*, sedangkan desain dari *disc* memiliki plat (tanpa baling-baling), *cups*, dan *inverted bowls*. *Rotary atomizer* mudah dioperasikan dan mampu menangani *feed rate* yang berubah-ubah. Keuntungan lainnya adalah mampu menangani *high feed rate* tanpa perlu menduplikasi *atomizer*, dan menangani *abrasive feedstocks*.



(Gambar Bentuk Atomizer)

(Gambar Skema Atomizer)

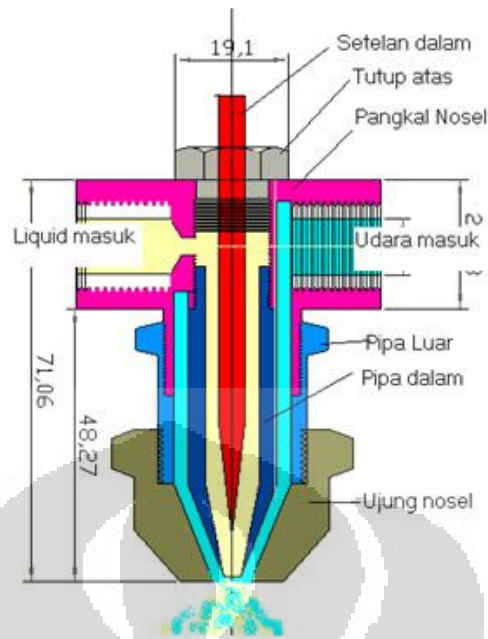
Gambar 2.4 bentuk nozel

2. *pneumatic two-fluid nozzles*

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

$$D_{3,2} = \frac{535 \times 10^3 \sqrt{\sigma}}{V_{REL} \sqrt{\rho}} + 597 \left(\frac{\mu}{\sqrt{\sigma \rho}} \right)^{0,45} \times \left(\frac{1000 V_{FL}}{V_{AIR}} \right) \quad (2 - 4)$$

di mana σ , ρ dan μ merupakan tegangan permukaan fluida (N/m), berat jenis (kg/m^3), dan kecepatan (Pa s). Lalu V_{FL} dan V_{AIR} adalah kecepatan debit air dan udara (m^3/s).



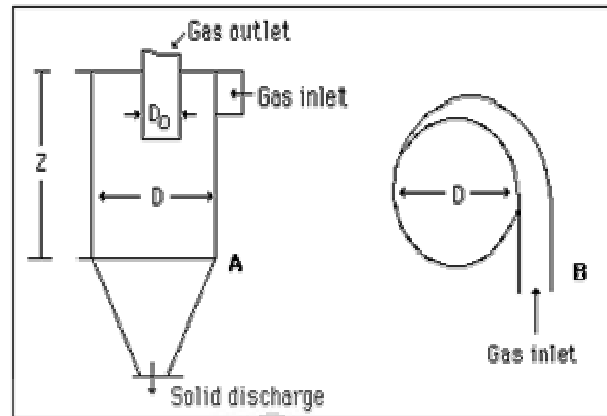
Gambar 2.5 tipe *pneumatic two-fluid nozzles*

Heater

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

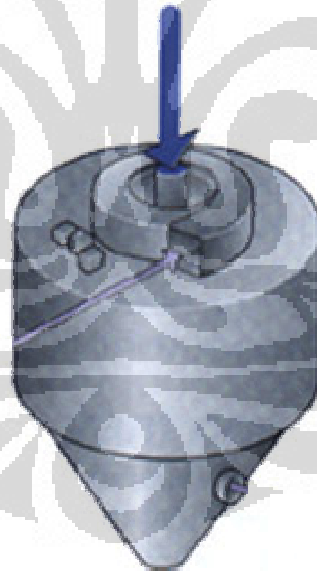
Drying Chamber

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



Gambar 2.6 Skema *Drying Chamber*

Alat ini dapat menghasilkan ukuran partikel 80% yang sama (homogen). Karena hal ini adalah kelebihan dari *spray dryer* jika dibandingkan dengan alat-alat pengering yang lainnya. Namun, alat ini memiliki efisiensi yang lebih kecil dibandingkan dengan alat-alat pengering yang lainnya, yaitu berkisar antara 25-30 %.

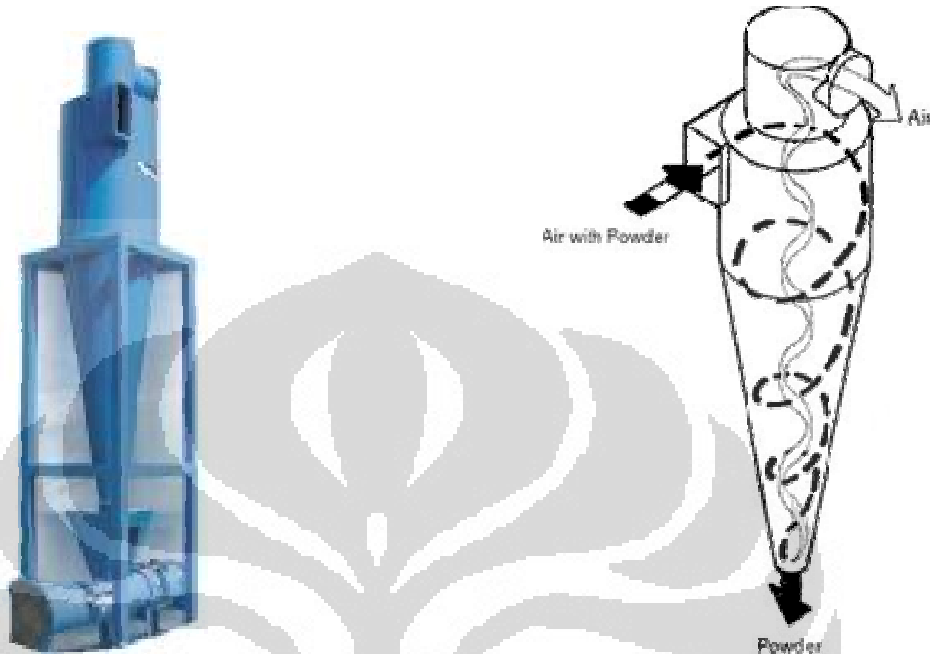


Gambar 2.7 Bentuk *Drying Chamber*

Cyclone Separator

Alat ini berfungsi untuk memisahkan partikel padat dari gas atau cairan dengan memanfaatkan gaya sentrifugal. Konstruksinya sangat sederhana. Siklon digunakan untuk memisahkan partikel yang memiliki diameter diatas 5 mikron.

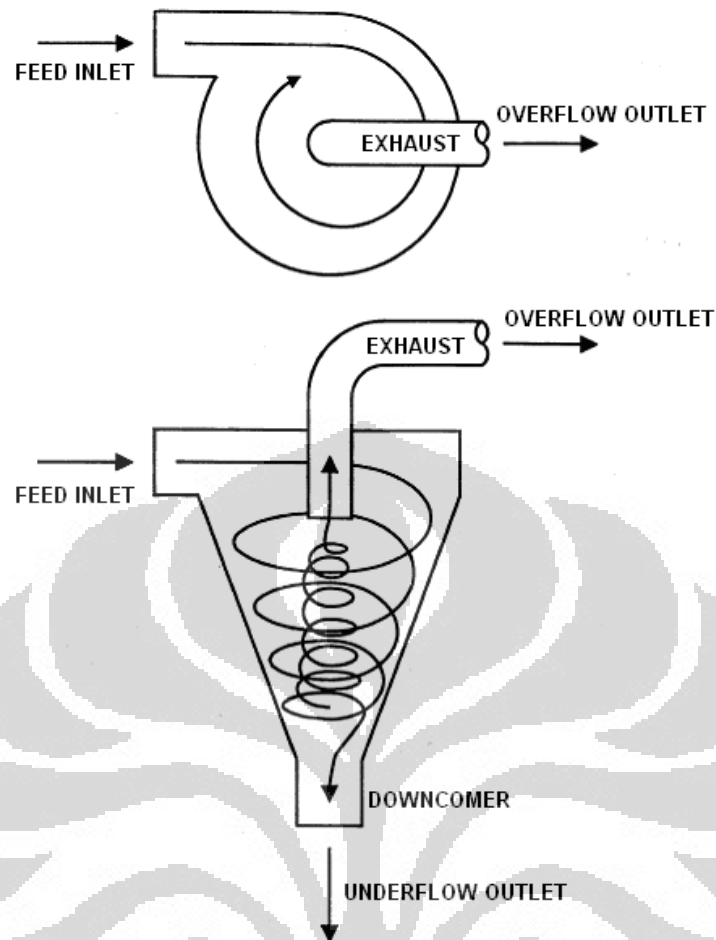
Desain yang umum digunakan adalah *reverse flow cyclone*. Dalam mendesain siklon, ada dua setandar yang dipertimbangkan, yaitu *high efficiency cyclone* dan *high throughput design*.



Gambar 2.8 Bentuk *Cyclone Separator*

Mekanisme *Cyclone Separator*

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



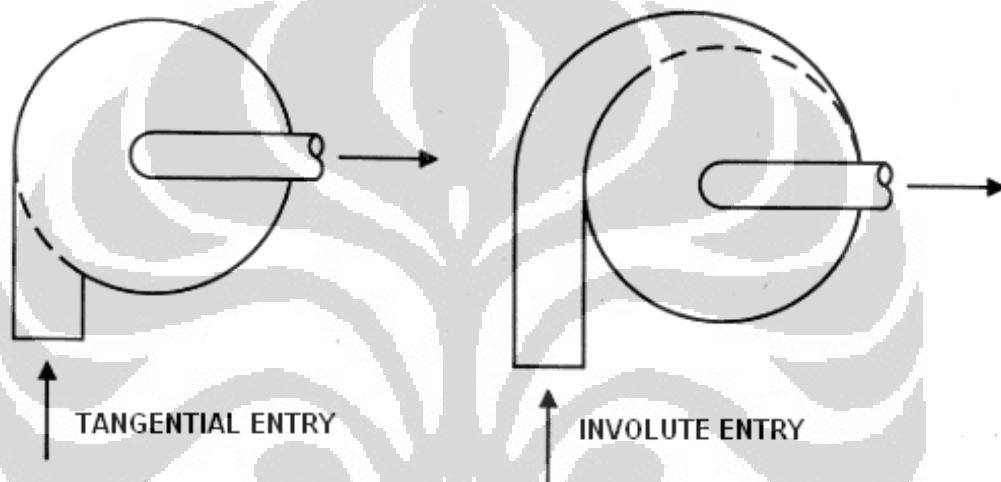
Gambar 2.9 Skema Proses *Cyclone Separator*

Pola Aliran Fluida

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

Masukan Inlet Siklon

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



Gambar 2.10 Masukan Inlet Siklon

Proses Pemisahan Partikel Padat dari Cairan

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

Proses pemisahan menurut densitas :

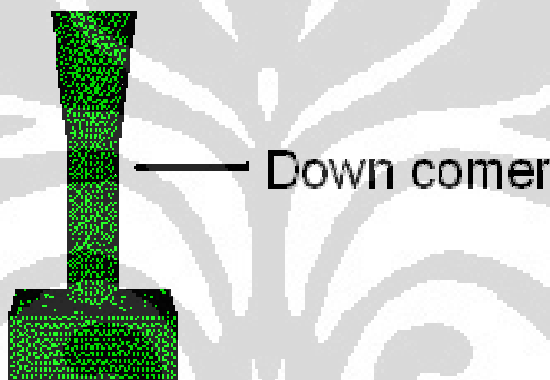
Partikel-partikel padat terpisah begitu komponen yang lebih berat "tenggelam" atau jatuh ke *downcomer* saat komponen yang lebih ringan melayang terangkat ke *exhaust pipe* pada siklon. Material dengan densitas yang lebih padat tersaring dan material yang kurang padat keluar tidak tersaring. Proses pemisahan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

Blower

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

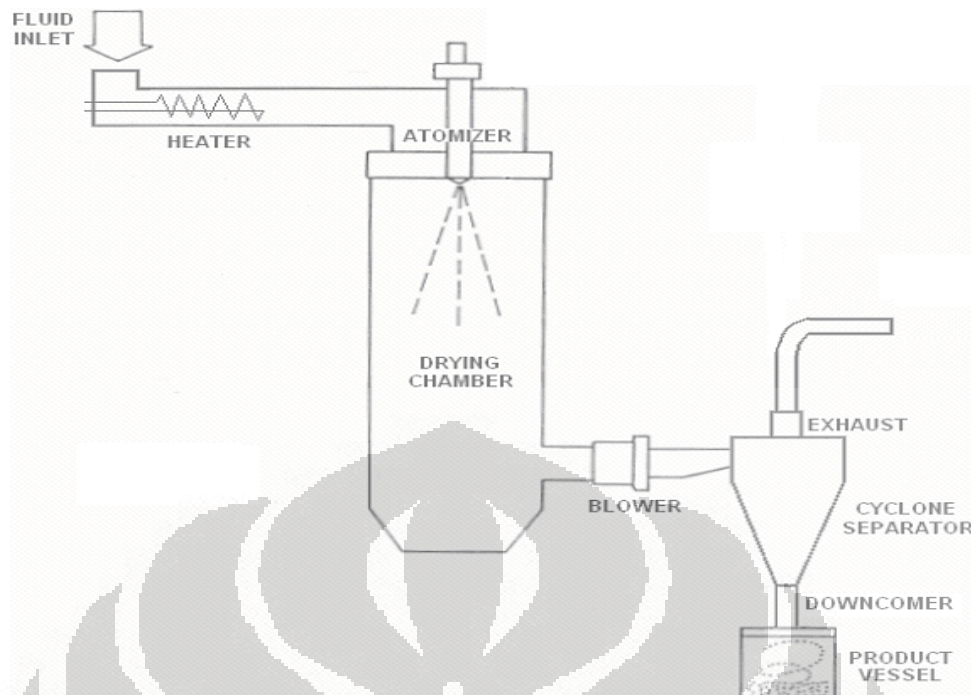
Downcomer

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



Gambar 2.11 Bentuk *Downcomer*

Downcomer menyebabkan konsentrasi partikel pertama-tama menjadi acak dan kemudian naik ke atas serta menumpuk dalam *downcomer*. Kinerja siklon selalu meningkat terhadap kenaikan diameter partikel, dengan kenaikan yang semakin lama semakin mengecil. Hal ini dapat dimengerti mengingat semakin besar ukuran partikel semakin besar pula rasio berat partikel terhadap gaya-gaya dinamik yang terjadi. Terhadap penambahan panjang *downcomer* kinerja juga meningkat, tapi dengan peningkatan kinerja tiap penambahan panjang *downcomer* yang meningkat pula. Pertambahan panjang *downcomer* ini akan semakin memperkecil peluang partikel yang sudah terjebak untuk bergerak ke atas kembali. Peningkatan kinerja tiap penambahan panjang *downcomer* yang meningkat ini belum tentu berlaku umum, sehingga untuk dapat mengetahuinya dibutuhkan banyak simulasi.



Gbr 2.12 Diagram *spray drying*

2.5.3 Penurunan Tekanan (Pressure Drop) dan Laju aliran

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

Efisiensi Pemisahan

Efisiensi yang dimaksud di sini adalah suatu ukuran kemampuan dari siklon untuk memperoleh partikel padat yang ditampung pada *product vessel*. Penampungan partikel padat pada *product vessel* itu diperlukan karena sebagian besar fluida akan berjalan terus melalui *exhaust* dan proses selanjutnya. Uraian sederhana ini dapat menghasilkan efisiensi yang sempurna dengan menampung 100% padat pada *product vessel* dan memisahkan 100% fluida melalui *exhaust*.

Oleh karena itu, jika tujuannya untuk memisahkan partikel padat dari suatu fluida, efisiensinya ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$E = \frac{S_u}{S_i} - \frac{L_u}{L_i} \quad (2-5)$$

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

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

$$R_f = \frac{(S_u + L_u)}{(S_i + L_i)} \quad (2-6)$$

Parameter	Variasi	Efek	Sebab
Diameter <i>Exhaust</i>	Diperbesar	Efisiensi menurun	Lebih memungkinkan untuk partikel padat tersedot ke atas
Perbedaan Tekanan	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Laju aliran meningkat, naiknya gaya tarik ke bawah
Diameter <i>Downcomer</i>	Diperbesar	Mencegah <i>overflow</i> , dan dapat juga menurunkan efisiensi	Menyebabkan jatuhnya partikel padat bersama fluida
Debit fluida	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Gaya tarik ke bawah meningkat
Viskositas cairan	Diperbesar	Efisiensi menurun	Partikel padat lebih sulit menetap
Perbedaan densitas partikel padat dan cairan	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Lebih memungkinkan partikel padat untuk berpindah ke gerakan spiral berlawanan pada Siklon

Ukuran partikel padat	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Lebih memungkinkan partikel padat untuk berpindah ke dinding permukaan siklon
Diameter inlet	Diperbesar	Efisiensi menurun	Jumlah masukan tetap sama tetapi pada tekanan yang lebih rendah
Diameter Siklon	Diperbesar	Efisiensi menurun	Gaya tarik ke bawah menurun
Panjang Siklon	Diperbesar	Efisiensi meningkat	Lamanya proses meningkat

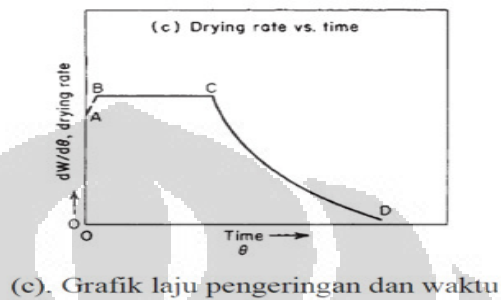
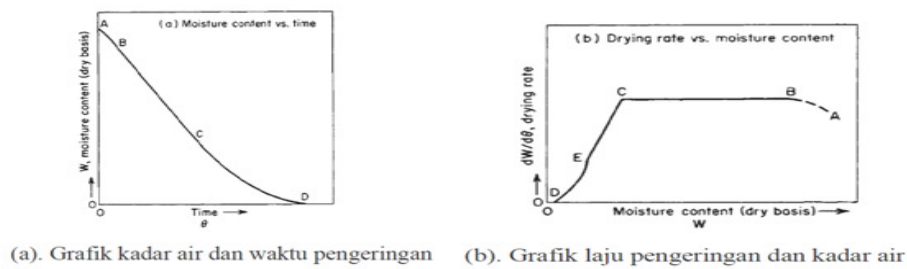
Tabel 2.1 Variasi Parameter dan Efeknya Pada Cyclone Separator

2.6 Proses Pengeringan

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

Laju pengeringan konstan terjadi sampai air bebas dipermukaan bahan telah hilang dan laju pengeluaran air semakin berkurang. Laju pengeringan konstan tergantung pada luas permukaan bahan, perbedaan kelembaban antara aliran udara dengan permukaan basah, koefisien pindah panas dan kecepatan udara pengering. Kadar air pada saat laju pengeringan berubah dari konstan ke laju pengeringan menurun dan disebut kadar air kritis. Menurut Henderson dan Perry (1976), laju pengeringan konstan terjadi pada awal proses pengeringan produk biologi dengan kadar air lebih besar dari 70% basis basah dan merupakan fungsi dari suhu, kelembaban dan kecepatan udara pengering dan laju perpindahan dalam bahan ke permukaan sama besar dengan laju penguapannya dari permukaan bahan ke udara sekitar.

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



Gambar 2.13 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.

2.7 Metode Pengeringan *Spray Dryer*

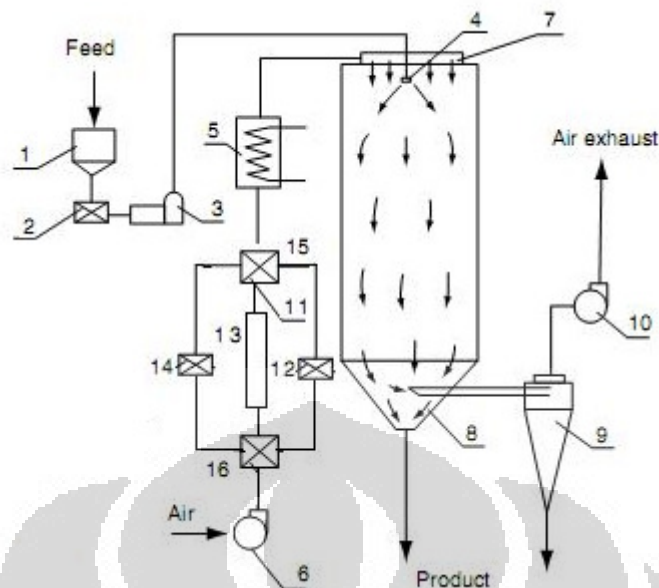
Menurut Filkoa dan Mujumdar (1995), pengering semprot *Spray Dryer* merubah cairan menjadi produk yang kering dalam satu operasi. Cairan dikabutkan menggunakan rotary wheel atau pressure nozzle dan hasil spray kontak langsung dengan udara panas. Waktu pengeringan spray dryer sangat cepat jika dibandingkan 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 2.14 Skema Pengering Semprot

Bagian-bagian dari unit *spray dryer*:

1. *Feed tank*
2. Filter cairan
3. Pompa umpan
4. *Nozzle atomiser*
5. Pemanas udara (*elektrik 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 diupkan 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 :

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

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

(2 - 7)

Sedangkan mass transfer ditunjukkan oleh persamaan:

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho Da}$$

(2 - 8)

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

$$t = \frac{\rho_f \lambda d'^2}{8k(T - T_{wb})}$$

(2 - 9)

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

$$d_p = \frac{9575}{\sqrt[3]{\Delta P}}$$

(2 - 10)

Keterangan :

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.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dQ}{dt} / \lambda = - \frac{hA(T_a - T_w)}{\lambda} \quad (2-11)$$

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

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

$$h = \frac{2k_a}{D} \quad (2-12)$$

k_a = konduktivitas termal udara ; D = diameter droplet.

Diameter droplet akan berubah selama periode laju konstan.

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

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= - \frac{2k_a}{D} \frac{\pi D^2}{\lambda} (T_a - T_w) \\ \int_0^{t_c} dt &= \int_{w_o}^{w_c} - \frac{\lambda}{2k_a \pi D (T_a - T_w)} dw \\ t_c &= \frac{-\lambda}{2k_a \pi (T_a - T_w)} \int_{w_o}^{w_c} \frac{1}{D} dw \end{aligned} \quad (2-13)$$

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

$$w = \frac{4\pi r^3 \rho}{3} = \frac{\pi D^3 \rho}{6} \quad (2-14)$$

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

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

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

$\Delta D \rightarrow 0$ maka

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dD} &= \frac{\pi \rho_w}{6} 3D^2 = \frac{\pi D^2 \rho_w}{2} \\ dw &= \frac{\pi D^2 \rho_w}{2} dD \end{aligned} \quad (2-15)$$

Laju perubahan dalam berat ekuivalen dengan laju perubahan diameter droplet

$$\begin{aligned} t_c &= \frac{-\lambda}{2k_a \pi (T_a - T_w)} \int_{D_0}^{D_c} \frac{1}{D} \frac{\pi D^2}{2} \rho_w dD \\ &= \frac{-\lambda \pi \rho_w}{4k_a \pi (T_a - T_w)} \int_{D_0}^{D_c} D dD \\ &= \frac{-\lambda \rho_w}{4k_a (T_a - T_w)} \left[\frac{D_c^2}{2} - \frac{D_0^2}{2} \right] \\ &= \frac{\lambda \rho_w (D_0^2 - D_c^2)}{8k_a (T_a - T_w)} \end{aligned} \quad (2-16)$$

➤ Falling rate period

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

$$q = \frac{dQ}{dt} = h_a A (T_a - T_s) \quad (2-17)$$

Dimana T_s adalah Temperatur permukaan partikel

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

$$T_s = \frac{T_a + T_w}{2} \quad (2-18)$$

Dengan menggunakan

$$\text{Maka} \quad \frac{dQ}{dt} = h_a A \left(T_a - \left(\frac{T_a}{2} + \frac{T_w}{2} \right) \right) = \frac{h_a A}{2} (T_a - T_w) \quad (2-19)$$

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

$$w = \rho_d V$$

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

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{\lambda \rho_d V} = \frac{-h_a A (T_a - T_w)}{2 \lambda \rho_d V} \quad (2-20)$$

Sekarang luas dan volume dapat dinyatakan dalam diameter partikel, sehingga

$$\frac{A}{V} = \frac{\pi D^2}{\pi D^3 / 6} = \frac{6}{D} \quad (2-21)$$

Dan
$$h_a = \frac{2k_a}{D}$$

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
$$\frac{dw}{dt} = \frac{-6k_a (T_a - T_w)}{\lambda \rho_d D_c^2} \quad (2-22)$$

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

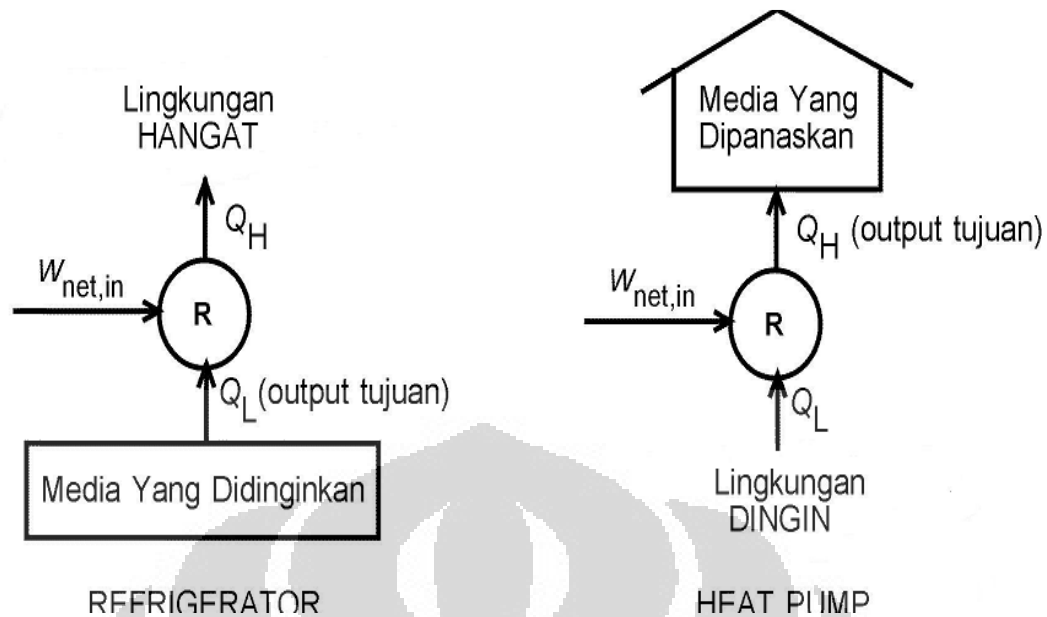
$$t_f = \frac{-\lambda \rho_d D_c^2}{6k_a (T_a - T_w)} (w_f - w_c)$$

maka

$$t_f = \frac{\lambda \rho_d D_c^2}{6k_a (T_a - T_w)} (w_c - w_f) \quad (2-23)$$

2.8 Pengering Sistem Pengatur Udara

Proses pengeringan udara masukan dengan memanfaatkan Siklus refrigerasi, dimana siklus kerja yang mentransfer kalor dari media bertemperatur rendah ke media bertemperatur tinggi dengan menggunakan kerja dari luar sistem. Secara prinsip merupakan kebalikan dari siklus mesin kalor (*heat engine*). Dilihat dari tujuannya maka alat dengan siklus refrigerasi dibagi menjadi dua yaitu **refrigerator** yang berfungsi untuk mendinginkan media dan **heat pump** yang berfungsi untuk memanaskan media. Ilustrasi tentang *refrigerator* dan *heat pump* dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 2.15 siklus refrigerasi

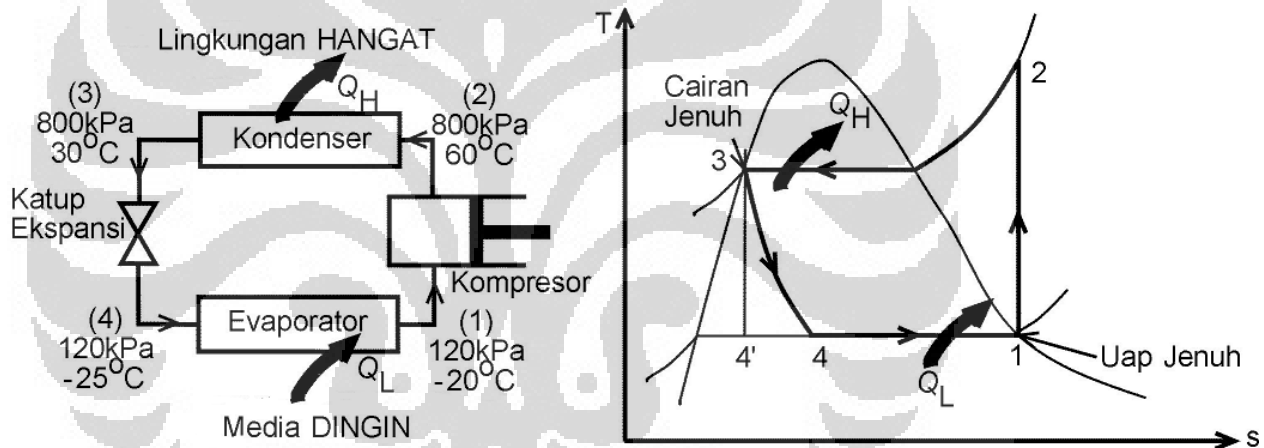
Siklus refrigerasi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Siklus kompresi uap (*vapor compression refrigeration cycle*) dimana refrigeran mengalami proses penguapan dan kondensasi, dan dikompresi dalam fasa uap.
2. Siklus gas (*gas refrigeration cycle*), dimana refrigeran tetap dalam kondisi gas.
3. Siklus bertingkat (*cascade refrigeration cycle*), dimana merupakan gabungan lebih dari satu siklus refrigerasi.
4. Siklus absorpsi (*absorption refrigeration cycle*), dimana refrigeran dilarutkan dalam sebuah cairan sebelum dikompresi.
5. Siklus termoelektrik (*thermoelectric refrigeration cycle*), dimana proses refrigerasi dihasilkan dari mengalirkan arus listrik melalui 2 buah material yang berbeda.

$$\begin{aligned} \text{COP}_R &= \frac{\text{output tujuan}}{\text{kerja yang dibutuhkan}} = \frac{\text{efek pendinginan}}{\text{input kerja}} = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}} \\ \text{COP}_{\text{HP}} &= \frac{\text{output tujuan}}{\text{kerja yang dibutuhkan}} = \frac{\text{efek pemanasan}}{\text{input kerja}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net,in}}} \end{aligned} \quad (2 - 24)$$

2.8.1 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

Gambar di bawah-kiri menunjukkan siklus refrigerasi kompresi uap secara skematis. Di sini refrigeran dalam kondisi uap jenuh masuk ke kompresor dan keluar sebagai uap panas lanjut. Refrigeran kemudian masuk ke kondenser untuk melepas kalor sehingga terjadi kondensasi sampai ke kondisi cairan jenuh. Keluar kondenser refrigeran masuk ke katup ekspansi untuk menjalani proses pengecilan (*throttling*) sehingga mengalami penurunan tekanan dan berubah menjadi campuran jenuh. Proses terakhir ini bisa juga diganti dengan sebuah turbin isentropis untuk menaikkan kapasitas pendinginan dan menurunkan kerja input (dengan kompensasi kompleksnya sistem). Selanjutnya refrigeran masuk ke evaporator untuk menyerap kalor sehingga terjadi proses evaporasi dan siap untuk dilakukan langkah kompresi berikutnya.



Gambar 2.16 siklus refrigerasi kompresi uap

Siklus refrigerasi kompresi uap ideal dapat digambarkan dalam diagram T - s seperti gambar di atas-kanan. Proses-proses yang terjadi adalah,

- 1-2 : Kompresi isentropis dalam kompresor
- 2-3 : Pembuangan kalor secara isobaris dalam kondenser
- 3-4 : *Throttling* dalam katup ekspansi atau tabung kapiler
- 4-1 : Penyerapan kalor secara isobaris dalam evaporator

Persamaan energi untuk komponen-komponen refrigerator bisa dituliskan sebagai berikut:

$$q - w = h_e - h_i \quad (2 - 25)$$

dimana diasumsikan perubahan energi kinetik dan potensial bisa diabaikan.

Kinerja suatu *refrigerator* dan *heat pump* dinilai dari besarnya koefisien kinerja (*coefficient of performance* COP) yang didefinisikan sebagai berikut,

$$\text{COP}_R = \frac{q_L}{w_{\text{net,in}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{q_H}{w_{\text{net,in}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

di mana $h_1 = h_{g @ p_1}$ dan $h_3 = h_{f @ p_3}$.

Harga COP_R dan COP_{HP} umumnya lebih besar dari satu dimana $\text{COP}_{\text{HP}} = \text{COP}_R + 1$ untuk suatu rentang tekanan kerja yang sama.

2.8.2 Udara Kering dan Udara Atmosfer

Udara atmosfer yang ada di lingkungan kita terdiri dari campuran beberapa gas dan air. Karena air dalam fasa gas di sini temperaturnya jauh lebih rendah dibandingkan dengan temperatur kritisnya maka biasa disebut uap (*vapor*). Uap biasanya dapat dianggap mempunyai sifat-sifat yang mirip dengan dengan kondisi uap jenuhnya.

Dari tinjauan termodinamika, lebih menguntungkan mendefinisikan udara atmosfer sebagai campuran udara kering yaitu udara yang tidak mengandung uap air, dan uap air. Pada kenyataannya jumlah uap air dalam udara atmosfer adalah tidak banyak, tetapi karena sangat berpengaruh terhadap kenyamanan seseorang maka perlu diperhatikan keberadaannya.

Dalam rentang pengkondisian udara (-10 - 50°C) udara kering merupakan gas ideal sehingga entalpi dan perubahannya dapat dicari sebagai berikut.

$$h_{\text{a,dry}} = c_p T \cong 1,005[\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}] \times T[^\circ\text{C}]$$

$$\Delta h_{\text{a,dry}} = c_p \Delta T \cong 1,005[\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}] \times \Delta T[^\circ\text{C}]$$
(2 – 26)

Uap air juga dapat digolongkan menjadi gas ideal yang sifatnya sama dengan kondisi jenuhnya, sehingga

$$h_v(T, p \text{ rendah}) \cong h_g(T)$$
(2 – 27)

di mana $h_g(T) = 2501,3 + 1,82T [^\circ\text{C}]$ (kJ/kg) atau dicari dari tabel uap.

Karena kedua komponen gas bisa dianggap sebagai gas ideal maka tekanan udara atmosfer bisa dinyatakan sebagai berikut,

$$p = p_a + p_v \quad [\text{kPa}] \quad (2 - 28)$$

dimana p adalah tekanan parsial, indeks a dan v menunjukkan udara kering dan uap.

2.8.3 Kelembaban Udara Spesifik dan Relatif Pengerinan

Kelembaban spesifik atau absolut / rasio kelembaban ω didefinisikan:

$$\begin{aligned} \omega &\equiv \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v V / R_v T}{p_a V / R_a T} \\ &= 0,622 \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} \end{aligned} \quad (2 - 29)$$

Kelembaban relatif ϕ didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \phi &\equiv \frac{\text{massa uap air dalam udara}}{\text{massa uap air maksimum dalam udara}} \\ &= \frac{m_v}{m_g} = \frac{p_v}{p_g} \end{aligned} \quad (2 - 30)$$

dimana $p_g = p_{\text{sat @T}}$ dan bisa dilihat dari tabel uap untuk air.

Dari definisi kelembaban relatif di atas maka kondisi udara dimana kandungan uap airnya maksimum akan mempunyai $\phi = 100\%$ dan biasa disebut sebagai udara jenuh (*saturated air*) dimana $p_v = p_{\text{sat @T}}$

Hubungan antara ω dan ϕ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\omega p}{(0,622 + \omega) p_g} \\ \omega &= \frac{0,622 \phi p_g}{p - \phi p_g} \end{aligned} \quad (2 - 31)$$

Entalpi udara atmosfer dapat dihitung sebagai berikut :

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (2 - 32)$$

Apabila kedua sisi dibagi dengan m_a (massa udara kering) maka didapatkan entalpi udara atmosfer persatuan massa udara kering.

$$h = h_a + \alpha h_v \quad [\text{kJ/kg - dry air}] \quad (2 - 33)$$

2.8.4 Temperatur Titik Embun (Dew-point Temperature)

Temperatur titik embun adalah temperatur dimana kondensasi dimulai apabila udara didinginkan pada tekanan konstan, atau dengan kata lain identik dengan temperatur jenuh air pada tekanan uap.

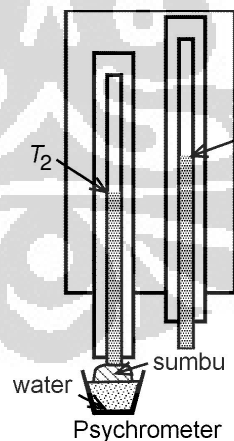
$$T_{dp} = T_{sat@p_v}$$

Temperatur titik embun ini sangat penting untuk menentukan temperatur minimal yang harus dicapai untuk membuang kandungan uap air dalam udara. Hal ini karena pembuangan uap air dengan mudah dapat dilakukan dengan cara pengembunan.

2.8.5 Pengukuran Kelembaban

Metode pengukuran kelembaban dapat dilakukan dengan cara

- mengukur temperatur titik embun T_{dp} sehingga didapatkan tekanan uap air p_v dan akhirnya dapat ditentukan kelembaban relatif ϕ . Metode ini sederhana tetapi tidak praktis.
- menggunakan *psychrometer* yang berprinsip sebagai proses *adiabatic saturation*. Skematis sebuah *psychrometer* dapat dilihat seperti gambar di bawah. Di sini terdapat 2 buah termometer di mana ujung yang satu dibiarkan



Gambar 2.17 skema thermometer wetbulb

terbuka sedangkan ujung yang satunya dibalut dengan sumbu atau kapas yang basah oleh air. Apabila udara mengalir di sekitar kedua termometer maka kandungan air dalam sumbu akan menguap (terjadi penyerapan panas oleh air)

sehingga menyebabkan temperatur udara di sekitar sumbu turun. Hal ini membuat terjadinya perbedaan penunjukan diantara 2 termometer. Disini T_2 disebut sebagai *wet-bulb temperature* T_{wb} dan T_1 adalah *dry-bulb temperature* T_{db} .

Apabila ada aliran udara di sekitar *psychrometer* dan terjadi kesetimbangan perpindahan massa dan kalor di sekitar sumbu, berlaku hubungan kekekalan massa:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a (a_2 - a_1) \quad (2 - 34)$$

di mana \dot{m}_f adalah laju penguapan air dari sumbu, a_1 dan a_2 masing-masing adalah kelembaban absolut di sekitar ujung termometer 1 dan termometer 2. Dari hubungan kekekalan energi didapatkan.

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_f h_{f2} = \dot{m}_a h_2 \quad \text{atau} \quad h_1 + (a_2 - a_1) h_{f2} = h_2$$

Dari $h = c_p T + a h_g$ maka kelembaban absolut di ujung termometer 1 didapatkan:

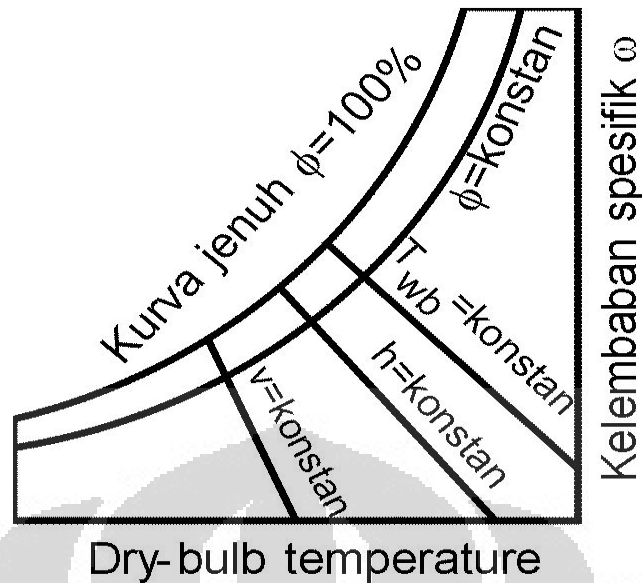
$$a_1 = \frac{c_p (T_2 - T_1) + a_2 h_{fg,2}}{h_{g,1} - h_{f,2}} \quad (2 - 35)$$

Karena di ujung termometer 2 kondisinya adalah jenuh maka a_2 dapat dicari dari:

$$a_2 = \frac{0,622 p_{g,2}}{p_2 - p_{g,2}} \quad (2 - 36)$$

2.8.6 Grafik Kelembaban (Psychrometric Chart)

Grafik kelembaban adalah grafik yang digunakan untuk menentukan properti-properti dari udara atmosfer pada suatu tekanan tertentu. Penggunaan grafik ini lebih menguntungkan dibandingkan apabila harus menghitung menggunakan persamaan-persamaan di atas. Skematis *psychrometric chart* adalah seperti gambar di bawah dimana masing-masing kurva/garis akan menunjukkan nilai properti yang konstan. Untuk mengetahui nilai dari properti-properti (h , ϕ , ω , v , T_{wb} , T_{db}) bisa dilakukan apabila minimal dua buah diantara properti tersebut sudah diketahui.



Gambar 2.18 diagram psikometric

Misal, apabila diketahui kondisi udara atmosfer bisa digambarkan dalam *psychrometric chart* sebagai titik kondisi maka untuk mencari:

- ❖ ω ditentukan dengan menarik garis horisontal dari titik kondisi ke sumbu vertikal ($\omega = \text{konstan}$).
- ❖ h ditentukan dengan menarik garis sejajar $h = \text{konstan}$ dari titik kondisi ke skala entalpi.
- ❖ T_{wb} ditentukan dengan menarik garis sejajar $T_{wb} = \text{konstan}$ sampai ke garis jenuh (*saturation line*).
- ❖ T_{db} ditentukan dengan menarik garis vertikal sampai ke sumbu horisontal.
- ❖ T_{dp} ditentukan dengan menarik garis horisontal sampai ke garis jenuh.
- ❖ v ditentukan dengan menarik kurva sejajar kurva $v = \text{konstan}$ dan nilainya ditentukan dengan melihat posisi kurva terhadap kurva $v = \text{konstan}$ yang mengapitnya.
- ❖ ϕ ditentukan dengan menarik kurva sejajar kurva $\phi = \text{konstan}$ dan nilainya ditentukan dengan melihat posisi kurva terhadap kurva $v = \text{konstan}$ yang mengapitnya.

Proses pengkondisian udara sendiri bisa diasumsikan sebagai aliran steady sehingga didapatkan hubungan-hubungan sebagai berikut:

- ❖ Persamaan kekekalan massa untuk udara kering

$$\dot{m}_{a,i} = \dot{m}_{a,e}$$

- ❖ Persamaan kekekalan massa untuk air

$$\dot{m}_{w,i} = \dot{m}_{w,e}$$

- ❖ Persamaan kekekalan energi

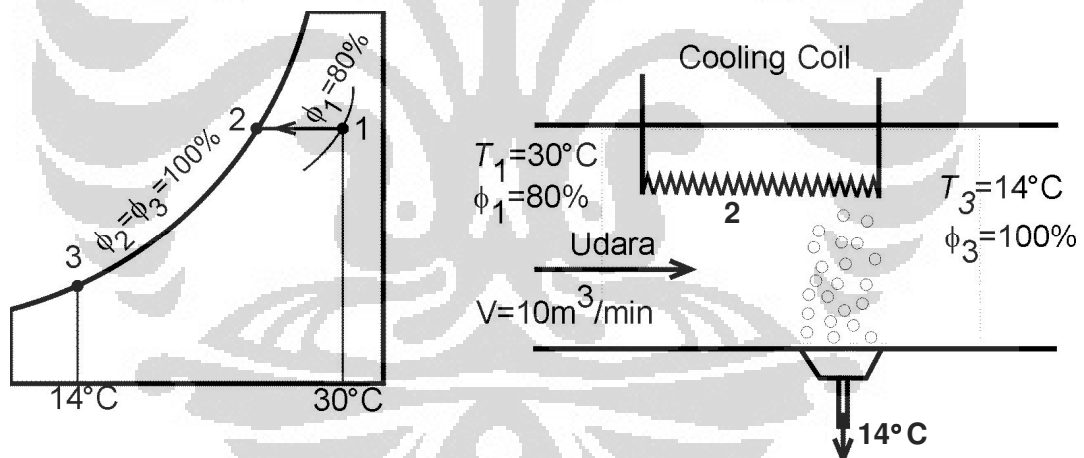
$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e h_e - \dot{m}_i h_i \quad (2-37)$$

- ❖ disini indeks i dan e masing-masing adalah inlet dan exit.

2.8.7 Pendinginan Dengan Penurunan Kelembaban (*Cooling with Dehumidification*)

Problem pendinginan udara (kenaikan ϕ menyebabkan tidak nyaman) bisa dieliminasi dengan penurunan kelembaban. Ini dilakukan dengan mendinginkan udara sampai di bawah titik embun ($T < T_{dp}$) dengan menggunakan koil pendingin sehingga terjadi kondensasi air yang terkandung dalam udara ($\phi=100\%$). Apabila kondensasi terus berlangsung maka temperatur akan semakin menurun.

Proses *cooling* sampai mulai pembuangan (1-3) dimana $\omega_3 < \omega_1$.



Laju kondensasi dapat dicari dari:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (a_1 - a_3) \quad (2-38)$$

$$\dot{m}_{a,1} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} \quad (2-39)$$

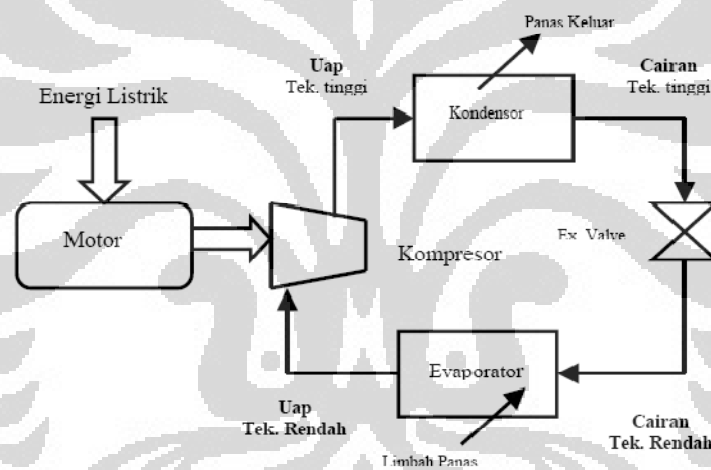
Laju pendinginan dapat dicari:

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_3 - h_1) + \dot{m}_w h_w \quad (2-40)$$

Pengeringan cairan dengan sistem spray adalah proses pengeringan benda zat terlarut dengan cara menyemprotkannya ke udara kering dalam bentuk butiran (droplet) halus sehingga terjadi penguapan dari zat pelarut. Dalam tenggang waktu tertentu pelarut tersebut akan habis atau sedikit tersisa. Dengan kata lain butiran mengalami proses perpindahan panas dan perpindahan massa atau penguapan. Pengeringan dengan cara ini biasanya dilakukan didalam tabung.

2.9 Heat pump

Secara umum sistem *heat pump* kompresi uap yang digunakan untuk memanfaatkan limbah panas dapat digambarkan dengan blok diagram ditunjukkan:



Gambar 2.19 Diagram alir kerja refrigerasi pada sistem heat pump

Pada dasarnya sistem mesin pendingin (*refrigerator*) adalah juga merupakan suatu sistem pompa kalor (*heat pump*), 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 refrigerasi 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 *heat pump heater* 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:

$$COP_{HP} = \frac{\text{Energi yang dikeluarkan (kW)}}{\text{Energi yang dimasukkan (kW)}} \quad (2 - 41)$$

Dari Gambar 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 kompresor 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 kompresor dapat dilihat/dihitung dengan menggunakan diagram tekanan-enthalpy (*p-h diagram*) suatu refrijeran seperti pada Gambar 2

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

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

dimana;

M_r = laju aliran refrijerasi (kg/s)

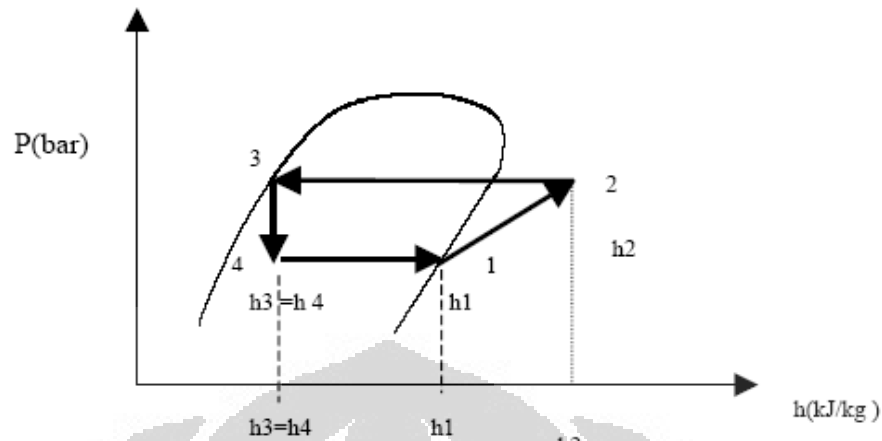
COP_{HP} = COP system heat pump heater

COP_R = COP system 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 kompresor (kJ/kg)



Gambar 2.20. 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:

$$\varepsilon_E = \frac{Q_{FE}}{Q_{UE}} \qquad \varepsilon_K = \frac{Q_{UK}}{Q_{FK}} \qquad (2 - 42)$$

Dimana ;

ε_E , ε_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)

2.10 Flow Katup Ekspansi

Kecepatan Refrigerant Yang Melewati Katup Ekspansi:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2-43)$$

$$V_2 = \dots \frac{m}{s}$$

Luas area pengecilan :

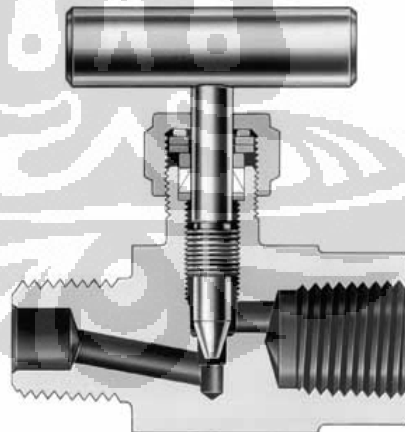
$$A = \frac{\pi}{4} (d_{\text{luar}}^2 - d_{\text{dalam}}^2) \quad (2-44)$$

Ditentukan : $d_{\text{luar}} = \text{mm}$

$d_{\text{dalam}} = \text{mm}$

Aliran Refrigerant keluar ekspansi :

$$Q = VxA \quad (2-45)$$



Gbr.2.21 valve needle

Valve needle ekspansi mengendalikan suatu aliran fluida dari daerah tekanan tinggi (dapat juga bersuhu tinggi) kedaerah bertekanan rendah. Dalam proses ini tidak ada kerja yang dilakukan, perpindahan kalor melalui lubang katup *throttling* itu sangat kecil (dapat diabaikan). Energi kinetik tinggi yang dihasilkan dilesap dalam gesekan fluida untuk mengembalikan entalpi fluida ke

nilai semula. Memang dalam proses ini entalpi konstan, tetapi secara analisa, sebenarnya terjadi perubahan energi dalam (Δu) dan energi alirannya (Pv) karena terjadi perubahan tekanan dan temperature^[3].

$$E_1 = E_2$$

$$EP_1 + EK_1 + H_1 + \Delta Q = EP_2 + EK_2 + H_2 + \Delta w_{net}$$

$\Delta EP = 0$, karena ketinggian stasion masuk dan keluar sama

$\Delta EK =$ dapat diabaikan, memang terjadi perubahan kecepatan yang cukup besar, tetapi karena sistemnya kecil dan massanya kecil, karena itu perubahan energi kinetiknya juga kecil.

$\Delta Q = 0$, karena tidak ada kalor yang masuk dan keluar.

$\Delta W = 0$, karena tidak ada kerja yang dilakukan oleh dan terhadap sistem.

$$\text{Jadi } H_1 = H_2 = U + PV$$

$$\text{dan } h_1 = h_2 = u + Pv$$

Jadi, proses ini merupakan proses dengan entalpi tetap, akan tetapi di dalamnya terjadi perubahan energi dalam dan energi aliran karena perubahan tekanan dan temperatur. Selain itu, sebenarnya terdapat pula perubahan energi kinetik, tapi nilainya cukup kecil dibandingkan dengan perubahan energi dalam dan energi alirannya.

2.11 Perhitungan Laju Aliran Udara

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

$$\dot{m} = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \quad (2-46)$$

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

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2g_c} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2g_c} \quad (2-47)$$

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

$$P_1 - P_2 = \frac{v_2^2}{2g_c} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (2-48)$$

$v_1, v_2 =$ kecepatan aliran sebelum dan sesudah aliran (m/s^2)

P_1, P_2 = tekanan aliran sebelum dan sesudah lewat *orifice* (Pa)

A_1, A_2 = luas penampang sebelum dan sesudah *orifice* (m²)

g_c = 1 (kg.m/N.s²)

Maka laju volumetrik (Q_{ideal}) adalah

$$Q_{ideal} = A_2 v_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2g_c}{\rho(p_1 - p_2)}} \quad (2 - 49)$$

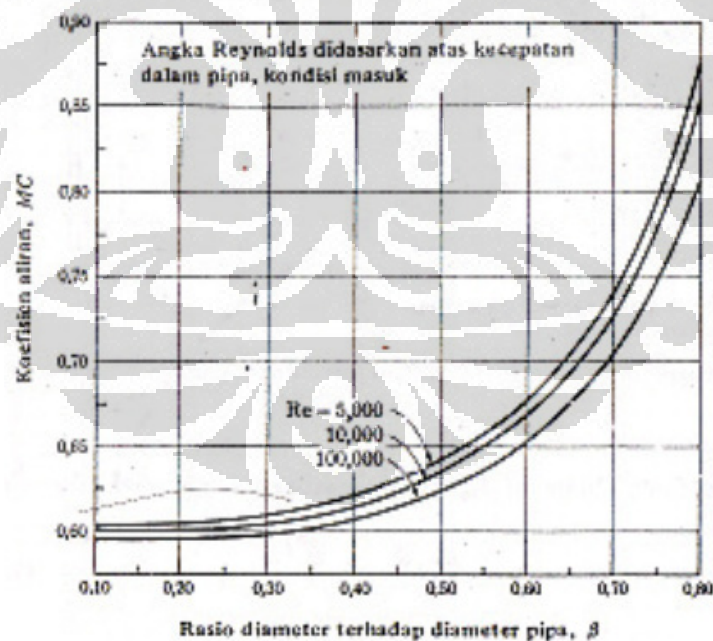
Q_{ideal} = laju aliran volume sebelum *orifice* (m³/s)

$$M = \text{faktor kecepatan masuk} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (2 - 50)$$

K = koefisien aliran = CM

$$\beta = \text{rasio diameter} = \frac{d}{D} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (2 - 51)$$

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



Gambar 2.22 Koefisien Buang Untuk *Orifice* Konsentrik Dalam Pipa. (Holman J.P, 1984)

Gambar 2.22 menunjukkan perbandingan antara koefisien aliran (MC) dengan rasio diameter (β). Perbandingan ini menentukan kecepatan aliran dalam pipa.

atau

$$-\rho \frac{dr}{dt} h_{fg} = h(T_u - T_s) \quad (2 - 52)$$

Perhitungan debit udara untuk mengetahui massa udara yang mengalir ke ruang pengering. Pengukurannya menggunakan pelat *orifice* yang sudah ada, di mana ketetapan persamaannya mengikuti bawaan dari manufakturnya. Sehingga dalam menentukan debit udara yang melewati *orifice* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$Q_a = 0.01242 \alpha (d_o)^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma^a}} \quad (2 - 53)$$

Q_a = debit udara (m^3/h)

Δp = ketinggian air manometer (mmAqua)

α = koefisien aliran = 0,8534

d_o = Diameter lubang *orifice* = 28,3 mm

γ^a = berat udara spesifik (kg/m^3)

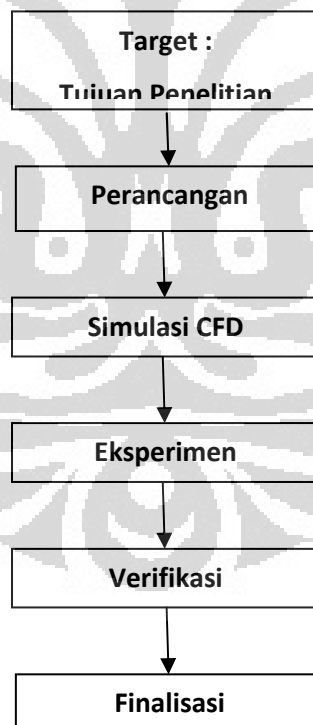
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

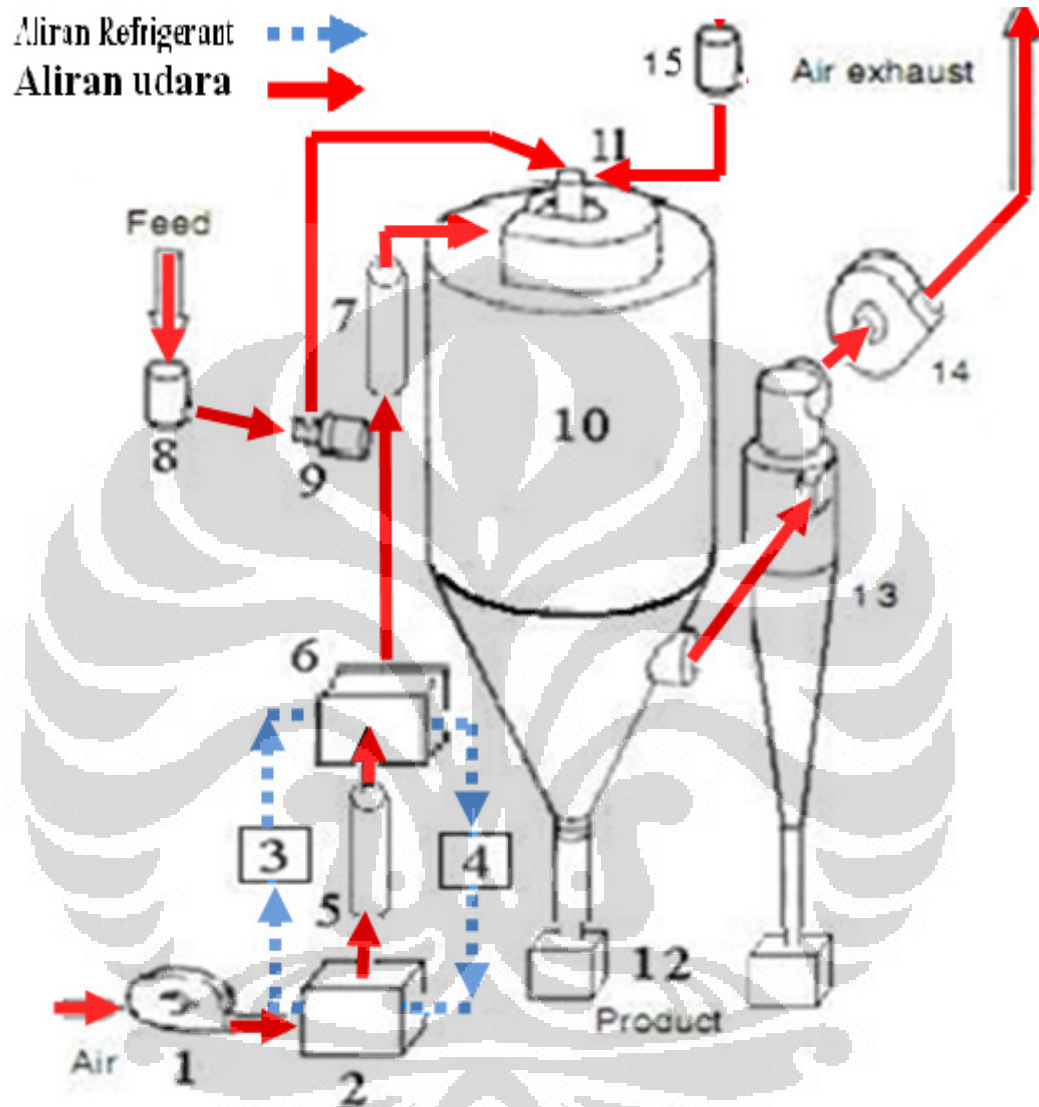
Adapun metode penelitian yang digunakan dalam tesis ini yaitu mencari variasi temperature minimum dari udara panas dan kering, yang mempercepat proses pengeringan terkait dengan debit bahan, yang menentukan besar ukuran droplet, dan laju aliran udara yang kering ketika melewati evaporator. Selanjutnya didapatkan kinerja alat spray dryer yang merupakan perbandingan besarnya daya listrik terpakai pada kebutuhan dehumidifier system refrigerasi

3.2 Alur Kerangka Penelitian

Adapun alur kerangka penelitian ini sebagai berikut:



3.3 Skema Pengering Semprot



Gambar 3.1 Skema *Spray Dryer*

1. Blower inlet
2. Evaporator
3. compresor
4. ekspanse valve needle
5. orifice
6. condensor
7. Electric Heater
8. Booster pompa

9. Peristaltic pump
10. Ruang pengering
11. Nozzle semprot
12. Downcomer/collector product
13. cyclone step 2
14. Blower Exhaust
15. Kompresor udara

Prinsip kerja mesin *spray dryer* berdasarkan skema diatas, adalah sebagai berikut :

1. langkah pertama udara lingkungan dipompakan *blower* masuk ke saluran udara yang terangkai dengan system refrigerasi, pengaturan kecepatan blower dilakukan dengan setting inverter, Variasi kecepatan blower bisa terlihat pada manometer head : 30; 50; 80; 100 (mm)
2. System refrigerasi dihidupkan dan suhu keluaran *evaporator* di setting, pada beberapa variasi suhu : 8°; 11°; 15°; 19°; 24° (Celcius), pengaturan suhu keluaran dari evaporator dilakukan dengan mengatur bukaan katup ekspansi needle, sehingga *fluide refrigerant* yang dicerat bisa menurunkan suhu udara yang dilewatkan sekaligus mengeringkan.
3. Selanjutnya udara yang sudah dikeringkan disalurkan melalui pipa orifice untuk diukur debit udara, dan diarahkan masuk ke ruang condenser untuk memanfaatkan panas buang sesuai prinsip kerja *Heat Pump*, diharapkan udara setelah melewati condenser dalam kondisi kering dan relative panas, udara kering dan panas ini akan mampu mempercepat proses pengering bahan dalam suhu rendah, yang terjadi di dalam ruang *Drying Chamber*.
4. Pompa booster yang diserikan dengan pompa peristaltic, untuk memompa fluida bahan yang akan dikeringkan, sistem seri ini bertujuan mengimbangi tekanan compressor udara yang diberikan pada variasi : 2; 3; 4 (Bar). variasi laju aliran massa bahan : 0,12; 0,21; 0,27; 0,39 (Kg/jam), kedua aliran fluida bahan dan udara masuk ke nozel untuk selanjutnya, menyembrotkan fluida dalam butiran droplet yang berukuran relative kecil dan menyebar, bergantung pada variasi tekanan udara dan laju aliran bahan diatas.

5. Kombinasi aliran fluida bahan dan udara yang dipompakan ke dalam nozel, disemprotkan ke ruang pengering utama, bertemu dengan aliran udara yang kering dan panas dari keluaran pipa condenser, selanjutnya diamati dan diukur suhu udara di ruang pengering, dimana titik kritis suhu mulai jenuh pada bahan yang sudah dikeringkan, karakteristik setiap bahan yang akan dikeringkan sangat menentukan laju pengeringan *constant rate & falling rate periode*, juga luas permukaan pengering dari sebaran droplet bisa menghasilkan suhu pengeringan yang berbeda terkait dengan variasi diatas.
6. Pemanas listrik diperlukan jika karakter bahan memerlukan suhu pengeringan diatas suhu keluaran condenser, siklon separator tahap kedua diperlukan untuk mendapatkan produk yang halus di ruang collector sebagai perpanjangan downcomer dan menampung produknya.
7. Siklus tertutup refrigerasi dipetakan pada jalur garis panah biru terputus-putus, sedangkan siklus terbuka aliran udara yang dikeringkan, hingga bertemu dengan aliran fluida bahan di ruang pengering dipetakan pada jalur garis panah merah solid, pada gambar 3.1 skema *Spray Dryer*.

3.4 Cara Pengambilan Data 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:

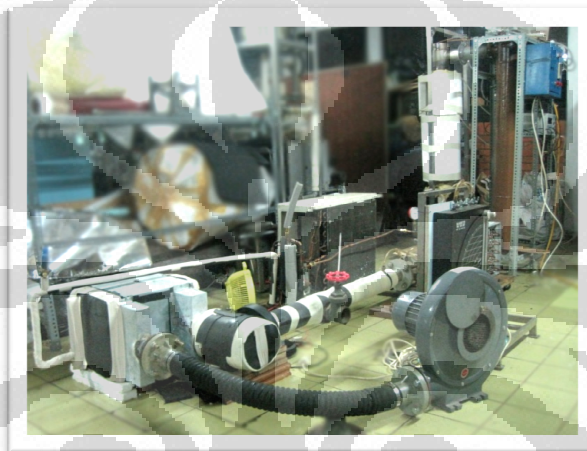
- Menyalakan *blower* pada *Water to Air Heat Transfer Appratus* kemudian mengukur laju udara masuk dengan menggunakan manometer.
- Menyalakan *kompresor* system refrigerasi kemudian mengatur katup ekspansi *needle* untuk mendapatkan suhu keluar evaporator
- Menyalakan kotak panel untuk memberikan daya pada *heater* dan mengatur suhu keluar dari *heater*.
- Menyalakan kompresor udara dan mengatur tekanan dengan menggunakan pengatur tekanan.

- Menyalakan pompa bahan dan peristatik mengatur tegangan masuk pompa.
- Mengukur laju bahan masuk dengan menggunakan bejana ukur.
- Mengukur suhu udara kering dan basah keluar pengering utama.

3.5 Deskripsi Sistem Alat Pengujian

3.5.1 Komponen Sistem

Rangkaian *Spray Dryer*, terdiri dari heater listrik dan *cyclone* terpasang pada rangka siku berongga. Sedangkan sitem dehumidifier yang terdiri dari evaporator, kondensor, blower, manometer dan compressor terletak di lantai.



Gambar 3.2 Rangkaian Spray Dryer

Berikut komponen yang terangkai dalam siklus kerja system Spray Dryer Dehumidifer refrigeration :

- *Blower*

Tipe yang dipakai *blower* sentrifugal, dengan debit maksimal 1320 m³/jam. Sedangkan untuk mengatur kecepatan aliran udara digunakan inverter sebagai input pengatur frekwensi motor.



(a)

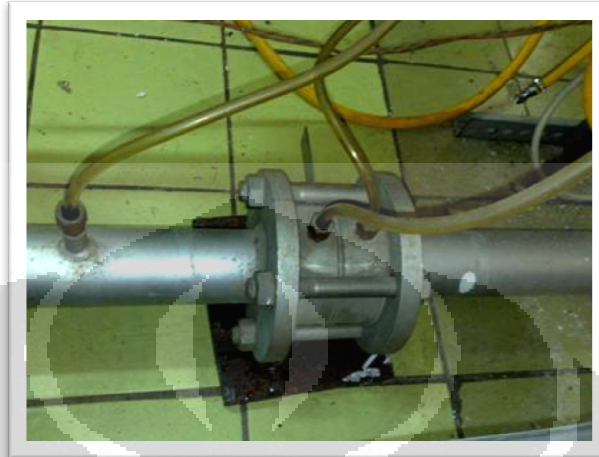


(b)

Gambar 3.3 *Blower* dan *Inverter*

- *Orifice*

Orifice digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara dari blower yang dibaca pada manometer.



Gambar 3.4 *Orifice*

- Manometer

Alat ini mengukur tekanan diferensial antara dimensi yang diukur dengan tekanan rujukan. Manometer ini satu kesatuan paket dengan *orifice* nya.

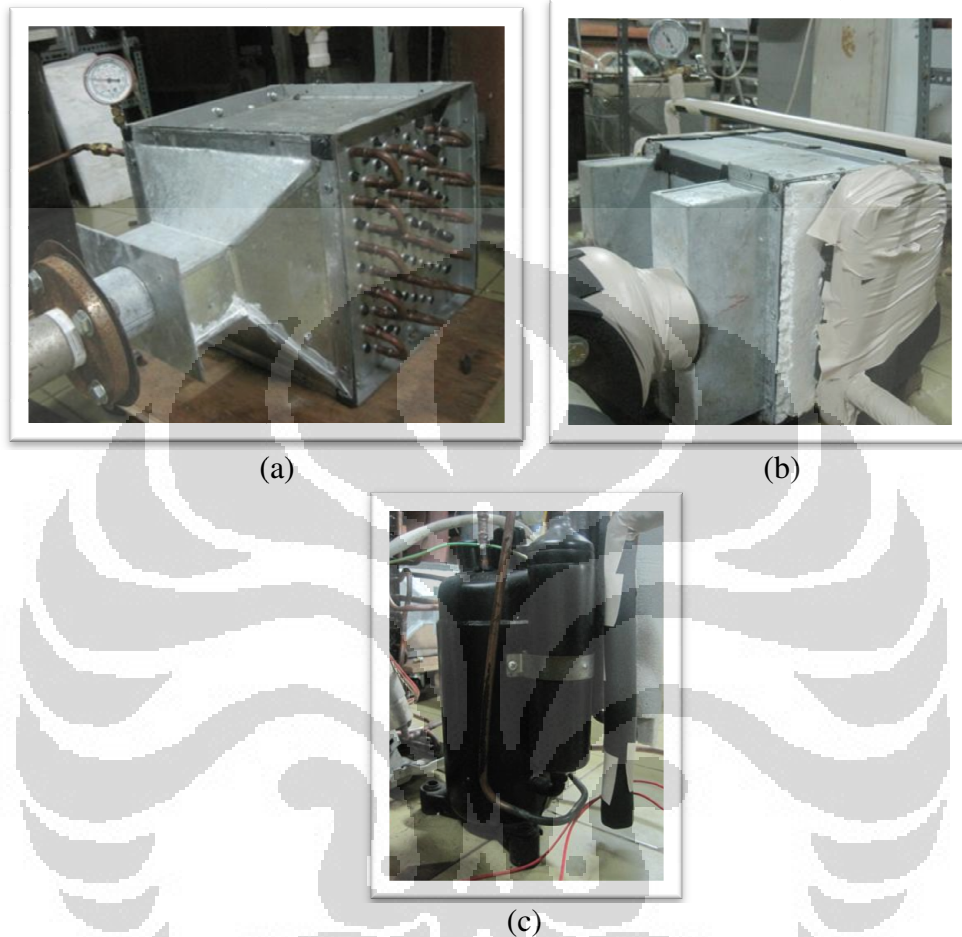


Gambar 3.5 Manometer Air

- Kondensor, Evaporator dan Kompresor

System refrigerasi dimanfaatkan untuk proses pengeringan udara luar melalui evaporator, sekaligus memanfaatkan panas buang kondensor untuk

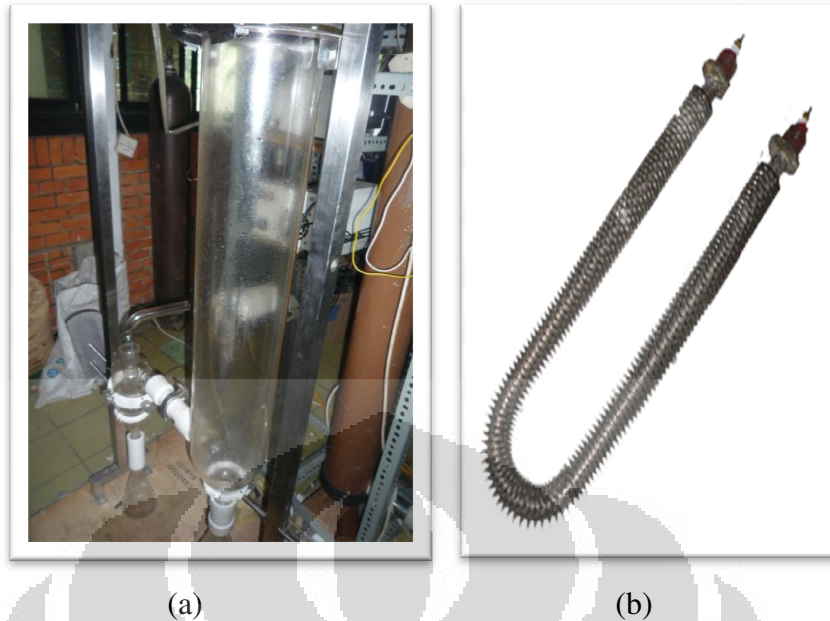
menaikkan temperature udara masukkan, Proses kondensasi udara terjadi bila temperatur udara keluar evaporator lebih rendah dari titik temperatur embunnya (*dew point*).



Gambar 3.6 (a) Kondensor ,(b) Evaporator dan (c) Kompresor

- Pemanas listrik, ruang pengering dan *cyclone*

Pemanas yang digunakan untuk menaikkan temperatur udara keluaran kondensor menggunakan pemanas listrik tipe *Fin Heating Element* yang dikendalikan oleh *controller*.. Udara yang telah dipanaskan akan diteruskan ke ruang pengering (*chamber*) yang terbuat dari kaca jenis *pyrex*. Penggunaan kaca *pyrex* ini bertujuan agar pengamatan proses pengeringan dapat terlihat jelas. Selanjutnya Dari ruang pengering, udara diteruskan ke ruang *cyclone*. Di ruang ini terjadi pemisahan antara produk serbuk dan udara panas yang dibuang melalui cerobong pembuangan.



Gambar 3.7 (a) Ruang pengeringan dan *cyclone*
(b) Fin Heating Element

- Pengatur Tekanan/*Pressure Regulator*
alat ini mengatur tekanan udara dari kompresor yang masuk ke *nozzel*. Tekanan keluaran dari kompresor bisa mencapai 8 bar.



Gambar 3.8 *Pressure Regulator*

- Pompa Booster
Pompa booster berfungsi memompa fluida bahan uji, yang di serikan dengan pompa *peristaltik* agar tekanan fluida relative, stabil dan mantap sewaktu masuk *nozzle*, dan mengimbangi tekanan *air Pressure Regulator* yang cukup kuat.



Gambar 3.9 Pompa booster

- Pompa Fluida *Peristaltik*

Pompa *peristaltik* ini mempunyai laju aliran yang relatif konstan. Prinsip kerjanya adalah berputarnya silinder head yang menekan slang, akibatnya penekanan dari silinder head yang terus menerus akan mengakibatkan terjadinya aliran fluida yang stabil & mantap pada slang. Spesifikasi pompa peristaltik yang digunakan dapat mengalirkan fluida 1,7-966 mL/menit dengan pengaturan 0-100 rpm.



Gambar 3.10 Pompa Peristaltik

- *Pneumatic Nozzle*

Pneumatic nozzle, jenis ini dikenal dengan nama *two fluid nozzle* dimana menggunakan udara bertekanan untuk mengatomisasi cairan fluida yang didorong oleh pompa peristaltik yang di serikan dengan pompa booster.



Gambar 3.11 *Pneumatic Nozzle*

- Bejana Pengukur Fluida

Alat ini berfungsi sebagai tempat penyimpanan bahan yang akan dikeringkan dan juga sebagai alat ukur laju bahan dalam (kg/s), Pengurangan berat fluida bahan uji yang dialirkan diukur setiap waktu oleh timbangan. Kemudian bahan uji ini dipompa menuju *nozzle*.



Gambar 3.12 Bejana Pengukur Fluida

- Panel Kontrol dan Termometer digital

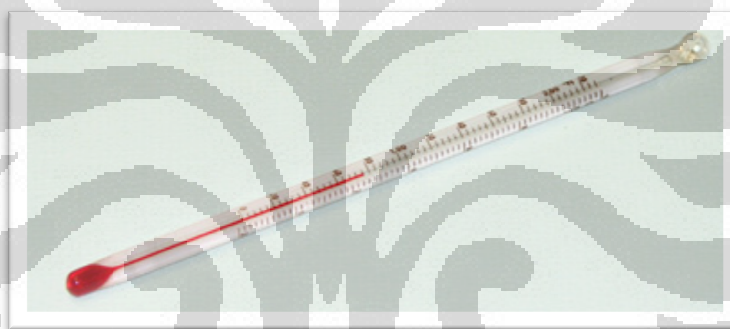
Panel kontrol digunakan sebagai terminal atau pusat kontrol dari pemanas listrik, disini kita dapat mengatur seberapa besar temperatur udara yang keluar dari pemanas. Sedangkan termometer digital digunakan untuk mengukur temperatur udara keluar evaporator, kondensor dan *cyclone*.



Gambar 3.13 Kontak Panel dan Termometer digital

- Termometer alkohol

Termometer ini digunakan untuk mengukur temperatur udara kering (*dry bulb*) dan temperatur udara basah (*wet bulb*).



Gambar 3.14 Termometer

3.6 Bahan Uji

Untuk keperluan pengujian sistem alat digunakan bahan larutan air maltodekstrin 10%. Maltodekstrin merupakan gula tidak manis dan berbentuk tepung berwarna putih dengan sifat larut dalam air. Maltodekstrin dihasilkan dari hidrolisis pati jagung secara tidak sempurna dengan asam atau enzim dan juga merupakan polimer sakarida. Pada proses produksi umumnya dilakukan penambahan maltodekstrin ini sebagai filler. Filler berfungsi sebagai pengikat nutrisi yang terkandung dalam sari buah, belimbing dan sebagainya. Penambahan ini dilakukan karena total padatan terkandung dalam sari buah contohnya belimbing yang sangat kecil yaitu 3-5 %.

3.7 Variasi Parameter Pengeringan

pengambilan data sampel pengering semprot perlu ada variasi parameter yang akan mempengaruhi hasil pengeringan. Variasi-variasi parameter nya adalah sebagai berikut.

Ketinggian air manometer : 30; 50; 80; 100 (mm)

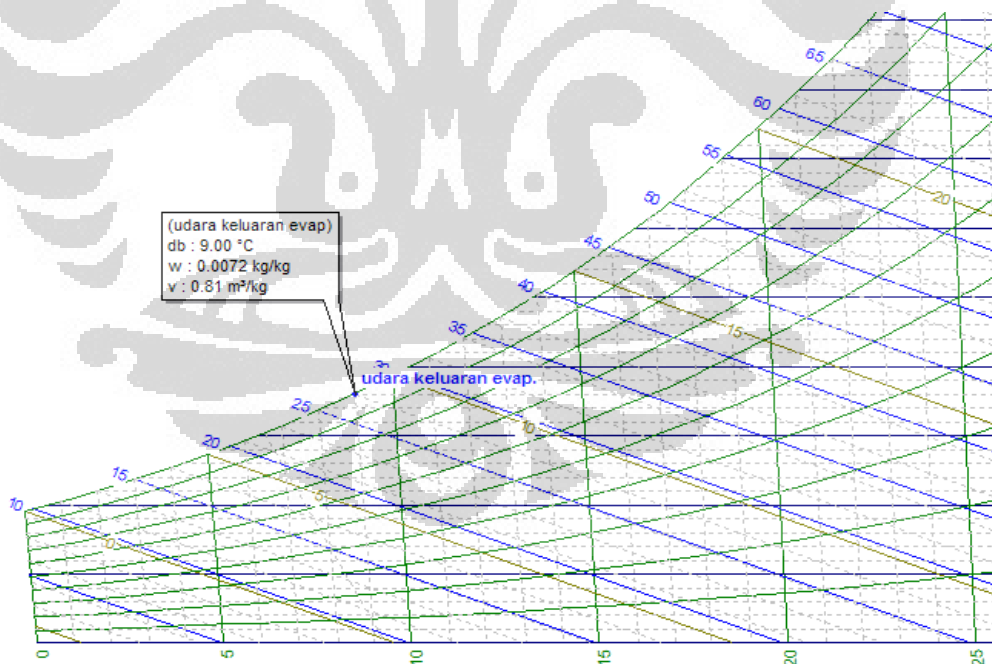
Laju aliran massa bahan : 0,12; 0,21; 0,27; 0,39 (kg/jam)

Temperatur udara keluar evaporator : 8°; 11°; 15°; 19° ; 24° (Celcius)

Kemudian dari berbagai variasinya dicari temperatur minimal pengeringan sampai bahan uji kering

3.8 Menghitung Kelembaban Udara Keluaran Evaporator

Kondisi udara keluaran dari evaporator memiliki RH 100% (ditandai dengan terbentuknya kondensat) dan *dry bulb* (db) udaranya. dengan bantuan diagram psikrometrik dapat ditentukan kelembaban dan volume spesifik udara kering. sebagai Contoh Temperatur udara 9°C pada kondisi kering, dapat ditentukan kelembaban dan volume spesifik udara kering (RH 100%)

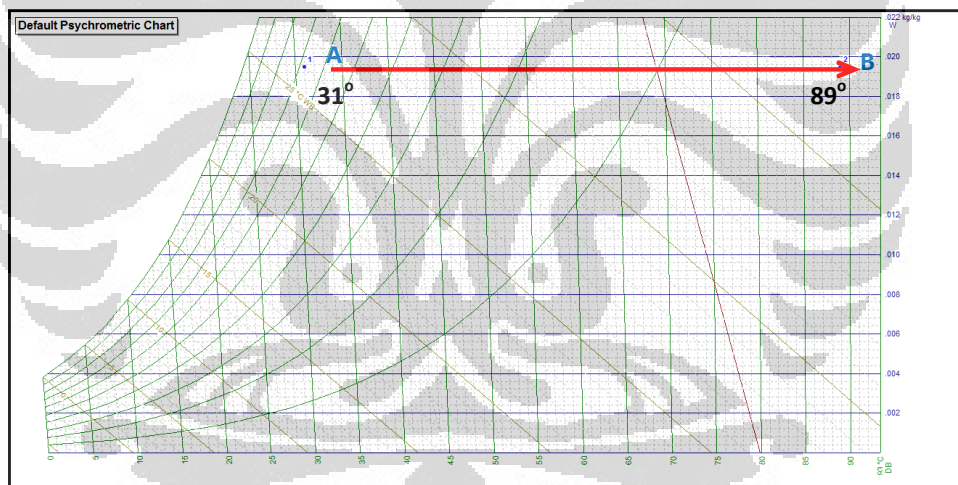


Gambar 3.15 Diagram Psikrometrik

Dari diagram psikrometrik didapat: kelembaban 0.007 kg/kg udara kering dan volume spesifik 0.81 m³/kg.

3.9 Proses Pengkondisian Udara

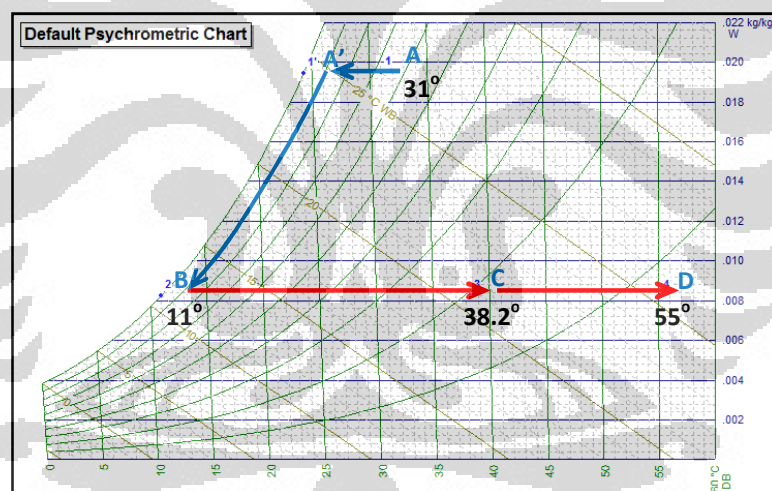
Di bawah ini akan dijelaskan mengenai proses pengkondisian udara pengering semprot tipe pemanas listrik dan dengan sistem dehumidifikasi pompa kalor. Pada pengering semprot tipe pemanas listrik, udara hanya di panaskan oleh pemanas listrik. Pada proses pemanasan ini, terjadi peningkatan temperatur bola kering, temperatur bola basah, entalpi, dan volume spesifik dari udara lembab sedangkan pada kelembaban relatif terjadi penurunan. Perubahan tidak terjadi pada rasio kelembaban, temperatur titik embun, dan tekanan uap parsial. Gambar 3.16 memperlihatkan contoh proses pemanasan pada diagram psikometerik. Titik A adalah temperatur lingkungan baik temperatur bola kering ($T_{db_a} = 31^\circ\text{C}$) dan basah ($T_{wb_a} = 26^\circ\text{C}$). Titik B terjadi kenaikan temperatur bola kering ($T_{db_b} = 89^\circ\text{C}$) dan temperatur bola basah ($T_{wb_b} = 36.7^\circ\text{C}$) dengan nilai rasio kelembaban konstan ($\omega = 0.01922 \text{ kg/kg}$).



Gambar 3.16 Proses pemanasan udara pada tipe pemanas listrik

Sedangkan pada tipe pemanas listrik dengan sistem dehumidifikasi pompa kalor, terjadi beberapa proses pengkondisian udara. Proses ini dilakukan dengan cara melewati udara pada koil pendingin atau evaporator dimana temperaturnya lebih rendah dari temperatur *dew point* udara sehingga terjadi penurunan kalor laten dan kalor sensibel yang mengakibatkan kondensasi uap air di udara. Gambar 3.17 memperlihatkan contoh proses dehumidifikasi dan pemanasan udara pada diagram psikometerik Dimulai dari proses pendinginan dari titik A ($T_{db_a} = 31^\circ\text{C}$; $T_{wb_a} = 26^\circ\text{C}$). Proses ini hanya disebabkan oleh perubahan temperatur bola kering

udara tanpa perubahan rasio kelembaban. Garis proses pada psikometrik adalah garis horizontal ke arah kiri sampai titik A' ($T_{db_a} = 24,29^{\circ}\text{C}$; $\text{RH} = 100\%$). Kemudian setelah mencapai titik *dew point*, udara tadi kembali diturunkan temperaturnya melewati garis kelembaban 100% sampai dengan temperatur target titik B ($T_{db_b} = 11^{\circ}\text{C}$; $\text{RH} = 100\%$). sesuai nilai rasio kelembaban yang diinginkan ($\omega_b = 0.00816 \text{ kg/kg}$). Setelah itu udara dilewatkan melalui kondensor. Di sini panas kondensor dimanfaatkan untuk menaikkan temperatur udara sampai titik C ($T_{db_c} = 38.2^{\circ}\text{C}$; $\omega_c = 0.00816 \text{ kg/kg}$). Garis prosesnya pada psikometrik adalah garis horizontal ke arah kanan, yang terjadi perubahan temperatur bola kering udara tanpa perubahan rasio kelembaban. Namun untuk kebutuhan temperatur pengeringan yang lebih tinggi diperlukan prose pemanasan kembali oleh pemanas listrik, sehingga udara dari titik C akan berubah kondisinya setelah pemanasan ulang ke titik D ($T_{db_d} = 55^{\circ}\text{C}$; $\omega_c = 0.00816 \text{ kg/kg}$).



Gambar 3.17 Proses dehumidifikasi dan pemanasan udara

Pada percobaan variasi dari laju aliran massa bahan dilakukan dengan merubah-ubah putaran pompa peristaltik. Metode pengukurannya adalah dengan menghitung perubahan massa bahan dalam wadah dalam jangka waktu tertentu pada setiap perubahan putaran dari pompa peristaltik. Untuk beberapa titik dilakukan pengukuran dan didapat hasil sebagai berikut:

rpm	kg/jam	kg/s
2	0.12	0.0000333
3.2	0.21	0.0000583

4	0.27	0.0000750
6.5	0.39	0.0001083

Untuk data yang tidak tercantum selama masih dalam range pengukuran di atas maka dilakukan interpolasi dari hasil pengamatan dan perhitungan secara interpolasi hasil yang didapat tidak jauh berbeda.

3.10 Contoh Perhitungan dari Data Eksperimen

1. Diukur suhu udara masuk blower $T_{db} = 27^{\circ} \text{C}$ & $T_{wb} = 25^{\circ} \text{C}$, didapat data dari diagram psikometric :
 - $\omega_1 = 0.01911 \text{ Kj/kg}$
 - $h_1 = 75.94 \text{ Kj/kg}$
 - $SV_1 = 0.8765 \text{ m}^3/\text{kg}$
 - $SW_1 = 1.1403 \text{ kg/m}^3$
2. Blower diset pada inverter hingga indicator manometer mencapai $h = 30 \text{ mm}$
3. katup ekspansi *needle system* refrigerant diatur hingga suhu keluaran evaporator mencapai suhu 8°C .
4. pompa *peristaltic* di stel pada flow bahan $\dot{m}_{\text{bahan}} = 0.12 \text{ kg/jam}$
5. Diukur suhu kritis bahan relative kering pada suhu heater 34°C , dari diagram psikrometric didapatkan :
 - $h_4 = 51.259 \text{ Kj/kg}$
 - $SV_4 = 0.8795 \text{ m}^3/\text{kg}$
6. Dengan input masukan suhu 8°C dari diagram psikometric didapat :
 - $\omega_2 = 0.0067 \text{ Kj/kg}$
 - $h_2 = 24.791 \text{ Kj/kg}$
 - $SV_2 = 0.805 \text{ m}^3/\text{kg}$
 - $SW_2 = 1.242 \text{ kg/m}^3$
7. Mengukur flow udara masuk saluran orifice dengan memakai rumus persamaan yang baku dari produsen alat :

$$Q_a = 0,01242 \alpha \cdot (d_o)^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma^a}}$$

Keterangan :

$$\alpha = \text{flow coefficient} = 0,8534$$

$$d_o = \text{Orifice diameter} = 28,3 \text{ mm}$$

$$Y = \text{Air specific weight} = 1.242$$

$$\Delta p = \text{tinggi manometer} = h = 30 \text{ mm}$$

Maka didapat :

$$\text{Flow udara} = Q_a = m_a = 0.01242 \times 0,8534 \times 28,3^2 \sqrt{\frac{30}{1.242}}$$

$$m_a = 0.01159 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.11 Perhitungan Kinerja Spray Dryer

1. Mencari laju udara kering : $\dot{m}_a = \frac{m_a}{1 + \omega_1} = \frac{0.01159}{1 + 0.01911} = 0.01354 \text{ m}^3/\text{s}$
2. Mencari laju udara uap jenuh :
 $\dot{m}_w = \dot{m}_a(\omega_1 - \omega_2) = 0.01354(0.01911 - 0.0067) = 0.00017 \text{ m}^3/\text{s}$
3. Dari diagram psikrometric didapat $h_w = 33.72 \text{ Kj/kg}$
4. Didapatkan $Q_{\text{evap}} = \dot{m}_a(h_1 - h_2) - \dot{m}_w \times h_w$
 $= 0.01354(75.94 - 24.791) - 0.00017 \times 33.72$
 $= 0.6867 \text{ Kj/s}$
5. Dari referensi Kondisi ideal $\text{COP}_R = 2.8$
6. Mencari Daya compressor : $P_{\text{comp}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{\text{COP}_R} = \frac{0.6867}{2.8} = 0.2453 \text{ Kj/s}$
7. Didapatkan $Q_{\text{kond}} = Q_{\text{evap}} + P_{\text{comp}}$
 $= 0.6867 + 0.2453 = 0.932 \text{ Kj/s}$
8. Mencari $h_3 = \frac{Q_{\text{kond}}}{\dot{m}_a} + h_2$
 $= \frac{0.9320}{0.01354} + 24.791 = 93.64 \text{ Kj/kg}$
9. Didapatkan daya heater : $P_{\text{heater}} = \dot{m}_a \times (h_4 - h_2)$
 $= 0.01354 \times (51.259 - 24.791) = 0.3583 \text{ Kj/s}$
10. Dari diagram psikrometric didapat $h_{fg} = 2410.09 \text{ Kj/kg}$
11. Mencari $Q_{\text{uapair}} = \frac{\dot{m}_{\text{bahan}} \times h_{fg}}{3600}$
 $= \frac{0.12 \times 2410.09}{3600} = 0.08034 \text{ Kj/kg}$
12. Didapat daya listrik $P_{\text{listrik}} = P_{\text{comp}} + P_{\text{heater}}$
 $= 0.2453 + 0.3583 = 0.6035 \text{ Kj/s}$

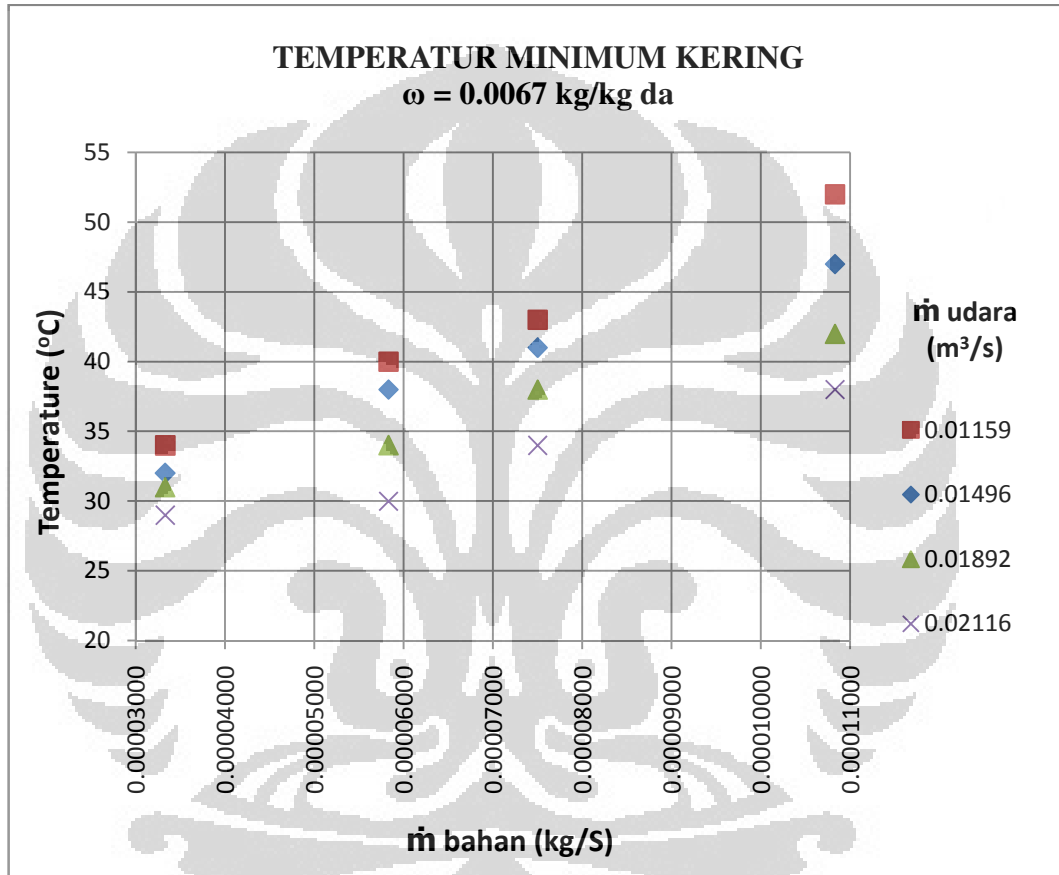
BAB 4

ANALISA DATA HASIL EKSPERIMEN

4.1 Data Hasil Pengujian :

Data hasil pengujian yang ditampilkan dalam grafik, adalah hasil perhitungan data eksperimen, yang terdapat dalam data lampiran secara lengkap.

4.2 Temperatur Minimum Kering Berdasarkan ω Udara Konstan



Gambar 4.1 Grafik Temperatur minimum kering berdasarkan ω udara konstan = 0.0067 kg/kg da

4.2.1 Analisa Temperatur Minimum Kering Berdasarkan Kelembaban (ω) :

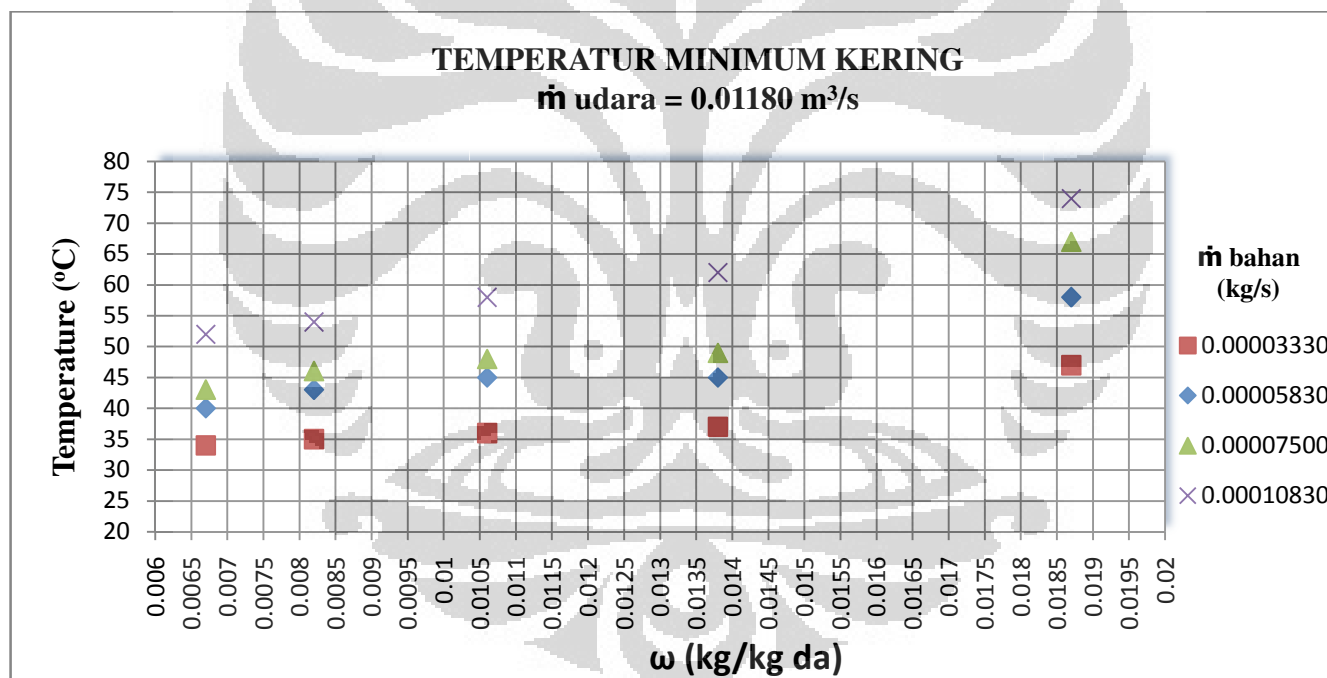
1. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan $\omega = 0.0067$, dan suhu udara keluar evaporator 8°C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat suhu terendah = 29°C pada Flow udara = $0.02116 \text{ m}^3/\text{s}$.
2. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan $\omega = 0.0082$, dan suhu udara keluar evaporator 11°C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat suhu terendah = 29°C pada Flow udara = $0.02130 \text{ m}^3/\text{s}$.

3. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan $\omega = 0.0106$, dan suhu udara keluar evaporator 15°C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat suhu terendah = 31°C pada Flow udara = $0.02149\text{ m}^3/\text{s}$.
4. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan $\omega = 0.0138$, dan suhu udara keluar evaporator 19°C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat suhu terendah = 33°C pada Flow udara = $0.02169\text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.2 Analisa Temperatur Minimum Kering ω Konstan terhadap Variable Bebas

Data lengkap hasil pengujian alat yang bisa dilihat dihalaman lampiran, menunjukkan temperatur terendah pengeringan berkaitan erat dengan debit udara dan laju aliran fluida bahan.

4.3 Temperatur Minimum Kering berdasarkan \dot{m} Udara Konstan



Gambar 4.2 Grafik Temperatur minimum kering berdasarkan \dot{m} udara konstan = $0.01180\text{ m}^3/\text{s}$

4.3.1 Temperatur Minimum Kering berdasarkan \dot{m} Udara :

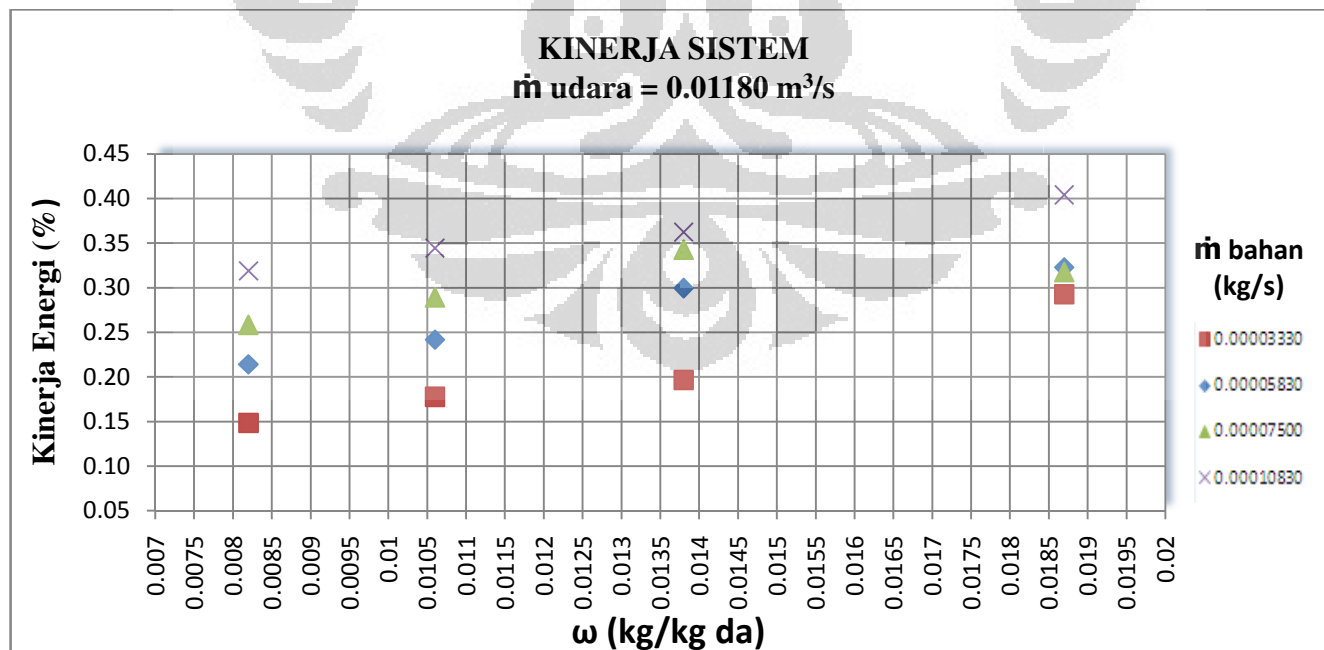
1. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan \dot{m} udara = $0.01180\text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 29°C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat ω terendah = 0.0067 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .

2. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan \dot{m} udara = $0.01524 \text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 29° C , pada tinggi head manometer = 100 mm , didapat ω terendah = 0.0067 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .
3. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan \dot{m} udara = $0.01927 \text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 31° C , pada tinggi head manometer = 100 mm , didapat ω terendah = 0.0067 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .
4. Dari Table Temperatur minimum kering dengan konstan \dot{m} udara = $0.02155 \text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 33° C , pada tinggi head manometer = 100 mm , didapat ω terendah = 0.0067 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .

4.3.2 Temperatur Minimum Kering berdasarkan \dot{m} Udara Konstan terhadap Variable Bebas

Temperature minimum kering pada debit udara konstan, sangat terpengaruh oleh variasi laju aliran fluida bahan dan kelembaban fluida inputannya, hal ini bisa dilihat dari data table data pengujian pada lampiran

4.4 Kinerja Sistem berdasarkan \dot{m} Udara Konstan



Gambar 4.2 Kinerja sistem berdasarkan \dot{m} udara konstan = $0.01180 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.1 Perbandingan Kinerja Spray dryer Dehumidifier berdasarkan \dot{m} Udara

1. Dari Table Kinerja System konstan \dot{m} udara = $0.011880 \text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 29° C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat Kinerja Spray Dryer = 0.22 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .
2. Dari Table Kinerja System konstan \dot{m} udara = $0.01524 \text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 29° C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat Kinerja Spray Dryer = 0.24 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .
3. Dari Table Kinerja System konstan \dot{m} udara = $0.01927 \text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 31° C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat Kinerja Spray Dryer = 0.246 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .
4. Dari Table Kinerja System konstan \dot{m} udara = $0.02155 \text{ m}^3/\text{s}$, dan suhu udara keluar ruang pengering 35° C , pada tinggi head manometer = 100 mm, didapat Kinerja Spray Dryer = 0.250 pada \dot{m} bahan = 0.0000330 Kg/s .

4.4.2 Kinerja Spray Dryer pada \dot{m} Udara Konstan Terhadap Variable Bebas

Kinerja sistem yang terjadi pada debit udara konstan, terpengaruh pada kelembaban udara dan laju aliran fluida bahan yang dikeringkan, bisa dianalisa dari data pengujian lengkap yang dilampirkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian alat Spray Dryer dan analisa data yang didapat maka dapat disimpulkan :

1. Temperature minimum yang didapat pada aliran udara masukan yang terbesar, dibandingkan dengan laju aliran udara yang lebih kecil, didapatkan suhu pengeringan yang lebih tinggi, didapat suhu udara keluar ruang pengering 29°C dengan kondisi produk kering, akibat dari waktu yang singkat antara kontak udara luar ketika masuk ke ruang evaporator, sehingga persentase udara kering lebih sedikit.
2. Semakin besar tekanan debit udara kompresor yang di kenakan pada bahan, maka butiran droplet yang dihasilkan nozel lebih kecil dan halus, sehingga luas permukaan yang akan di keringkan lebih besar, dan memudahkan pengeringan bahan pada temperature yang lebih rendah, didapatkan pada kelembaban terendah $\omega = 0.0067$ dengan variasi m udara = $0.011880\text{ m}^3/\text{s}$
3. Kinerja alat Spray Dryer membutuhkan daya yang besar, bergantung pada produk yang dihasilkan berdasarkan analisa ekonomis, semakin tinggi nilai produk yang dihasilkan bisa dibandingkan dengan energy yang terpakai, termasuk investasi totalnya. didapat Kinerja Spray Dryer = 0.404 dengan variasi m udara = $0.011880\text{ m}^3/\text{s}$
4. Suhu rendah pengeringan selama pengujian alat *spray dryer* pada kisaran $29^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$, menghasilkan produk dengan nilai kandungan organic yang relative baik, karena masih dibawah sensitive heat material produk dimana setiap bahan memiliki karakter suhu minimum rusak kandungan vitamin dan protein yang berbeda-beda.

5.2 Saran

Saran yang bisa dijadikan sebagai masukan untuk riset berikutnya :

1. Penggunaan bahan kaca pirex yang dimaksudkan lebih memudahkan pengamatan selama proses pengering, memerlukan dinding penahan suhu

lingkungan yang tembus pandang, supaya kondisi pengeringan di dalam spray dryer tidak terpengaruh udara lingkungan.

2. Penggunaan control otomatis pada jenis expansive valve needle terkait dengan sensor termokopel dan kelembaban udara, bisa menghasilkan data output yang lebih akurat.
3. Semakin halus produk diameter partikelnya, semakin banyak serbuk produk terbang keluar bersama aliran fluida, maka diperlukan metode yang lebih baik untuk menangkap produk halus, dimana desain downcomer yang telah disimulasikan, bisa dibuat secara akurat dan presisi



DAFTAR PUSTAKA

- V.T. Buglayev, F.V. Vasilyev, A.S. Strebkov, Experimental investigation of heat transfer in evaporative cooling of air flows with fine droplets, *Heat Transfer—Soviet Res.* 17 (1985) 97–103.
- Chua, K.J., Chou, S. K., (2003), Heat pump Drying Technology, Regional Workshop on Drying Technology, ASEAN SCNCER, hal 113 -122
- 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).
- W. M .Kays and A. L London, *Compact Heat Exchangers* (USA: McGraw-Hill, 1988)
- Reid, Robert C., Prausnitz John M., Poling Bruce E., *The Properties of Gases & Liquids* (Singapore : McGraw-Hill, 1988)
- Marquardt, Niels, *Introduction To The Principles Of Vacuum Physics*, (Germany:1999)
- Chua, K.J., Chou, S. K., (2003), Heat pump Drying Technology, Regional Workshop on Drying Technology, ASEAN SCNCER, hal 113 -122

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Eksperimen

Suhu Udara Keluar Evaporator (°C)	ω_2 (kg/kg da)	h_2 (kJ/kg)	SW ₂ (kg/m ³)	SV ₂ (m ³ /kg)	Manometer (mm)	Flow udara (m ³ /s)	\dot{m}_{bahan} (kg/jam)	Temperatur kritis (°C)	h_4 (kJ/kg)	SV ₄ (m ³ /kg)	Kondisi Udara Masuk Blower	
											Tdb (°C)	Twb (°C)
8	0.0067	24.79	1.242	0.805	30	0.01159	0.12	34	51.259	0.8795	27	25
							0.21	40	57.367	0.8967		
							0.27	43	60.421	0.9052		
							0.39	52	69.584	0.931		
					50	0.01496	0.12	32	49.223	0.8737	27	24
							0.21	38	55.331	0.8909		
							0.27	41	58.385	0.8995		
							0.39	47	64.493	0.9167		
					80	0.01892	0.12	31	48.205	0.8709	28	24
							0.21	34	51.259	0.8795		
							0.27	38	55.331	0.8909		
							0.39	42	59.403	0.9024		
100	0.02116	0.12	29	46.169	0.8652	28	24					
		0.21	30	47.187	0.868							
		0.27	34	51.259	0.8795							

							0.39	38	55.331	0.8909		
11	0.0082	31.65	1.226	0.816	30	0.01166	0.12	35	56.144	0.8845	28	25
							0.21	43	64.31	0.9074		
							0.27	46	67.372	0.916		
							0.39	54	75.538	0.939		
					50	0.01506	0.12	33	54.102	0.8787	28	25
							0.21	39	60.227	0.8959		
							0.27	42	63.289	0.9045		
							0.39	45	66.351	0.9132		
					80	0.01905	0.12	32	53.082	0.8758	28	25
							0.21	36	57.165	0.8873		
							0.27	39	60.227	0.8959		
							0.39	43	64.31	0.9074		
					100	0.02130	0.12	29	50.019	0.8672	28	25
							0.21	31	54.638	0.8744		
							0.27	35	56.144	0.8845		
							0.39	39	60.227	0.8959		

h_1 (kJ/kg)	SV_1 (m ³ /kg)	ω_1 (kg/kg da)	$\dot{m}_{da} =$ $ma/(1+\omega_1)$	$\dot{m}_w =$ $mda(\omega_1 - \omega_2)$	h_w (kJ/kg)	Q_{evap} (kJ/s)	P_{comp} (kJ/s)	COP_R	Q_{kond} (kJ/s)	h_3 (kJ/kg)	P_{heater} (kJ/s)	$P_{listrik}$ (kJ/s)	Kinerja	h_{fg} (kJ/kg)	Q_{uap} air (kJ/s)
75.94	0.8765	0.01911	0.01354	0.00017	33.72	0.6867	0.2453	2.8	0.9320	93.6396	0.35829	0.6035	0.13	2410.29	0.08034
75.94	0.8765	0.01911	0.01354	0.00017	33.72	0.6867	0.2453	2.8	0.9320	93.6396	0.44097	0.6862	0.20	2405.98	0.14035
75.94	0.8765	0.01911	0.01354	0.00017	33.72	0.6867	0.2453	2.8	0.9320	93.6396	0.48231	0.7276	0.25	2398.79	0.17991
75.94	0.8765	0.01911	0.01354	0.00017	33.72	0.6867	0.2453	2.8	0.9320	93.6396	0.60634	0.8516	0.30	2377.10	0.25752
71.846	0.8743	0.0175	0.01753	0.00019	33.72	0.8183	0.2922	2.8	1.1105	88.1571	0.42818	0.7204	0.11	2425.05	0.08084
71.846	0.8743	0.0175	0.01753	0.00019	33.72	0.8183	0.2922	2.8	1.1105	88.1571	0.53522	0.8275	0.17	2410.76	0.14063
71.846	0.8743	0.0175	0.01753	0.00019	33.72	0.8183	0.2922	2.8	1.1105	88.1571	0.58874	0.8810	0.20	2403.58	0.18027
71.846	0.8743	0.0175	0.01753	0.00019	33.72	0.8183	0.2922	2.8	1.1105	88.1571	0.69579	0.9880	0.26	2389.18	0.25883
71.898	0.8767	0.0171	0.02215	0.00023	33.72	1.0355	0.2725	3.8	1.3080	83.8516	0.51853	0.7910	0.10	2427.43	0.08091
71.898	0.8767	0.0171	0.02215	0.00023	34.72	1.0352	0.2157	4.8	1.2509	81.2756	0.58617	0.8018	0.18	2410.29	0.14060
71.898	0.8767	0.0171	0.02215	0.00023	35.72	1.0350	0.1785	5.8	1.2135	79.5844	0.67635	0.8548	0.21	2410.76	0.18081
71.898	0.8767	0.0171	0.02215	0.00023	36.72	1.0348	0.1522	6.8	1.1870	78.3875	0.76653	0.9187	0.28	2401.19	0.26013
71.898	0.8767	0.0171	0.02476	0.00026	33.72	1.1577	0.4135	2.8	1.5712	88.246	0.52933	0.9428	0.09	2432.17	0.08107
71.898	0.8767	0.0171	0.02476	0.00026	33.72	1.1577	0.4135	2.8	1.5712	88.246	0.55453	0.9680	0.15	2429.80	0.14174
71.898	0.8767	0.0171	0.02476	0.00026	33.72	1.1577	0.4135	2.8	1.5712	88.246	0.65535	1.0688	0.17	2410.29	0.18077
71.898	0.8767	0.0171	0.02476	0.00026	33.72	1.1577	0.4135	2.8	1.5712	88.246	0.75618	1.1696	0.22	2410.76	0.26117
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00014	46.31	0.5931	0.2118	2.8	0.8049	91.1764	0.33118	0.5430	0.15	2417.91	0.08060

75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00014	46.31	0.5931	0.2118	2.8	0.8049	91.1764	0.44162	0.6534	0.21	2398.79	0.13993
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00014	46.31	0.5931	0.2118	2.8	0.8049	91.1764	0.48302	0.6949	0.26	2391.59	0.17937
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00014	46.31	0.5931	0.2118	2.8	0.8049	91.1764	0.59346	0.8053	0.32	2372.26	0.25699
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00018	46.31	0.7657	0.2735	2.8	1.0392	91.1764	0.3919	0.6654	0.12	2422.67	0.08076
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00018	46.31	0.7657	0.2735	2.8	1.0392	91.1764	0.49884	0.7723	0.18	2408.37	0.14049
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00018	46.31	0.7657	0.2735	2.8	1.0392	91.1764	0.5523	0.8258	0.22	2401.19	0.18009
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00018	46.31	0.7657	0.2735	2.8	1.0392	91.1764	0.60576	0.8792	0.29	2393.99	0.25935
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00023	46.31	0.9686	0.3459	2.8	1.3145	91.1764	0.4732	0.8191	0.10	2425.05	0.08084
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00023	46.31	0.9686	0.3459	2.8	1.3145	91.1764	0.56337	0.9093	0.15	2415.53	0.14091
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00023	46.31	0.9686	0.3459	2.8	1.3145	91.1764	0.63099	0.9769	0.18	2408.37	0.18063
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00023	46.31	0.9686	0.3459	2.8	1.3145	91.1764	0.72115	1.0671	0.24	2398.79	0.25987
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00026	46.31	1.0829	0.3867	2.8	1.4696	91.1764	0.45342	0.8402	0.10	2432.17	0.08107
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00026	46.31	1.0829	0.3867	2.8	1.4696	91.1764	0.56747	0.9542	0.15	2427.43	0.14160
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00026	46.31	1.0829	0.3867	2.8	1.4696	91.1764	0.60465	0.9914	0.18	2417.91	0.18134
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00026	46.31	1.0829	0.3867	2.8	1.4696	91.1764	0.70546	1.0922	0.24	2408.37	0.26091
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00011	63.07	0.4528	0.1617	2.8	0.6145	87.445	0.29116	0.4529	0.18	2415.53	0.08052

15	0.0106	42.01	1.204	0.83	30	0.01177	0.12	36	63.539	0.8908	28	25
							0.21	45	72.766	0.9168		
							0.27	48	75.841	0.9254		
							0.39	58	86.093	0.9542		
					50	0.01519	0.12	34	61.488	0.8851	28	25
							0.21	40	67.64	0.9023		
							0.27	45	72.766	0.9168		
							0.39	53	80.967	0.93398		
					80	0.01922	0.12	32	59.438	0.8793	28	25
							0.21	37	64.564	0.8937		
							0.27	40	67.64	0.9023		
							0.39	45	81.179	0.9215		
100	0.02149	0.12	31	58.413	0.8764	28	25					
		0.21	33	60.463	0.8822							
		0.27	38	65.589	0.8966							
		0.39	45	72.766	0.9168							
19	0.0138	54.08	1.182	0.846	30	0.01188	0.12	37	76.632	0.8981	29	25
							0.21	45	80.879	0.9213		
							0.27	49	85.003	0.9329		
							0.39	62	98.405	0.9705		

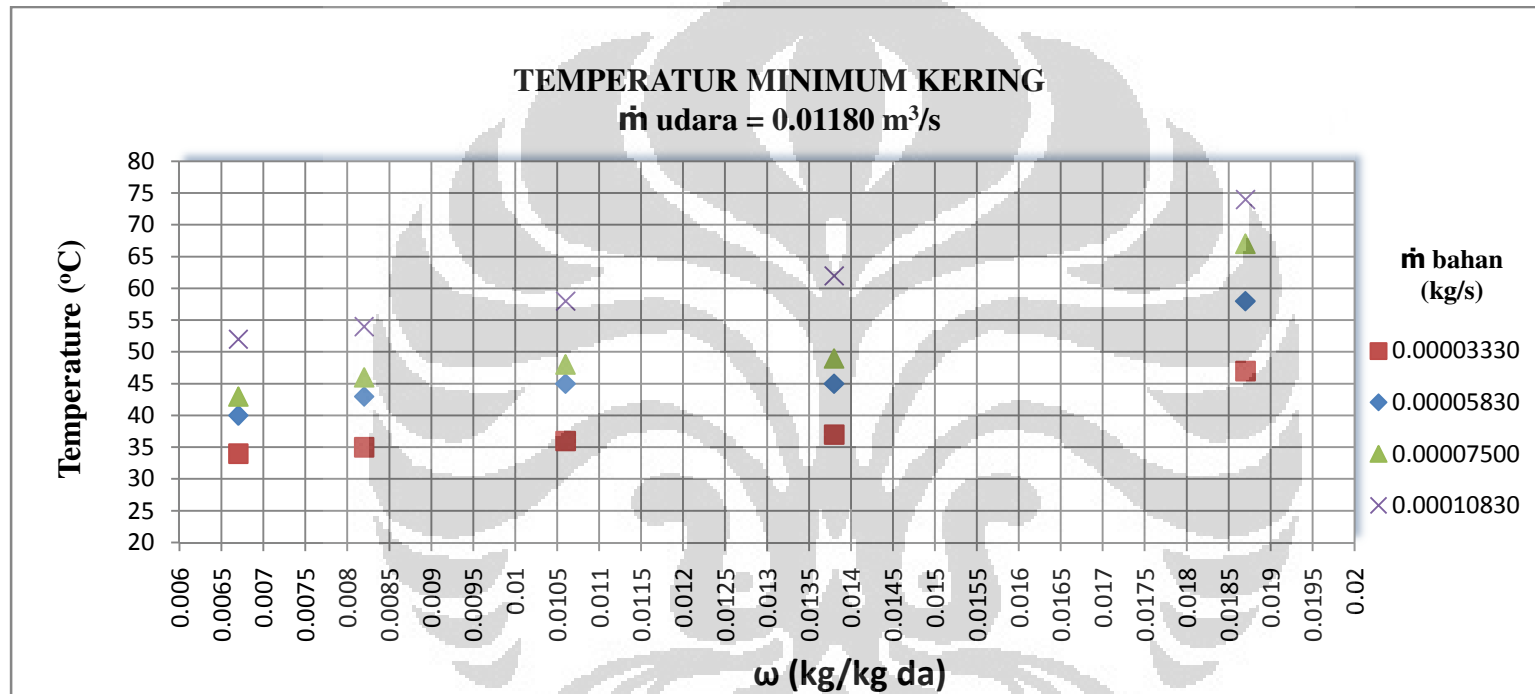
					50	0.01534	0.12	35	70.57	0.8923	29	25
							0.21	40	75.725	0.9068		
							0.27	47	82.941	0.9271		
							0.39	57	93.25	0.9561		
					80	0.01940	0.12	33	68.509	0.8866	29	25
							0.21	38	73.663	0.901		
							0.27	44	79.848	0.9184		
							0.39	55	91.188	0.9503		
					100	0.02169	0.12	33	68.509	0.8866	28	25
							0.21	35	70.57	0.8923		
							0.27	38	73.663	0.901		
							0.39	52	88.096	0.9416		

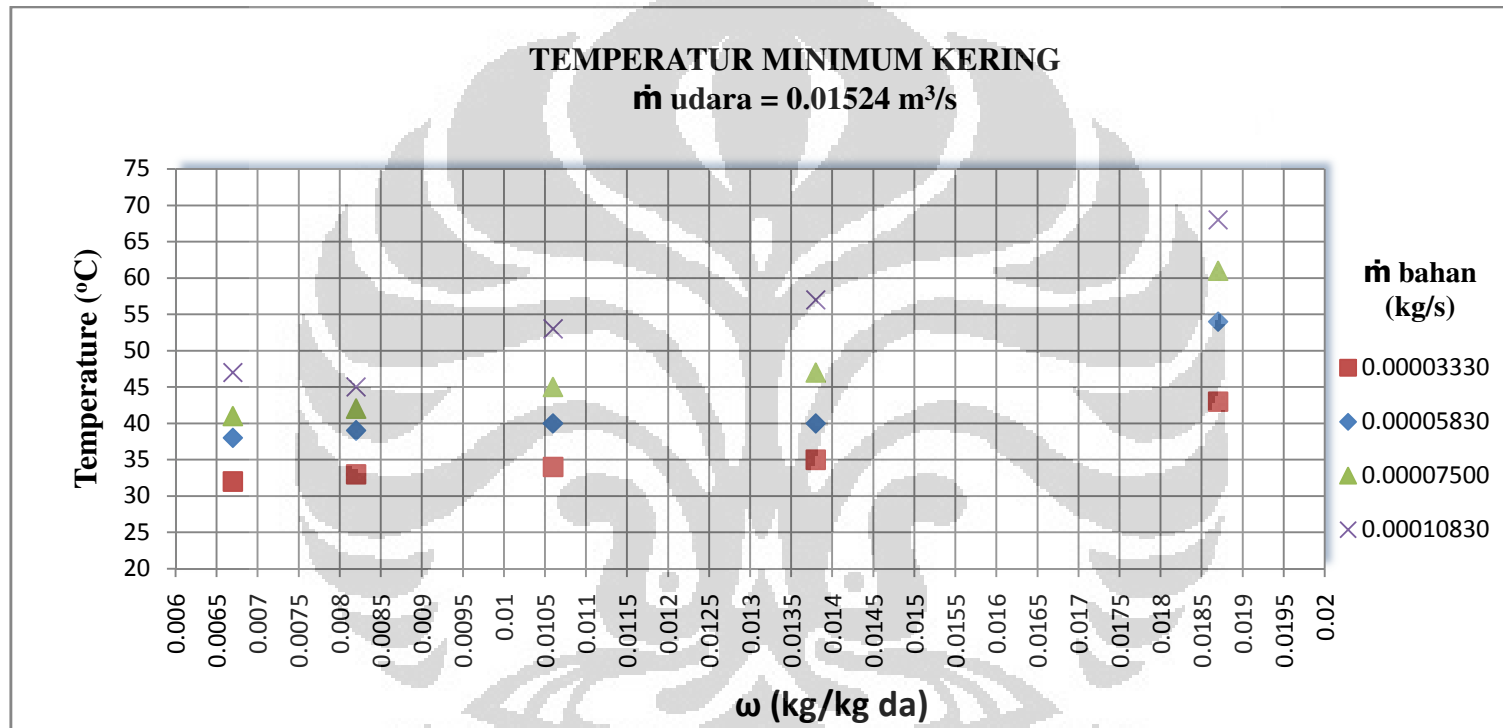
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00011	63.07	0.4528	0.1617	2.8	0.6145	87.44	0.2912	0.4529	0.18	2415.53	0.08052
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00011	63.07	0.4528	0.1617	2.8	0.6145	87.44	0.4159	0.5776	0.24	2393.99	0.13965
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00011	63.07	0.4528	0.1617	2.8	0.6145	87.44	0.4575	0.6192	0.29	2386.77	0.17901
75.999	0.8789	0.0187	0.01352	0.00011	63.07	0.4528	0.1617	2.8	0.6145	87.44	0.5962	0.7579	0.34	2410.29	0.26111
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00014	63.07	0.5845	0.2088	2.8	0.7933	87.44	0.3401	0.5488	0.15	2410.29	0.08034
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00014	63.07	0.5845	0.2088	2.8	0.7933	87.44	0.4475	0.6562	0.22	2495.98	0.14560
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00014	63.07	0.5845	0.2088	2.8	0.7933	87.44	0.537	0.7457	0.24	2374.68	0.17810
75.999	0.8789	0.0187	0.01746	0.00014	63.07	0.5845	0.2088	2.8	0.7933	87.44	0.6802	0.8889	0.29	2374.68	0.25726
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00018	63.07	0.7393	0.2641	2.8	1.0034	87.44	0.3849	0.6490	0.12	2425.05	0.08084
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00018	63.07	0.7393	0.2641	2.8	1.0034	87.44	0.4981	0.7622	0.185	2413.14	0.14077
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00018	63.07	0.7393	0.2641	2.8	1.0034	87.44	0.566	0.8301	0.217	2405.98	0.18045
75.999	0.8789	0.0187	0.02208	0.00018	63.07	0.7393	0.2641	2.8	1.0034	87.44	0.865	1.1291	0.230	2393.79	0.25933
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00020	63.07	0.8266	0.2952	2.8	1.1218	87.44	0.405	0.7002	0.116	2427.43	0.08091
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00020	63.07	0.8266	0.2952	2.8	1.1218	87.44	0.4556	0.7509	0.188	2422.67	0.14132
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00020	63.07	0.8266	0.2952	2.8	1.1218	87.44	0.5822	0.8774	0.206	2410.76	0.18081
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00020	63.07	0.8266	0.2952	2.8	1.1218	87.44	0.7594	1.0546	0.246	2393.99	0.25935
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00006	79.81	0.2920	0.1043	2.8	0.3963	83.41	0.3047	0.4090	0.197	2413.14	0.08044
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00006	79.81	0.2920	0.1043	2.8	0.3963	83.41	0.3621	0.4664	0.299	2393.79	0.13964
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00006	79.81	0.2920	0.1043	2.8	0.3963	83.41	0.4178	0.5221	0.343	2384.36	0.17883
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00006	79.81	0.2920	0.1043	2.8	0.3963	83.41	0.5988	0.7031	0.362	2352.73	0.25488

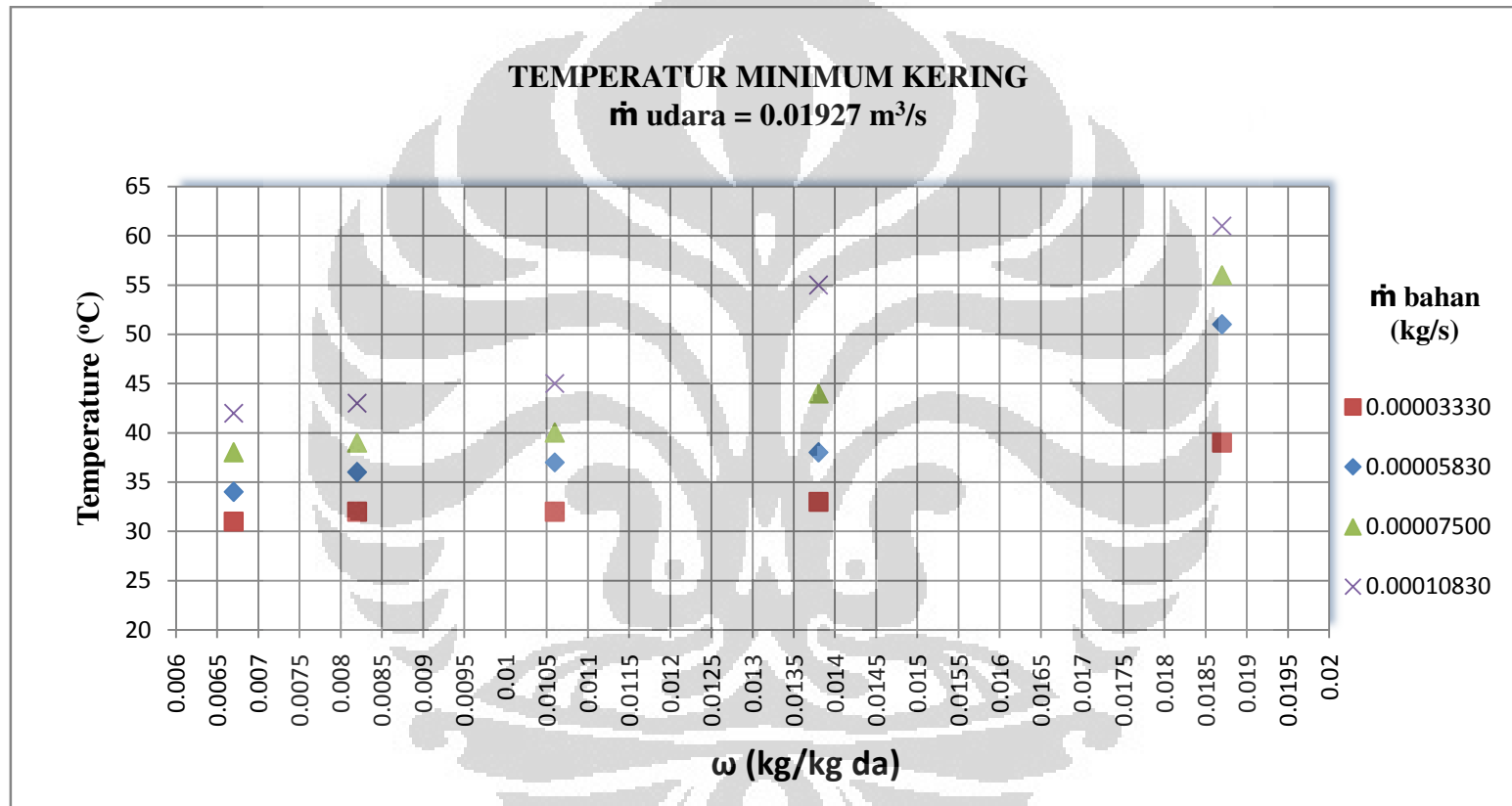
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00008	79.81	0.3769	0.1346	2.8	0.5116	83.41	0.2877	0.4223	0.191	2417.91	0.08060
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00008	79.81	0.3769	0.1346	2.8	0.5116	83.41	0.3776	0.5122	0.284	2495.98	0.14560
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00008	79.81	0.3769	0.1346	2.8	0.5116	83.41	0.5034	0.6380	0.281	2389.18	0.17919
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00008	79.81	0.3769	0.1346	2.8	0.5116	83.41	0.6832	0.8178	0.313	2364.96	0.25620
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00010	79.81	0.4768	0.1703	2.8	0.6471	83.41	0.3184	0.4887	0.165	2422.67	0.08076
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00010	79.81	0.4768	0.1703	2.8	0.6471	83.41	0.4321	0.6024	0.233	2410.76	0.14063
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00010	79.81	0.4768	0.1703	2.8	0.6471	83.41	0.5685	0.7388	0.243	2396.39	0.17973
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00010	79.81	0.4768	0.1703	2.8	0.6471	83.41	0.8187	0.9890	0.260	2369.83	0.25673
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00012	79.81	0.5316	0.1899	2.8	0.7215	83.3	0.3564	0.5462	0.148	2422.67	0.08076
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00012	79.81	0.5316	0.1899	2.8	0.7215	83.3	0.4072	0.5971	0.236	2417.91	0.14104
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00012	79.81	0.5316	0.1899	2.8	0.7215	83.3	0.4836	0.6735	0.268	2410.76	0.18081
75.999	0.8789	0.0187	0.02469	0.00012	79.81	0.5316	0.1899	2.8	0.7215	83.3	0.84	1.0298	0.250	2377.10	0.25752

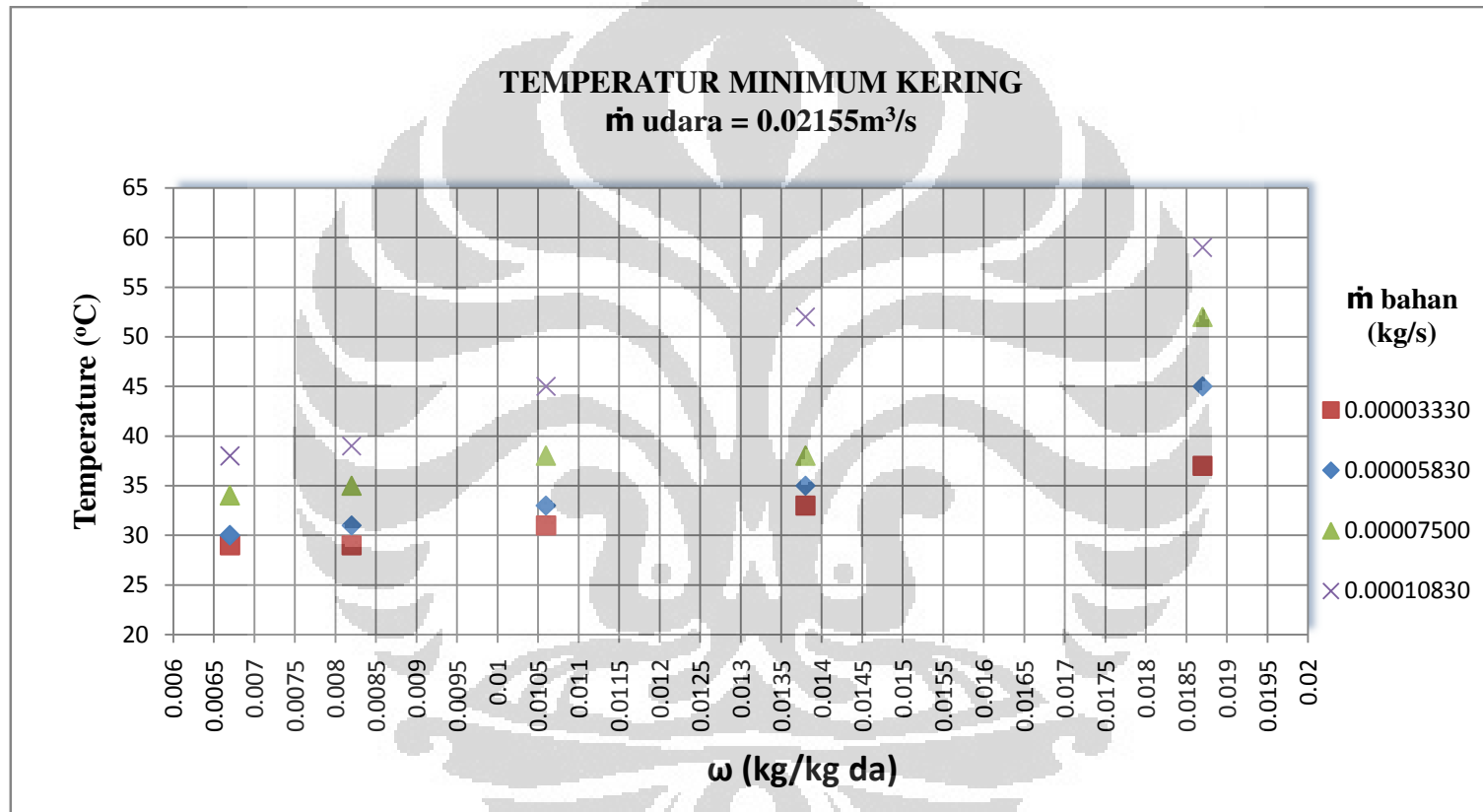
24	0.0187	76	1.138	0.879	30	0.01211	0.12	47	96.103	0.9345	29	25
							0.21	58	107.544	0.9666		
							0.27	67	116.905	0.9929		
							0.39	74	122.05	0.9404		
					50	0.01563	0.12	43	91.943	0.9228	29	25
							0.21	54	103.384	0.955		
							0.27	61	110.664	0.9754		
							0.39	68	117.945	0.9958		
					80	0.01977	0.12	39	87.783	0.9112	29	25
							0.21	51	100.264	0.9462		
							0.27	56	105.464	0.9608		
							0.39	61	110.664	0.9754		
					100	0.02211	0.12	37	85.703	0.9053	29	25
							0.21	45	94.023	0.9287		
							0.27	52	101.304	0.9491		
							0.39	59	108.584	0.9696		

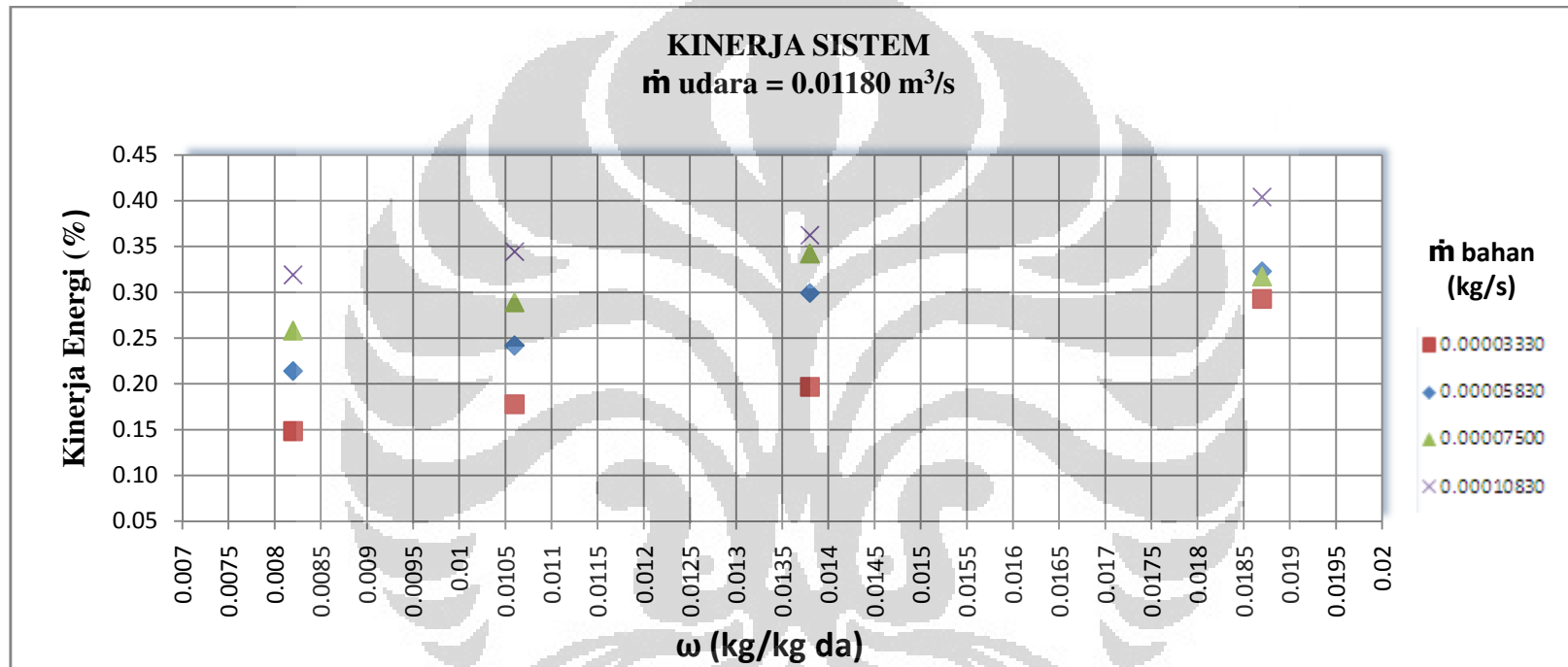
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00000	100.73	0.0012	0.0004	2.8	0.0016	76.12	0.2716	0.2720	0.293	2389.18	0.07964
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00000	100.73	0.0012	0.0004	2.8	0.0016	76.12	0.4261	0.4266	0.323	2362.52	0.13781
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00000	100.73	0.0012	0.0004	2.8	0.0016	76.12	0.5526	0.5530	0.317	2340.42	0.17553
76.057	0.8813	0.0184	0.01351	0.00000	100.73	0.0012	0.0004	2.8	0.0016	76.12	0.6221	0.6225	0.404	2323.02	0.25166
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00000	100.73	0.0010	0.0004	2.8	0.0014	76.08	0.2781	0.2784	0.287	2398.79	0.07996
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00000	100.73	0.0010	0.0004	2.8	0.0014	76.08	0.4776	0.4780	0.290	2372.26	0.13838
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00000	100.73	0.0010	0.0004	2.8	0.0014	76.08	0.6046	0.6049	0.292	2355.19	0.17664
76.057	0.8813	0.0184	0.01744	0.00000	100.73	0.0010	0.0004	2.8	0.0014	76.08	0.7315	0.7319	0.346	2337.95	0.25328
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00000	100.73	0.0013	0.0005	2.8	0.0017	76.08	0.26	0.2604	0.308	2408.37	0.08028
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00000	100.73	0.0013	0.0005	2.8	0.0017	76.08	0.5353	0.5357	0.259	2379.53	0.13881
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00000	100.73	0.0013	0.0005	2.8	0.0017	76.08	0.65	0.6505	0.273	2367.39	0.17755
76.057	0.8813	0.0184	0.02206	0.00000	100.73	0.0013	0.0005	2.8	0.0017	76.08	0.7647	0.7652	0.333	2355.19	0.25515
76.057	0.8813	0.0184	0.02466	0.00000	100.73	0.0014	0.0005	2.8	0.0019	76.08	0.2393	0.2399	0.335	2413.14	0.08044
76.057	0.8813	0.0184	0.02466	0.00000	100.73	0.0014	0.0005	2.8	0.0019	76.08	0.4445	0.4451	0.314	2393.99	0.13965
76.057	0.8813	0.0184	0.02466	0.00000	100.73	0.0014	0.0005	2.8	0.0019	76.08	0.6241	0.6246	0.285	2377.10	0.17828
76.057	0.8813	0.0184	0.02466	0.00000	100.73	0.0014	0.0005	2.8	0.0019	76.08	0.8037	0.8042	0.318	2360.08	0.25568

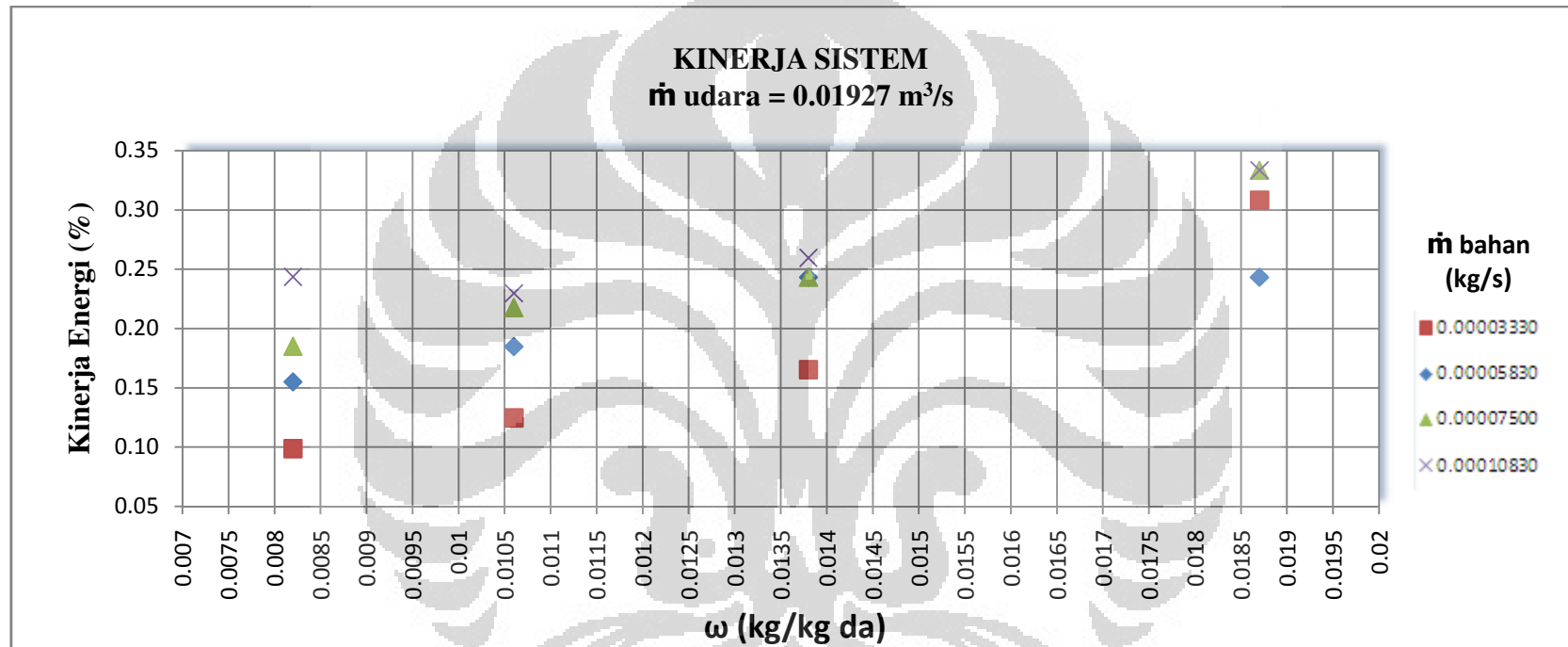
Lampiran 2 Temperatur minimum kering $\dot{m}_{udara} = 0.011880 \text{ m}^3/\text{s}$ 

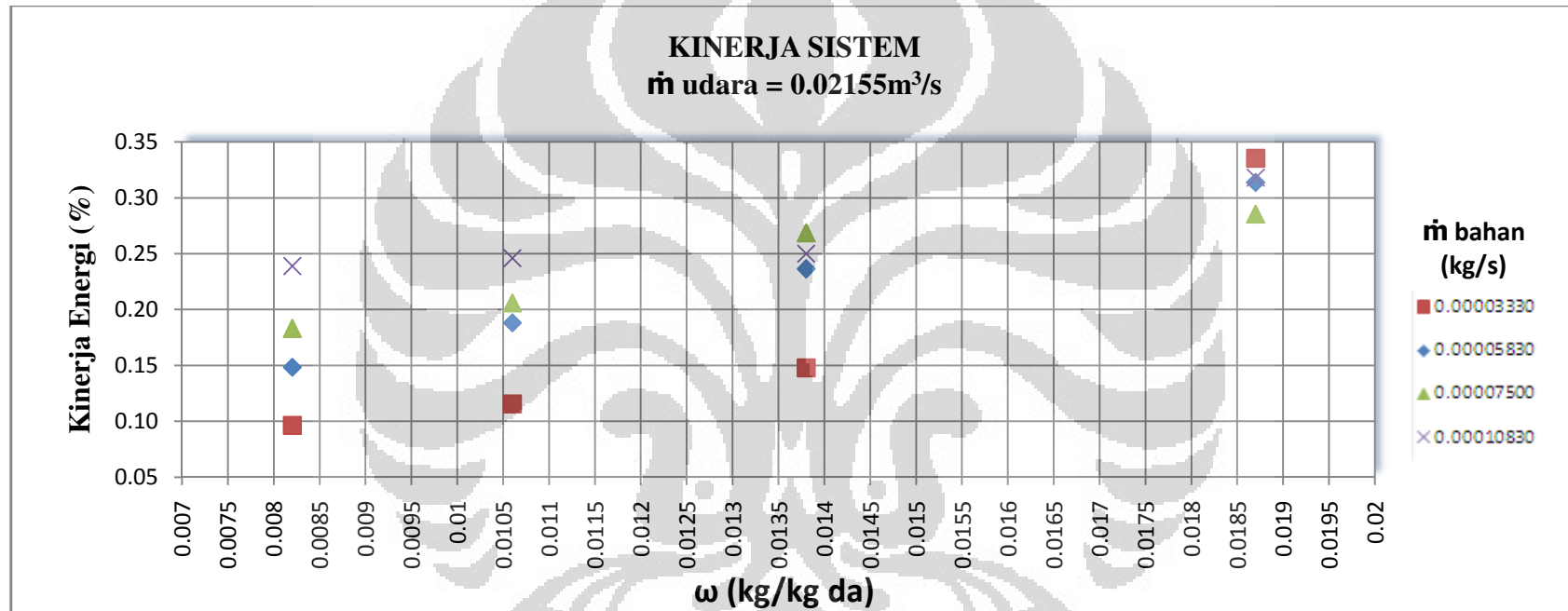
Lampiran 3 temperatur minimum kering $\dot{m}_{udara} = 0.01524 \text{ m}^3/\text{s}$ 

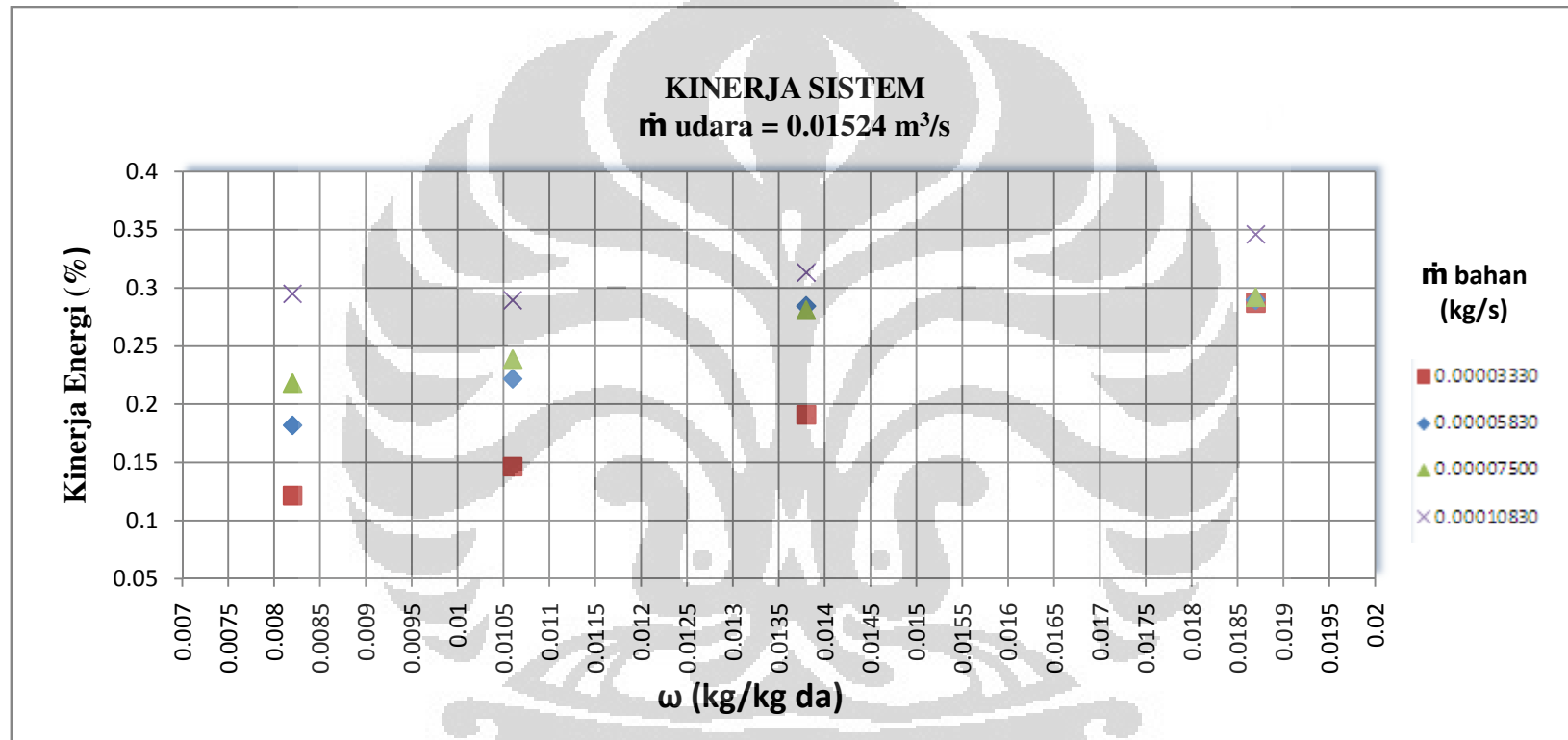
Lampiran 4 temperatur minimum kering $\dot{m}_{udara} = 0.01927 \text{ m}^3/\text{s}$ 

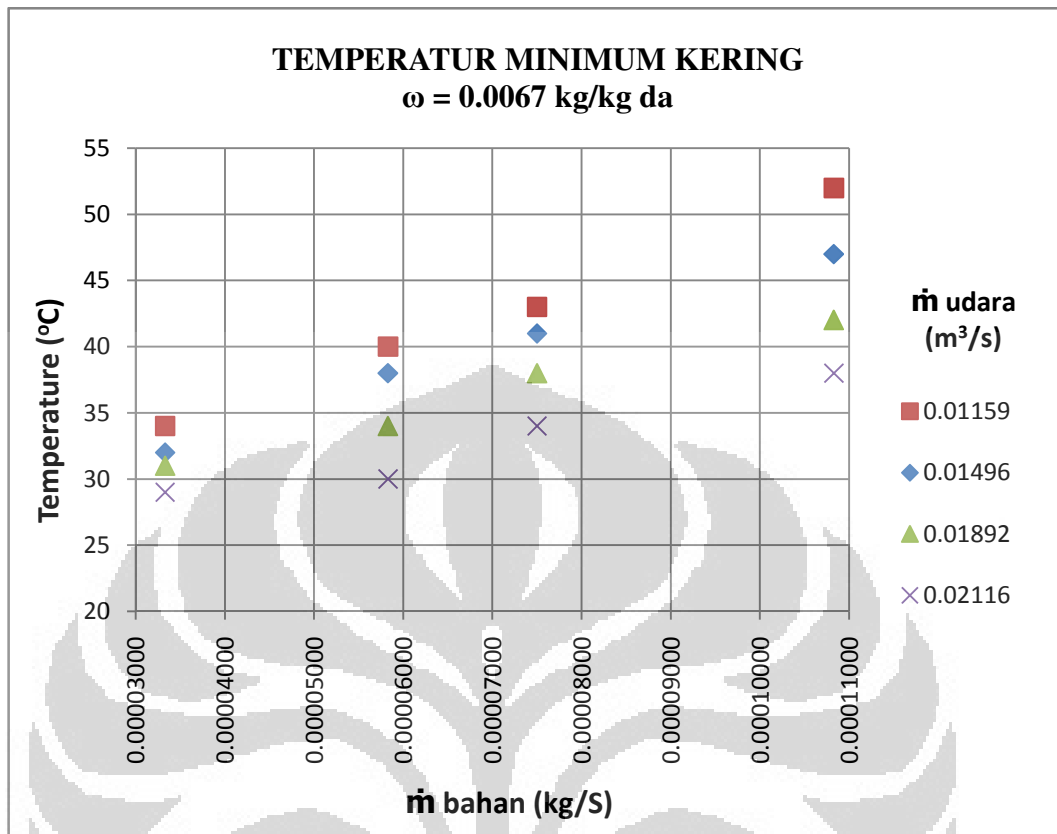
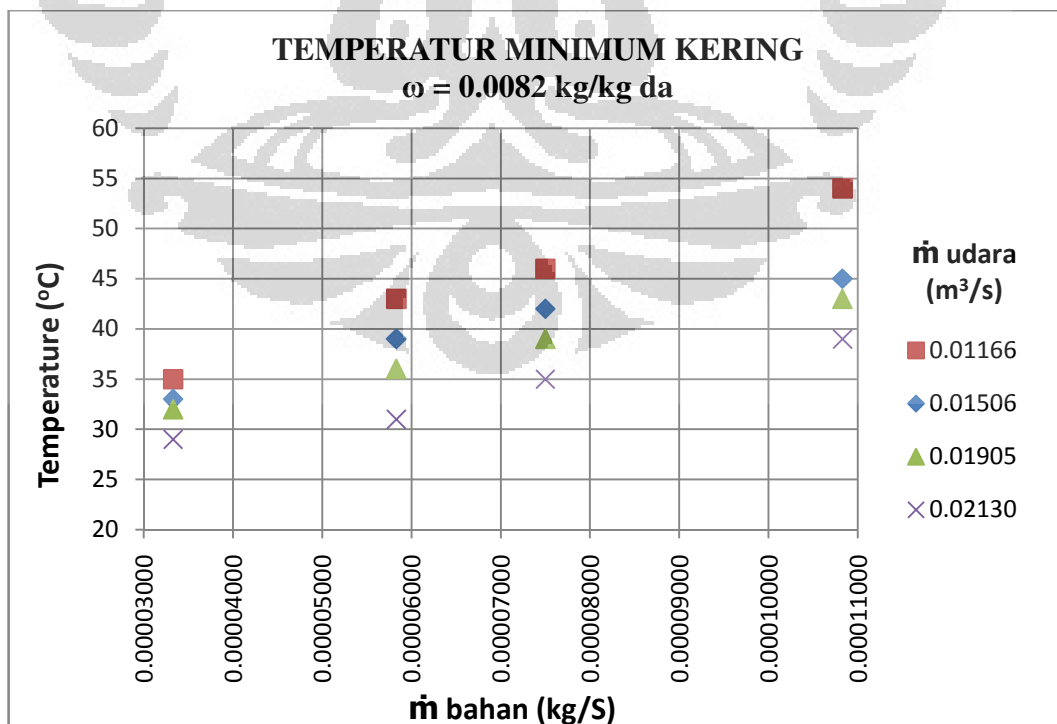
Lampiran 5 temperatur minimum kering $\dot{m}_{udara} = 0.02155 \text{ m}^3/\text{s}$ 

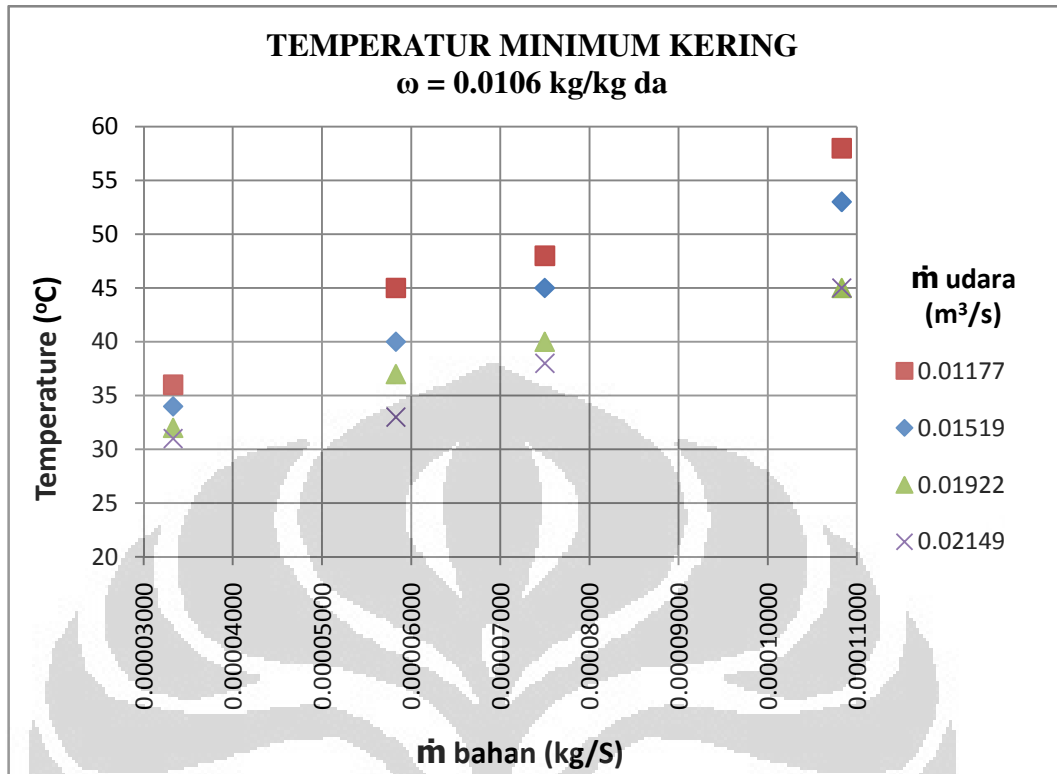
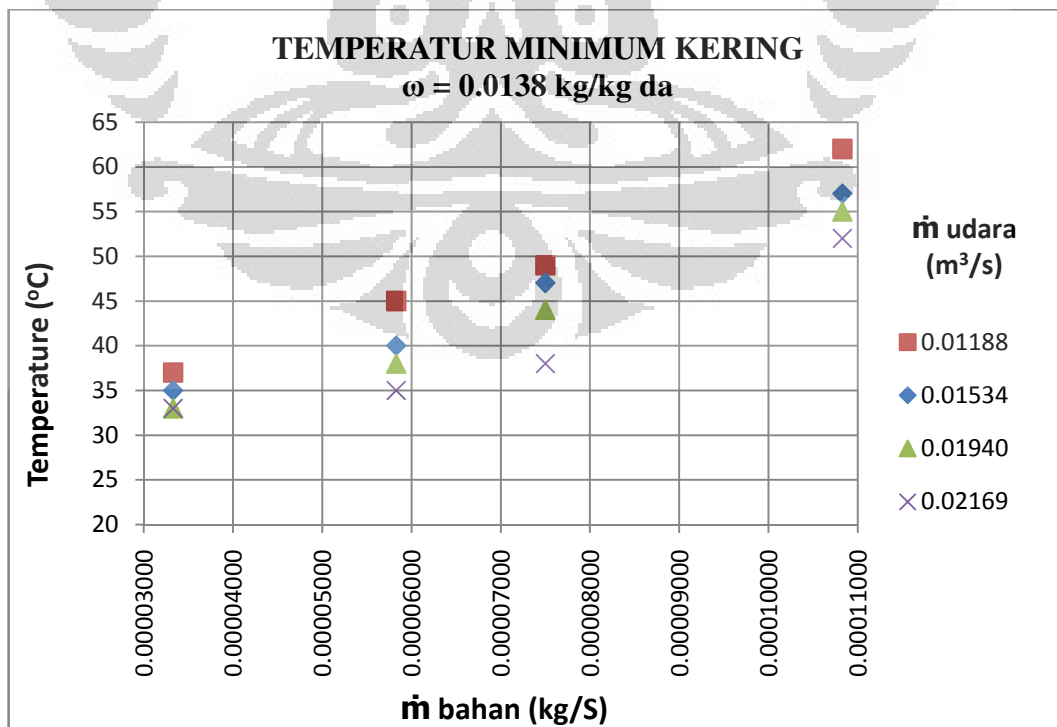
Lampiran 6 Kinerja Sistem $\dot{m}_{udara} = 0.011880 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Lampiran 7 Kinerja Sistem $\dot{m}_{udara} = 0.01927 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Lampiran 8 Kinerja Sistem $\dot{m}_{udara} = 0.02155 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Lampiran 9 Kinerja Sistem $\dot{m}_{udara} = 0.01524 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Lampiran 10 minimum kering $\omega = 0.0067 \text{ kg/kg da}$ Lampiran 11 minimum kering $\omega = 0.0082 \text{ kg/kg da}$ 

Lampiran 12 minimum kering $\omega = 0.0106$ kg/kg daLampiran 13 minimum kering $\omega = 0.0138$ kg/kg da

Lampiran 14 minimum kering $\omega = 0.0187 \text{ kg/kg da}$

