



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH UDARA PANAS TERHADAP LAJU  
PENGERINGAN PADA FREEZE VACUUM DRYING**

**SKRIPSI**

**MUHAMMAD FACHRUR ROZI**

**0806330346**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH UDARA PANAS TERHADAP LAJU  
PENGERINGAN PADA FREEZE VACUUM DRYING**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**MUHAMMAD FACHRUR ROZI**

**0806330346**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**KEKHUSUSAN TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

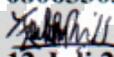
**JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan bahwa skripsi ini dengan judul :

### **PENGARUH UDARA PANAS TERHADAP LAJU PENGERINGAN PADA FREEZE VACUUM DRYING**

yang dibuat untuk melengkapi sebagai persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tugas akhir yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

**Nama** : Muhammad Fachrur Rozi  
**NPM** : 0806330346  
**Tanda Tangan** :   
**Tanggal** : 12 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Muhammad Fachrur Rozi  
NPM : 0806330346  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Pengaruh Udara Panas Terhadap Laju  
Pengeringan Pada Freeze Vacuum Drying

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Muhamad Idrus Alhamid

Penguji : Dr.-Ing. Nasruddin, M.Eng

Penguji : Dr. Ir. Budihardjo, Dipl.Ing

Penguji : Dr. Agus Pamitran, ST, M.Eng

(Handwritten signatures and initials of the examiners, including a large signature and initials in blue ink.)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 juli 2012

## KATA PENGANTAR

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

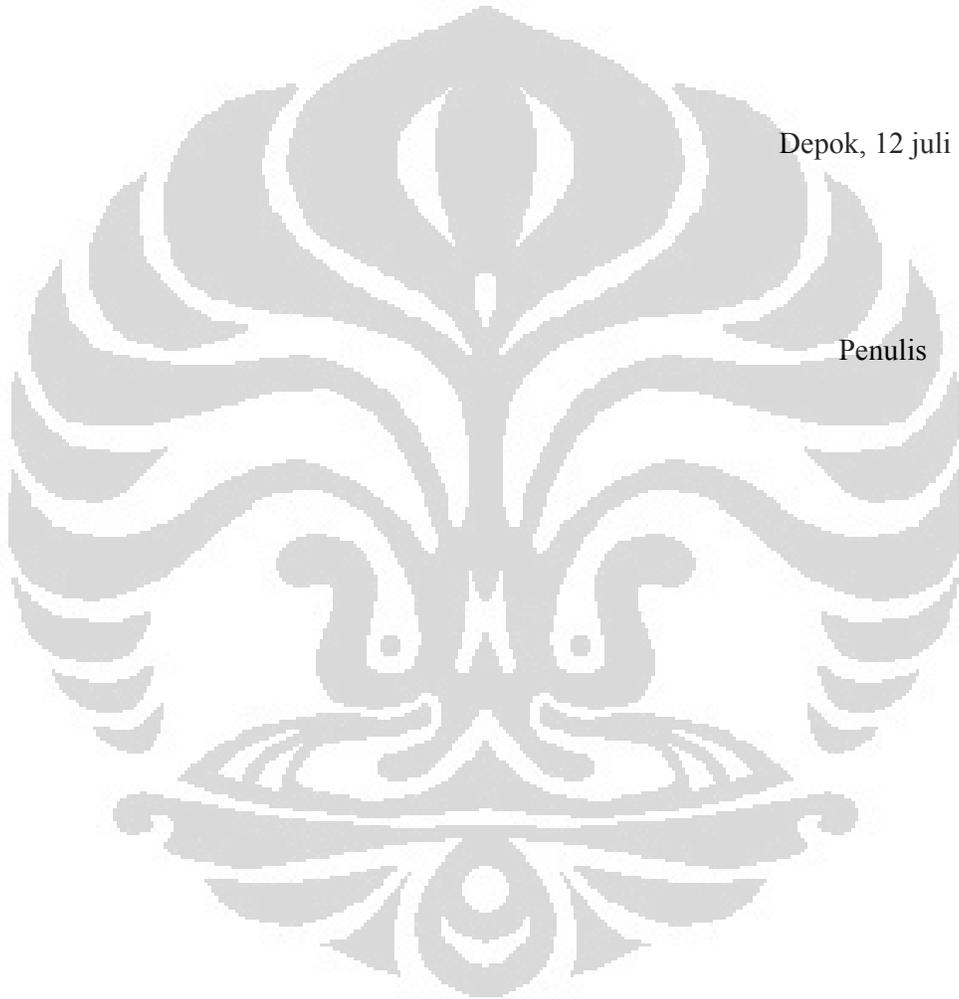
1. Dr.Ir. M.Idrus Alhamid selaku dosen pembimbing atas segala nasehat, ilmu, dan perhatian yang telah dicurahkan.
2. Dr. –Ing, Ir. Nasruddin, M.Eng, atas segala waktu, ilmu, nasehat, dan perhatian yang telah dicurahkan.
3. Orang tua dan keluarga penulis, yang selalu setia memberikan dukungan dan doa.
4. Pak Yulianto, atas segala bimbingannya yang luar biasa dari awal hingga akhir proses pengerjaan skripsi ini.
5. Mas Arnas yang telah banyak berjasa dalam membantu penyelesaian alat skripsi yang penulis buat.
6. Pak Seno, Pak Supri, dan Pak Rully, atas nasihat-nasihat berharganya dalam pengerjaan skripsi ini.
7. Mas Udiyono, Mas Syarif, dan seluruh karyawan Departemen Teknik Mesin yang telah banyak membantu.
8. Hernadi, Helmi, Surya, Hanif, Mario, Daniel, Kubil, Fajar, dan Mike, selaku rekan-rekan Laboratorium Pendingin dan Tata Udara, yang telah bersama- sama menghadapi suka dan duka dalam pengerjaan alat maupun pengambilan data.
9. Rekan-rekan dan sahabat penulis pada Departemen Teknik Mesin FTUI angkatan 2008 lainnya, semoga sukses.

Dan kepada semua pihak- pihak yang telah mambantu, tetapi tidak dapat dituliskan satu-persatu. Kiranya skripsi ini berguna bagi perkembangan ilmu pengetahuan ke depannya.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan untuk membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Amin.

Depok, 12 juli 2012

Penulis



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

---

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

Nama : Muhammad Fachrur Rozi  
NPM : 0806330346  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PENGARUH UDARA PANAS TERHADAP LAJU  
PENGERINGAN PADA FREEZE VACUUM DRYING**

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 memublikasikan 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 : 12 juli 2012

Yang menyatakan



( Muhammad Fachrur Rozi )

## ABSTRACT

Name : Muhammad Fachrur Rozi

Field of Study : Mechanical Engineering

Title : The Effect of Hot Air Drying rate against the Freeze Vacuum Drying

Freeze Vacuum Drying is the best method of drying, but not energy efficient because of the relatively long drying process. This thesis discusses the effects of the addition of hot air in an effort to accelerate the rate of drying of the material with a vacuum refrigeration system freezing on the pressure drop of test material in a freeze vacuum drying. The research proves that the use of additional heat can accelerate the rate of drying. Additionally, with the addition of hot air, can save electricity consumption. The addition of hot air is cost effective because no additional devices on the refrigeration system. Hot air taken from ambient air into the reservoir with a temperature of 35°C is heated using waste heat condenser.

**Key word** : Cascade, drying rate, low temperature, freeze vacuum drying,

## ABSTRAK

Nama : Muhammad Fachrur Rozi  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Pengaruh Udara Panas Terhadap Laju Pengeringan Pada Freeze  
Vacuum Drying

Pengeringan beku vakum merupakan metode pengeringan yang terbaik, tetapi tidak hemat energi karena proses pengeringan yang relatif lama. Skripsi ini membahas mengenai efek penambahan udara panas sebagai usaha untuk mempercepat laju pengeringan material dari sistem refrijerasi dengan *vacuum freezing* pada proses penurunan tekanan material uji pada pengeringan beku vakum. Hasil penelitian membuktikan bahwa pemanfaatan penambahan udara panas dapat mempercepat laju pengeringan. Selain itu dengan penambahan udara panas, dapat menghemat konsumsi energi listrik. Penambahan udara panas ini hemat biaya karena tidak ada perangkat tambahan pada sistem refrijerasi. Udara panas diambil dari udara lingkungan yang masuk ke dalam reservoir dengan temperatur 35°C yang dipanaskan dengan menggunakan panas buang kondenser.

**Kata Kunci** : Cascade, laju pengeringan, pengeringan beku vakum, pengaruh udara panas

## DAFTAR ISI

	<b>Hal</b>
Judul .....	i
Halaman Pernyataan Orisinalitas .....	ii
Halaman Pengesahan .....	iii
Kata Pengantar .....	iv
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah untuk Kepentingan Akademis .....	vi
Abstract .....	vii
Abstrak .....	viii
Daftar Isi .....	ix
Daftar notasi .....	xii
Daftar Gambar .....	xiii
Daftar Tabel .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Metode Penulisan .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
BAB 2 DASAR TEORI .....	6
2.1 Sistem Refrijerasi .....	6
2.2 Refrijeran .....	9
2.3 Siklus Refrijerasi <i>Cascade</i> .....	9
2.4 Pengeringan Beku Vakum .....	10
2.4.1. Proses Pembekuan .....	14
2.4.2. Jumlah Panas, Konduktivitas Panas, Perpindahan Kalor dan Laju Pendinginan .....	14
2.4.3. Proses Pengeringan .....	16
2.4.4. Pengeringan Dengan Sublimasi ( <i>Main Drying</i> ) .....	18
2.4.5. Pengeringan Dengan Desorpsi ( <i>Secondary Drying</i> ) .....	20
2.4.6 Pengukuran Temperatur dan Tekanan .....	21
2.4.7 Transportasi Uap Air Selama Pengeringan .....	22
2.5 Perpindahan Kalor dan Massa .....	22
2.4.1 Perpindahan Kalor Konduksi .....	23
2.4.2 Perpindahan Kalor Radiasi .....	24

2.6 Pengukuran aliran udara panas .....	25
2.6.1 Reservoir .....	26
2.6.2 Air Flow Meter.....	26
2.6.3 Pipa Kapiler.....	26
BAB 3 METODE PENELITIAN .....	27
3.1 Garis Besar Pengujian .....	27
3.1.1 Parameter - parameter yang Ditentukan .....	27
3.1.2 <i>LabVIEW</i> .....	28
3.2 Komponen Mesin Pengering Beku Vakum .....	29
3.2.1 Pompa Vakum .....	29
3.2.2 Ruang Material .....	30
3.2.3 Kompresor .....	30
3.2.4 <i>Plate Heat Exchanger</i> .....	31
3.2.5 <i>Needle Valve</i> .....	31
3.2.6 Kondenser.....	32
3.2.7 Evaporator.....	33
3.2.8 <i>Stop Valve</i> .....	34
3.2.9 <i>Check Valve</i> .....	34
3.2.10 Tempat Material .....	35
3.2.11 Filter Dryer.....	35
3.2.12 Oil Separator.....	36
3.2.13 Air Flow Meter .....	37
3.2.14 Ball Valve.....	37
3.2.15 Pipa kapiler.....	38
3.3 Alat Ukur .....	38
3.3.1 <i>Thermocouple</i> .....	38
3.3.2 <i>Pressure Gauge</i> .....	39
3.3.3 <i>Pressure Transmitter</i> .....	40
3.3.4 Timbangan Digital .....	40
3.3.5 <i>National Instrument</i> .....	41
3.4 Diagram Alir Percobaan .....	42
3.5 Skema Alat .....	43

3.6 Persiapan Pengujian .....	44
3.5.1 Pengisian Refrijeran.....	44
3.5.2 Persiapan Benda Uji .....	45
3.7 Pengujian .....	45
3.7.1 Lokasi Pengujian .....	45
3.7.2 Variasi Pengujian.....	46
3.7.3 Prosedur Pengambilan Data .....	47
BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA.....	49
4.1 Pengolahan Data.....	50
4.1.1 Laju Pengeringan Material.....	50
4.1.1.1 Laju Pengeringan Secara Konduksi.....	50
4.1.1.2 Laju Pengeringan Secara Radiasi.....	52
4.1.2 Temperatur Material terhadap waktu.....	53
4.1.3 Moisture content Akhir Material.....	55
4.2 Analisis .....	55
4.2.1 Analisis Laju pengeringan Material .....	55
4.2.2 Analisis Temperatur Material Terhadap Waktu.....	56
4.2.3 Analisis <i>Moisture Content</i> Akhir Material.....	56
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA .....	60

## DAFTAR NOTASI

Simbol	Arti	Satuan
m	Massa material	(g)
q	Aliran kalor	Wm <sup>2</sup>
L	Ketebalan material	(m)
T	Temperatur	(K)
M	Laju pengeringan/ laju aliran massa	kg/m <sup>2</sup> s
F	Emisivitas air	
<b>Huruf Yunani</b>		
$\Delta h$	Kalor laten sublimasi es	J/Kg.K
$\Delta L$	Jarak bagian beku ke permukaan material	(m)
$\sigma$	Konstanta Stefan Boltzman	
$J/m^2sK^4$		
$\lambda$	Konduktivitas termal es	W/mK
<b>Subskrip</b>		
t	setelah waktu t	
d	kering ( <i>dry</i> )	
w	basah ( <i>wet</i> )	
s	lingkungan ( <i>surrounding</i> )	
f	batas sublimasi ( <i>freezing front</i> )	

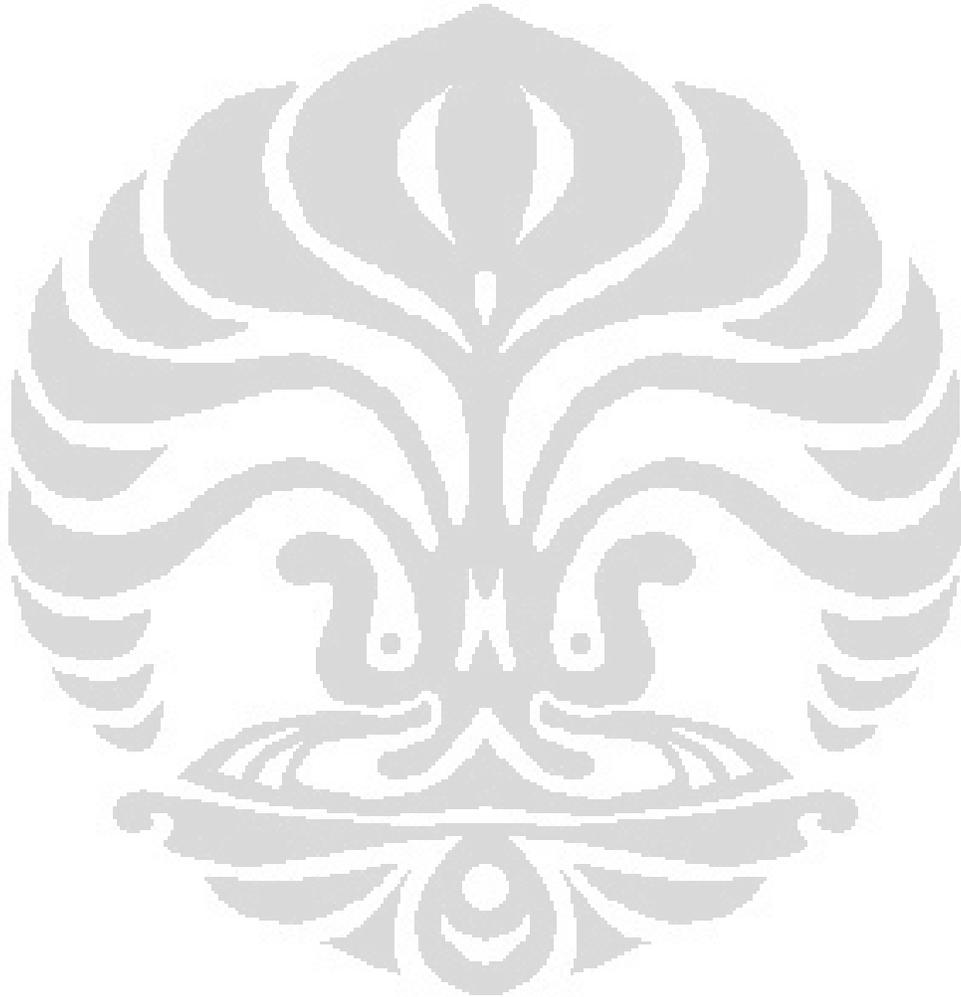
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen Utama sistem Refrijerasi Kompresi Uap.....	7
Gambar 2.2 Sistem Refrijerasi <i>Cascade</i> Dua Tingkat .....	10
Gambar 2.3 Diagram fase air .....	12
Gambar 2.4 Skema Perpindahan Kalor dan Massa dengan Kondisi Batas Konduksi.....	24
Gambar 2.5 Skema Perpindahan Kalor dan Massa dengan Kondisi Batas Radiasi.....	25
Gambar 3.1 Mesin Pengering Beku Vakum.....	27
Gambar 3.2 Tampilan Lab VIEW .....	29
Gambar 3.3 Pompa Vakum .....	29
Gambar 3.4 Ruang Material .....	30
Gambar 3.5 Kompresor .....	31
Gambar 3.6 <i>Plate Heat Exchanger</i> .....	31
Gambar 3.7 <i>Needle Valve</i> .....	32
Gambar 3.8 Kondenser .....	33
Gambar 3.9 Evaporator .....	33
Gambar 3.10 <i>Stop Valve</i> .....	34
Gambar 3.11 <i>Check Valve</i> .....	34
Gambar 3.12 Tempat material .....	35
Gambar 3.13 Filter Dryer .....	36
Gambar 3.14 Oil Separator.....	36
Gambar 3.15 Air Flow Meter .....	37
Gambar 3.16 Ball Valve.....	37
Gambar 3.17 Pipa Kapiler .....	38
Gambar 3.18 <i>Thermocuopel</i> tipe K.....	39
Gambar 3.19 <i>Pressure Gauge</i> .....	39
Gambar 3.20 <i>Pressure Transmitter</i> .....	40
Gambar 3.21 Timbangan Digital .....	41
Gambar 3.22 National Instrument.....	41
Gambar 3.23 Diagram Alir Percobaan.....	42

Gambar 3.24 Skema alat Freeze Vacuum Drying .....	43
Gambar 3.25 Skema alat tanpa penambahan udara panas .....	46
Gambar 3.26 Skema alat dengan penambahan udara panas .....	47
Gambar 4.1 Laju Pengeringan Secara konduksi variasi 1 .....	50
Gambar 4.2 Laju Pengeringan Secara konduksi variasi 2.....	51
Gambar 4.3 Perbandingan variasi 1 dan 2.....	51
Gambar 4.4 Laju Pengeringan Secara radiasi variasi 1.....	52
Gambar 4.5 Laju Pengeringan Secara radiasi variasi 2.....	52
Gambar 4.6 Perbandingan variasi 1 dan 2.....	53
Gambar 4.7 Temperatur vs Waktu variasi 1 .....	53
Gambar 4.8 Temperatur vs Waktu variasi 2.....	54
Gambar 4.9 Perbandingan variasi 1 dan 2.....	54
Gambar 4.10 material yang telah kering variasi 1 .....	57
Gambar 4.11 material yang telah kering variasi 2 .....	57

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Posisi <i>Thermocouple</i> dan <i>Pressure Gauge</i> .....	44
Tabel 3.2 Variasi Data Pengujian .....	46



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kanker merupakan penyakit yang dapat dikenali dengan pertumbuhan sel yang diluar kendali. Sel tubuh yang normal biasanya mengikuti garis pertumbuhan, pembelahan, dan kematian yang teratur. Peristiwa kematian sel disebut apoptosis, dan ketika proses ini tidak terjadi, maka kanker akan muncul. Apoptosis yang tidak terjadi ini dapat disebabkan karena adanya kerusakan ataupun mutasi pada DNA yang mengatur pertumbuhan sel. Tidak seperti sel normal, sel kanker tidak mengalami apoptosis; terus berkembang dan membelah diri. Hal ini menyebabkan banyak sekali sel abnormal yang tumbuh di luar kendali. Ada lebih dari 100 jenis kanker yang dapat diklasifikasikan sesuai dengan tipe sel yang dijangkiti, seperti kanker payudara, kanker mulut, kanker otak, dan lain- lain.

Kanker, berdasarkan riset, menjadi penyebab kematian nomor tujuh setelah stroke, tuberkulosis, hipertensi, cedera, perinatal, dan diabetes melitus (Dianing Sari, 2011). Pada tahun 2007, kanker diklaim telah merenggut nyawa 7,6 juta orang di seluruh dunia (Peter Crosta, n.d.). Di Indonesia sendiri, walaupun tidak terdata secara jelas jumlah penderitanya, jumlah penderita kanker diperkirakan akan naik menjadi tujuh kali lipat pada tahun 2030 (Yanne Trisnawati, 2007). Namun sayangnya metode pendeteksian penyakit ini terbilang sulit sehingga penanganan yang lebih lanjut seringkali terlambat diambil. Sinar X bahkan kesulitan untuk mendeteksi kanker karena sinar ini tidak dapat menembus jauh ke dalam jaringan dan tulang.

Untungnya, perkembangan teknologi yang pesat telah membantu para ilmuwan menemukan metode untuk mengidentifikasi sel yang terinfeksi kanker. Metode ini menggunakan *Green Flourescent Protein* (GFP) dari ubur- ubur (*Aurella Sp.*) untuk mendeteksi sel yang sedang memperbaiki DNA-nya yang rusak karena adanya substansi penyebab kanker. Teknologi yang digunakan adalah merupakan perkembangan dari penelitian mengenai pengisolasian GFP dari ubur- ubur yang dilakukan oleh Roger Tsien, profesor dari Universitas

California, San Diego; Martin Chalfie dari Universitas Columbia; dan Osamu Shimomura, peneliti Jepang di Laboratorium Biologi Kelautan di Woods Hole, Mass. Karena penelitian ini, ketiga ilmuwan tersebut memperoleh nobel di bidang Kimia pada tahun 2008. Para ilmuwan ini menggunakan rekayasa genetik untuk menggabungkan GFP dengan sel yang terinfeksi kanker. Virus yang berisi protein tersebut dikirim menuju sel kanker. Walaupun pada awalnya tidak terdeteksi karena jumlahnya yang sangat kecil, namun seiring dengan menyebarnya virus, maka protein akan terlihat menyala ketika dilihat dengan kamera khusus. Jika terus dikembangkan, teknologi ini tidak hanya dapat mendeteksi sel kanker, namun juga dapat digunakan untuk memonitor efek dari terapi di kehidupan nyata. Potensi penggunaan lainnya adalah untuk memandu para ahli bedah untuk mengangkat jaringan tumor pada pasien penderita kanker. Teknologi ini dapat menyelamatkan jutaan jiwa umat manusia di seluruh dunia jika dikembangkan dengan sungguh-sungguh.

Untuk mendukung perkembangan teknologi ini, para ilmuwan yang berkecimpung di dalamnya membutuhkan protein dari ubur- ubur dalam kondisi yang baik. Hingga saat ini, proses ekstraksi bahan dasar medis masih menggunakan metode evaporasi. Cara seperti ini dinilai tidak efektif karena kemungkinan besar tidak hanya air yang terevaporasi tetapi juga zat-zat material yang diperlukan untuk dijadikan bahan dasar obat ikut terevaporasi. Metode pengeringan yang dianggap sebagai yang terbaik adalah pengeringan beku vakum. Metode ini dapat mempertahankan nutrisi atau kandungan gizi, warna, rasa, dan struktur biologi (Xu, Min, Mujumdar, & Shaojin, 2010). Namun, metode ini juga memiliki kelemahan, yaitu konsumsi energi yang besar. Hal ini disebabkan karena ada tiga proses yang terjadi dalam pengeringan ini, yaitu proses pembekuan, proses pengeringan atau sublimasi, dan proses penangkapan uap air sebelum masuk ke dalam pompa vakum.

Pada penelitian ini akan dilakukan inovasi-inovasi pada mesin pengeringan beku vakum, yaitu pengkombinasian pompa vakum dan sistem refrijerasi untuk menurunkan temperatur dan tekanan di dalam ruang material. Selain itu juga akan dilakukan pemanfaatan dari panas kompresor untuk mempercepat waktu pengeringan material.

Dalam penulisan skripsi ini telah dilakukan eksperimen dan pembahasan bersama saudara Muhammad Yulianto sehingga terdapat kalimat-kalimat yang diambil dari skripsi saudara Muhamad Novel Hidayat, Rio Ricardi, dan Rohman. Sehingga terdapat beberapa kesamaan kalimat dalam penulisan skripsi ini.

## 1.2 Perumusan Masalah

Skripsi ini membahas mengenai proses pengeringan beku vakum dengan sistem refrigerasi dua tingkat (*cascade*) dan pemanasan dari udara panas yang dimanfaatkan dari panas buang kondenser saat proses pengeringan sebagai solusi mempercepat laju pengeringan.

## 1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah:

1. Merancang dan membuat alat Pengering Beku Vakum (*vacuum freeze drying machine*).
2. Mengetahui perbedaan proses pengeringan ketika diberi penambahan udara panas dan proses pengeringan tanpa penambahan udara panas pada alat Freeze Vacuum Drying.
3. Melakukan pengujian dan pengambilan data dengan menggunakan alat pengering Beku Vakum (*vacuum freeze drying machine*), dan
4. mempelajari proses pengeringan beku vakum dengan menggunakan alat pengering beku vakum yang telah dirancang.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diambil dalam penulisan skripsi ini adalah:

1. Membahas mengenai karakteristik proses pengeringan beku vakum tanpa pemberian pemanasan pada saat proses pengeringan.
2. Membahas mengenai karakteristik proses pengeringan beku vakum dengan variasi pemanasan menggunakan udara panas yang dimanfaatkan dari panas buang dari kondenser saat proses pengeringan.

3. Membahas karakteristik pengeringan beku vakum dari sisi perpindahan kalor konduksi dan radiasi, dan
4. Membahas karakteristik pengeringan beku vakum dari sisi perpindahan massa material yang dikeringkan akibat adanya proses perpindahan kalor konduksi dan radiasi.
5. Membandingkan lama pengeringan ketika diberi udara panas dan tanpa pemberian udara panas.

### **1.5 Metode Penulisan**

Metode yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini antara lain:

1. melakukan studi literatur untuk memperoleh dasar-dasar teori mengenai pengeringan beku vakum.
2. mendesain dan membuat alat pengering beku vakum.
3. melakukan serangkaian pengujian menggunakan alat yang telah dibuat untuk mendapatkan data yang diperlukan dalam pembuktian dan analisis, serta
4. mengolah dan menganalisis data yang diperoleh sesuai dengan tujuan penulisan.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Secara garis besar, sistematika penulisan skripsi ini terbagi dalam 5 bab dengan pendahuluan pada bab 1; landasan teori pada bab 2; metodologi pengujian pada bab 3; pengolahan data dan analisis pada bab 4; serta kesimpulan pada bab 5.

Bab 1 merupakan pendahuluan dari penelitian yang dilakukan. Pada bab ini, dijelaskan mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penulisan, dan sistematika penulisan.

Bab 2 menjelaskan landasan teori yang digunakan terkait dengan penelitian. Secara umum, hal-hal yang dibahas pada bab ini meliputi pengertian sistem refrijerasi, refrijeran, *Siklus Refrijerasi Cascade*, Pengeringan Beku Vakum, Perpindahan Kalor dan Massa, dan Pengukuran Aliran Udara Panas.

Bab 3 menjelaskan secara terperinci mengenai metodologi pengujian pada penelitian ini, meliputi bagan alir penelitian, rangkain alat, skema alat, dan prosedur pengujian.

Bab 4 menampilkan hasil pengolahan data yang didapatkan. Data yang telah diolah kemudian dianalisis pada bab ini untuk mengkonfirmasi tujuan akhir yang diharapkan pada penelitian ini.

Bab 5 menjelaskan kesimpulan dari seluruh rangkaian penelitian yang dilakukan, serta saran berdasarkan hasil penelitian yang telah dicapai pelepasan kalor, temperatur dari refrijeran menurun dan menyebabkan perubahan fase dari uap menjadi cair kembali.



## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 Sistem Refrijerasi

Refrijerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi dan memindahkan kalor tersebut ke suatu ruangan bertemperatur lebih rendah sehingga didapatkan tercapainya suatu temperatur dan dipertahankannya temperaturnya dibawah temperatur lingkungan.

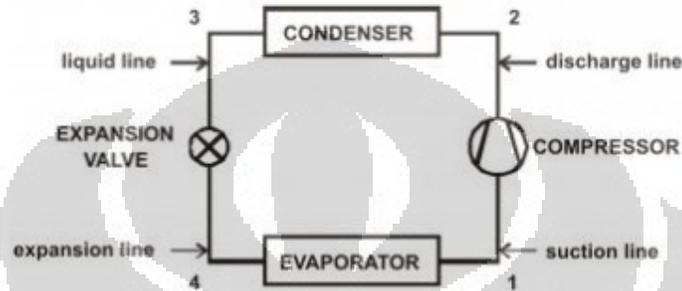
Untuk mempertahankan temperatur pada suatu ruangan, penyerapan kalor oleh suatu sistem refrijerasi harus dilakukan secara terus menerus kemudian dilepaskan keluar sistem. Hal ini dapat dilakukan dengan melalui beberapa proses yang disebut dengan siklus refrijerasi. Karena proses penyerapan dan pemindahan kalor harus dilakukan secara terus menerus maka siklus ini haruslah tertutup.

Salah satu siklus refrijerasi yang banyak dipakai adalah siklus kompresi uap (*vapor compression refrigeration cycle*). Siklus kompresi uap terdiri dari 4 proses, yaitu:

- *Heat Absorption* : Proses penyerapan kalor oleh refrijeran dalam bentuk dari suatu ruangan. Penyerapan kalor menyebabkan refrijeran berubah fase dari *liquid* (cair) menjadi *vapour* (uap). Dalam fase uap, refrijeran juga tetap menerima kalor sehingga temperaturnya juga akan meningkat. Jadi pada proses ini refrijeran berubah fase dari cair dengan temperatur rendah menjadi uap dengan temperatur tinggi.
- *Energy Addition* : Penambahan energi terhadap refrijeran, agar dapat menuju proses berikutnya. Refrijeran dalam fase uap di kompresi sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat. Proses ini disebut juga sebagai langkah kompresi.

*Heat Rejection* : Pelepasan kalor dari proses penyerapan kalor pada refrijeran keluar sistem refrijerasi. Selama prose

- *Expansion* : Refrijeran dalam fase cair di ekspansi sehingga terjadi penurunan tekanan dan temperatur secara drastis. Setelah proses ini refrijeran berada dalam kondisi fase cair dengan temperatur rendah. Dalam kondisi ini refrijeran siap untuk menyerap kalor dan memulai siklus kembali.



Gambar 2.1 Komponen Utama Sistem Refrijerasi Kompresi Uap [15]

Komponen utama dalam sistem refrijerasi kompresi uap sederhana siklus tunggal seperti yang digambarkan pada gambar 2.1 diatas adalah:

1. Evaporator

Evaporator adalah jenis dari penukar kalor (*heat exchanger*) sebagai media pemindahan kalor melalui permukaan evaporator agar refrijeran cair menguap dan menyerap panas dari suatu ruangan. Refrijeran yang berada dalam fase campuran cair jenuh dan uap menyerap kalor sehingga berubah menjadi uap. *Heat transfer* terjadi karena temperatur refrijeran yang lebih rendah daripada temperatur disekitar evaporator.

2. Kompresor

Kompresor merupakan salah satu komponen penting dalam sistem refrijerasi. Fungsi dari kompresor adalah untuk menaikkan tekanan dan temperatur refrijeran dari tekanan dan temperatur rendah menjadi tekanan dan temperatur tinggi, refrijeran dalam fase uap dikompresikan pada alat ini. Dengan adanya kompresi ini, maka terjadi perbedaan tekanan antara sisi keluar (*discharge*) dengan sisi masuk (*suction*) yang menyebabkan refrijeran dapat mengalir dalam sistem refrijerasi. Tingkat suhu yang harus dicapai tergantung pada jenis refrijeran dan suhu lingkungannya.

### 3. Kondenser

Kondenser adalah suatu alat penukar kalor dimana refrijeran melepas atau membuang kalor ke media pendingin seperti udara atau air. Refrijeran didalam kondenser berada pada keadaan uap super panas melepas kalor sehingga berubah fase menjadi cair. Untuk membuang kalor yang terkandung dalam refrijeran yang berada didalam kondenser diperlukan cooling medium. Sebuah kondenser harus mampu membuang kalor tersebut ke *cooling medium* yang digunakan oleh kondensernya. Sesuai dengan jenis *cooling medium* yang digunakan maka kondenser dapat dibedakan menjadi 3 (tiga), yaitu:

- *air cooled condenser*, menggunakan media udara sebagai pendinginnya.
- *water cooled condenser*, menggunakan media air sebagai pendinginnya.
- *evaporative condenser*, menggunakan media campuran air dan udara sebagai pendinginnya.

### 4. *Expansion Device*

Refrijeran pada fase cair dari kondenser yang akan diuapkan di evaporator dikontrol oleh alat ekspansi. Refrijeran berbentuk cair diekspansi yang menyebabkan fasenya berubah menjadi campuran cair jenuh & uap (*a saturated liquid-vapor mixture*) dan tekanannya turun. Ketika terjadi penurunan tekanan, temperaturnya juga turun. Fungsi *expansion device* adalah :

- a. Untuk menakar refrijeran cair dari saluran liquid line ke evaporator pada jumlah yang tepat sesuai kapasitas evaporator
- b. Untuk menjaga perbedaan tekanan antara tekanan kondensasi dan tekanan evaporasi tetap konstan, agar refrijeran cair yang diuapkan di evaporator selalu berada pada tekanan rendah sesuai yang diinginkan dan sekaligus menjaga tekanan tinggi di sisi kondenser.

## 2.2 Refrijeran

Dalam sistem refrijerasi, dibutuhkan media yang digunakan untuk memindahkan atau melepaskan panas dari suatu ruangan ke luar ruangan atau sistem, yang biasa disebut dengan refrijeran. Refrijeran berubah fase dari *liquid* menjadi *vapour* selama proses penyerapan panas dan mengkondensasi menjadi *liquid* kembali ketika melepaskan panas.

Suatu refrijeran harus memenuhi beberapa persyaratan, diantaranya, stabilitas kimia pada beberapa kondisi tertentu saat digunakan. Beberapa sifat yang berhubungan dengan keamanan refrijeran seperti tidak mudah terbakar (*non-flammable*) dan tidak beracun saat digunakan. Harga, ketersediaan, efisiensi, dan kecocokan dengan pelumas kompresor dan bahan-bahan dari komponen-komponen sistem refrijerasi. Pengaruh refrijeran terhadap lingkungan apabila refrijeran tersebut bocor dari suatu sistem.

Syarat-syarat sebuah refrijeran yang baik adalah sebagai berikut:

- titik didih yang rendah.
- tidak beracun.
- mudah untuk dicairkan pada temperatur dan tekanan sedang;
- tidak terpengaruh oleh uap air.
- dapat bercampur dengan oli, dan
- tidak bersifat korosif terhadap metal.

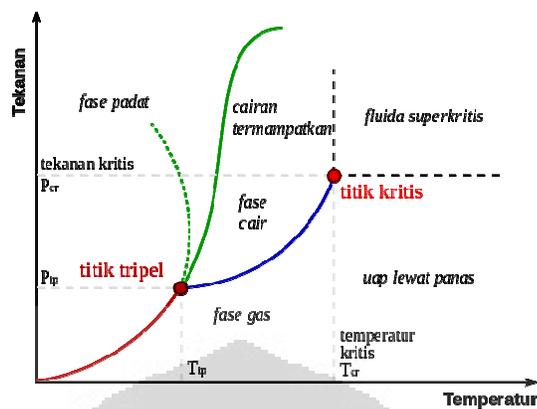
### 2.3 Siklus Refrijerasi *Cascade*

Sistem refrijerasi yang digunakan pada mesin pengeringan beku vakum adalah sistem *cascade*. Sistem refrijerasi *cascade* merupakan sistem refrijerasi yang terdiri dari dua model atau lebih siklus refrijerasi tunggal. Pada tingkat pertama biasa disebut sebagai siklus temperature tinggi (*High Stage/HS*) dan tingkat yang kedua disebut siklus temperature rendah (*Low Stage/LS*).



terjadi dibawah titik triple point, selanjutnya adalah proses sublimasi / proses pengeringan primer yaitu proses perubahan zat dari padat / es ke gas. Pada pengeringan beku vakum perubahan zat terjadi secara langsung dari es ke gas. Pada proses pengeringan primer dibutuhkan persediaan panas secara berkelanjutan. Pada beberapa literature menyebutkan bahwa energy panas yang dibutuhkan untuk perubahan zat dari es ke gas adalah 2840kJ/kg. Panas sebagai media sublimasi diperoleh diantaranya dengan menggunakan pemanas elektrik, pemanas microwave dan panas matahari. Proses selanjutnya adalah proses pengeringan sekunder, pada proses ini merupakan akhir dari proses pengeringan beku vakum dimana kandungan air yang tersisa pada celah-celah es kristal tersublimasi. Proses pendukung lainnya adalah proses penangkapan uap air agar gas yang mengandung uap air tidak masuk dalam pompa vakum, yang dapat menyebabkan kerusakan pada vakum. Beberapa penelitian menyebutkan penangkapan uap air ini dengan jalan penggunaan Nitrogen (N<sub>2</sub>).

Pengeringan beku vakum adalah sebuah metode pengeringan yang proses pengeringannya dilakukan dibawah titik *triple point*. Pengeringan beku vakum dapat mempertahankan nutrisi atau kandungan gizi, warna, rasa dan struktur. Proses pembekuan vakum diawali dengan penggunaan pompa vakum untuk menurunkan tekanan di dalam ruang pengering, dimana sesuai dengan sifat air bahwa dengan menurunkan tekanan maka akan menyebabkan turunnya temperatur air sampai membeku yang digambarkan pada gambar 2.3 diagram fase air. Kemudian setelah material membeku, akan mencapai saturasi dan berubah fase, hal ini yang dinamakan sublimasi atau berubah fase dari fase solid ke gas dimana terjadi pada tekanan yang konstan. Dari diagram fase air jelas terlihat bahwa jika pada tekanan konstan maka dengan bertambah temperatur akan mempercepat perubahan fase. Proses-proses pengeringan vakum tersebut harus didukung dengan adanya *cold trap* (perangkap uap) untuk menampung uap air selama proses pengeringan agar tidak masuk ke dalam pompa vakum, karena jika uap air tersebut masuk pompa vakum akan menimbulkan kerusakan pada pompa vakum.



Gambar 2.3 Diagram Fase Air [14]

Kelemahan dari pengeringan beku adalah sangat intensif dalam penggunaan energi karena proses-proses diatas. Pada penelitian-penelitian terdahulu digunakan beberapa cara diantaranya dengan meningkatkan laju pengeringan dan Laju perpindahan massa (Mass Diffusivity dengan menaikkan temperatur pemanas dari pemanas elektrik pada posisi atas, diantaranya dilakukan oleh R. Chakraborty (2006) menyebutkan bahwa pada pengeringan mangga dengan memvariasikan temperatur pemanas atas 20°C sampai dengan 50°C dapat meningkatkan laju pengeringan sehingga dapat mengurangi waktu pengeringan. Selain itu massa diffusivity juga tergantung dari ketebalan produk, James. P George (2002) menyebutkan pada pengeringan jamur dengan memvariasikan tebal material 1, 2, dan 3 cm menyebutkan semakin tebal material maka akan meningkatkan massa diffusivity dari material. Penelitian paling baru adalah yang dilakukan oleh Arun. S Mujumdar dan Min zhang (2010) menyebutkan bahwa untuk mengeringkan 25 gram teripang dengan Kandungan air awal 70% dan temperatur pembekuan 20°C dapat dikeringkan dengan temperatur pemanas dari microwave sebesar 60°C yang menghasilkan produk teripang dengan kandungan air 6% selama 18 jam. Penelitian-penelitian diatas dapat menunjukkan bahwa massa diffusivity mempunyai pengaruh terhadap waktu pengeringan. Sedangkan waktu pengeringan sendiri dipengaruhi oleh ketebalan material, kandungan air material dan temperatur pemanas untuk proses sublimasi.

Adapun kelebihan proses pengeringan beku adalah sebagai berikut:

- Dengan proses pada temperatur rendah dapat mengurangi degradasi kandungan mineral pada bahan yang mempunyai sensitifitas panas tinggi.

- Dapat dilakukan penakaran yang akurat pada produk yang akan dikeringkan.
- Kandungan air dari produk akhir dapat dikendalikan selama proses berlangsung.
- Mempunyai penampilan yang bagus pada produk kering .
- Produk kering mempunyai *specific area* yang besar sehingga dapat mudah dilarutkan kembali dengan air.

Adapun kekurangan proses pengeringan beku adalah sebagai berikut:

- Biaya yang mahal pada pengadaan alat, pengoperasian serta perawatan.
- Kompleksitas proses serta peralatan membutuhkan tenaga ahli yang dapat saling bekerjasama dengan baik.

Komponen-komponen yang digunakan pada skema pengujian beku vakum adalah sebagai berikut :

1. Pressure transmitter
2. Thermocouple type K
3. Pipa tembaga ukuran 3/8" , 1/4" , dan pipa kapiler ukuran 0,028 mm.
4. Check Valve
5. Oil Separator
6. Filter Dryer
7. Shut off valve
8. Kondenser
9. Needle valve
10. Evaporator (Cold trap)
11. Thermocouple evaporator
13. .Kompresor
14. .Pompa Vakum
15. Tabung reservoir
16. Ball valve
17. Air flow meter
18. National Instrument

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah ubur-ubur (*Aurella Sp.*) dengan terlebih dahulu diblender dijadikan menjadi cairan. Beberapa alat ukur digunakan untuk mengukur tekanan chamber, temperatur baik diruangan pengering, cold trap dan di dalam material. Alat untuk mengukur tekanan digunakan pressure transmitter PTX 1400 dengan spesifikasi 0-4 bar dan akurasi 0.15%, sedangkan alat untuk mengukur temperatur digunakan thermocouple tipe K dengan akurasi 0.4%. Semua alat ukur tersebut dikoneksikan dengan menggunakan National Instrument agar bisa dibaca oleh computer dengan menggunakan software Lab View. Untuk mengukur Loss On Drying (LOD) digunakan timbangan digital AND dengan spesifikasi 0-1200 gram dan akurasi 0.1%.

#### 2.4.1. Proses Pembekuan

Untuk membekukan suatu bahan produk perlu didinginkan sampai temperatur dimana bagian air dan padatan dari bahan terkristalisasi secara keseluruhan atau dengan kata lain pembekuan dimana bagian air yang terkristalisasi dan padatan saling mengikat satu sama lain untuk membentuk satu kesatuan padat. Dalam proses pembekuan, kristal es akan terbentuk untuk pertama kali yang kemudian disusul dengan larutan lain secara berlanjut yang bisa bervariasi tergantung harga pH. Pada sebagian besar bahan dapat ditentukan titik temperatur *eutectic*-nya namun banyak juga yang tidak memiliki titik tersebut. Adapun proses kristalisasi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: laju pendinginan, konsentrasi struktur bahan, temperatur akhir pendinginan, waktu yang diperlukan untuk pendinginan hingga terjadi pembekuan. Pada beberapa bahan produk tidak terjadi proses kristalisasi dan produk tetap dalam keadaan semula atau dalam kondisi *glass-like phase*.

#### 2.4.2. Jumlah Panas, Konduktivitas Panas, Perpindahan Kalor dan Laju Pendinginan

Untuk air murni, jika temperatur awal dan akhir diketahui panas lebur yang harus dibuang untuk proses pembekuan ( $Q_{tot}$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{\text{tot}} = c_w (T_1 - T_0) + Q_e + c_e (T_0 - T_2) \text{ (kJ/Kg)} \quad (2.1)$$

Dimana:

$c_w$  = kapasitas panas spesifik air

$Q_e$  = panas lebur es

$c_e$  = kapasitas panas spesifik es

$T_0$  = temperatur beku es

$T_1$  = temperatur awal air

$T_2$  = temperatur akhir es

Sebagai referensi, temperatur  $c_w$  terletak diantara +20 sampai 0 °C dan untuk  $c_e$  antara 0 sampai -50 °C digunakan sebagai temperatur rata-rata acuan.

Untuk larutan maupun campuran maka kandungan bahan harus diketahui terlebih dahulu. Dalam hal ini panas lebur yang harus dibuang selama proses pembekuan dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{\text{tot}} = [(c_w x_w + c_f x_f) (T_1 - T_0)] + x_w Q_e + [(c_e x_w + c_f x_w) (T_0 - T_2)] \quad (2.2)$$

Dimana:

$x_w$  = Bagian air pada saat temperatur diatas 0 °C

$c_f$  = Panas spesifik padatan bahan, contoh:

untuk produk daging binatang  $\approx 1,47 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

untuk produk tumbu-tumbuhan  $\approx 1,34 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

untuk beberapa bahan padatan:

karbohidrat  $\approx 1,42 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

protein  $\approx 1,55 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

lemak  $\approx 1,70 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

garam  $\approx 0,80 \text{ kJ/Kg } ^\circ\text{C}$

$x_f$  = Bagian padatan

$x_w$  = Bagian es yaitu bagian yang membeku saat temperatur mencapai  $T_2$

Jika terdapat *unfreezable water* (UFW) yakni tidak semua air dapat membeku pada temperatur  $T_2$  maka harus ditambahkan suatu formula yang merefleksikan proses pendinginan pada bagian yang belum membeku.

Adapun dalam perhitungan, perpindahan energi dari produk beku ke media pendingin sekitar dapat dihitung melalui beberapa tahapan penyederhanaan (asumsi) sebagaimana berikut:

1. Dimensi produk berbentuk lapisan tipis dengan berbandingan luas terhadap ketebalan yang besar
2. Produk didinginkan dari satu sisi permukaan
3. Aliran energi tegak lurus terhadap luasan permukaan yang mengalami ekspansi akibat proses pengeringan

Waktu proses pembekuan ( $t_e$ ) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$t_e = \Delta J / \Delta T \rho_g (d^2 / 2\lambda_g + d / K_{su}) \quad (2.3)$$

$$t_e = \Delta J / \Delta T \rho_g (w + u) \quad (2.4)$$

dimana:

$t_e$  = waktu pembekuan

$\Delta J$  = perbedaan enthalpi antara proses pembekuan awal dengan temperatur akhir

$\Delta T$  = perbedaan temperatur antara titik beku dengan media pendingin

$d$  = ketebalan produk diukur sejajar dengan arah laju perpindahan kalor

$\rho_g$  = berat jenis produk yang telah membeku

$\lambda_g$  = konduktifitas termal produk yang telah membeku

$K_{su}$  = koefisien perpindahan kalor permukaan antara media pendingin dengan daerah pembekuan

#### 2.4.3. Proses Pengeringan

Proses pengeringan pada umumnya merupakan proses yang meliputi dua mekanisme: (i) energi dialirkan untuk mengubah es menjadi uap air (dengan

temperatur diantara -21 sampai -30 °C dibutuhkan energi sekitar 2805 kJ/Kg) dan (ii) proses perpindahan uap air dari permukaan sublimasi melalui bagian produk yang telah mengalami proses pengeringan menuju ke ruang pengering untuk kemudian mengalir kedalam ruang kondensasi atau sistem penyerapan uap air. Gambar 2.1.2 menunjukkan proses pengeringan utama (*MD = Main Drying*) yang diamati dengan *cryomicroscope* dimana 10% cairan encer dari *hydroxyethyl starch* (HES) secara terarah dibekukan. *dendrite* es dikelilingi konsentrasi padatan yang digambarkan dengan garis lebih tebal setelah es mengalami proses sublimasi. Dengan tidak adanya proses pembekuan yang optimal, maka kecepatan laju proses sublimasi menjadi tidak merata.

Setelah es mengalami proses sublimasi, maka langkah selanjutnya adalah penyerapan air dari bagian padat produk yang disebut pengeringan lanjutan (*Secondary Drying*). Siklus dalam proses ini berbeda dengan yang terjadi pada pengeringan utama (*Main Drying*). Dalam proses pengeringan lanjutan ini transport energi tidak memegang peranan yang penting karena kandungan air kurang dari 10% dari padatan. Kendatipun demikian hal itu membutuhkan perhatian tersendiri karena proses ini berhubungan dengan konsumsi waktu dari proses yang bisa memakan waktu seperti pada proses pengeringan utama. Laju pengeringan (berdasarkan proposal RUUI) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q_{sb} = m_{sb} H_s + m_a C p_k (T_a - T_{sb}) \quad (2.5)$$

Dimana:

$m_{sb}$  = massa sublimasi

$m_a$  = massa akhir

$H_s$  = enthalphy sublimasi

$T_{sb}$  = temperatur sublimasi

$T_a$  = temperatur ruangan

#### 2.4.4. Pengerinan Dengan Sublimasi (*Main Drying*)

Jumlah energi yang diperlukan dalam proses sublimasi tergantung pada temperatur sublimasi itu sendiri, tetapi pada temperatur antara -10 hingga -40°C variasi energi kurang dari 2%. Lebih dari itu, sebagian besar energi dipergunakan untuk memanaskan uap air ketika melewati bagian produk yang telah kering terlebih dahulu ataupun bagian produk yang bersentuhan dengan wadah penampung produk. Panas spesifik uap air berkisar 1,67 kJ/Kg dan pertambahan temperatur maksimum mencapai +20 atau +40°C. Namun energi panas tersebut dapat diabaikan jika dibandingkan dengan energi sublimasi yang diperlukan yaitu untuk memanaskan uap dari -30 ke +30°C yang memerlukan ~100 kJ/Kg atau mencapai ~3,5% dari proses sublimasi secara keseluruhan.

Energi sublimasi dapat disalurkan ke padatan es produk dengan beberapa cara antara lain:

1. Dengan proses radiasi dari suatu permukaan yang dipanaskan dimana flux panas pada permukaan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$q = \delta(K_{Str1}^4 - K_{Str2}^4) \times 1 / \left[ \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} \right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

Dimana:

$$\delta = 2,05 \times 10^{-7} \text{ kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$$

$K_{Str1}$  = Temperatur pada lapisan permukaan produk (K)

$K_{Str2}$  = Temperatur pada lapisan produk beku (K)

$\varepsilon_1$  = Efisiensi radiasi pada lapisan permukaan produk

$\varepsilon_2$  = Efisiensi radiasi pada lapisan beku produk

2. Dengan proses konduksi dari suatu plat atau gas yang dipanaskan.
3. Dengan konveksi gas
4. Dengan proses *dielectric* dalam frekwensi tinggi yang dimasukkan kedalam es.

Dengan data-data lengkap sesuai yang diperlukan dan beberapa asumsi serta beberapa penyederhanaan, diantaranya:

- Tebal lapisan es tak terbatas, energi hanya disalurkan melalui rak wadah menuju satu sisi dari lapisan produk
- Uap air hanya dipindahkan dari permukaan es melalui sela-sela (porositas) produk kering
- Produk yang membeku tidak mengalami porositas (dianggap pejal).
- Proses perpindahan panas yang terjadi pada bagian yang kering diabaikan

Maka waktu yang diperlukan dalam proses pengeringan utama (*Main Drying*) dapat dirumuskan dengan:

$$t_{md} = (\rho g \xi_w LS \Delta m d) / T_{tot} [(1/K_{tot}) + (d/2\lambda g) + (d/2LSb/\mu)] \quad (2.7)$$

$\rho g$  = Densitas produk yang membeku ( $\text{Kg/m}^2$ )

$\xi_w$  = Bagian air ( $\text{kg/kg}$ )

$LS$  = Energi Sublimasi ( $2805 \text{ kJ/kg}$ )

$T_{tot}$  = Beda Temperatur ( $T_{tot} = T_{shelf} - T_{ice}$ )

$K_{tot}$  = Koefisien perpindahan panas total dari rak wadah hingga permukaan es yang akan mengalami sublimasi

$\lambda g$  = Konduktifitas panas dari produk beku

$d$  = Ketebalan produk keseluruhan (m)

$\Delta m$  = Kandungan air yang membeku

$b/\mu$  = Permeabilitas atau koefisien perpindahan massa ( $\text{kg/m h mbar}$ )

untuk uap air yang melewati produk yang telah kering (dengan asumsi ini menghasilkan kesalahan  $\sim 4\%$  pada  $T_{tot} = 100^\circ\text{C}$  dan  $\sim 2\%$  pada  $T_{tot} = 50^\circ\text{C}$ ).

Pada intinya proses pengeringan utama (*Main Drying*) dipengaruhi oleh 2 variabel yaitu:

1. Pengendalian tekanan operasi yang sesuai,  $p_c$
2. Pemilihan temperatur rak wadah,  $T_{sh}$

#### 2.4.5. Pengeringan Dengan Desorpsi (*Secondary Drying*)

Selama proses pengeringan lanjutan (*Secondary Drying*), dimana kandungan air yang dibuang merupakan bagian yang melekat pada padatan yang tidak mengalami proses kristalisasi. Kandungan air tersebut dapat terikat pada permukaan kristal produk ataupun pada bagian butir produk yang telah kering.

Tiga kemungkinan untuk mendefinisikan perubahan fase dari proses pengeringan utama menuju pengeringan lanjutan (*Pikal [1.60]*) adalah:

- Pertambahan temperatur produk
- Pengurangan tekanan uap air parsial
- Peningkatan pada pengukuran tekanan  $dp/dt$  ( $dt$  waktu)

Temperatur produk mengalami peningkatan pada akhir proses pengeringan utama. Pengukuran temperatur yang dilakukan sensor dengan bias yang lebar mengakibatkan ketidakpastian pengukuran pada akhir proses pengeringan utama. Perubahan tekanan uap air parsial selama proses pengalihan dari pengeringan utama menuju pengeringan lanjutan memerlukan waktu beberapa jam tergantung pada kondisi proses yang sedang berlangsung. Pada sebagian praktik pengeringan, salah satu proses bisa memerlukan waktu beberapa jam sebelum temperatur meningkat hingga mencapai proses pengeringan lanjutan, hal ini dilakukan guna menghindari kerusakan sebagian produk (*partial collapse*). Kemungkinan lain untuk mengetahui perpindahan fase proses pengeringan adalah dengan mengukur peningkatan tekanan dalam interval waktu tertentu hingga terjadi perubahan yang bisa digunakan sebagai batasan perpindahan proses. Cara tersebut akan lebih jelas penerapannya jika besarnya laju penyerapan air per satuan waktu dan keterkaitannya dengan bagian padatan dapat diketahui yang biasa disebut dengan laju penyerapan (*DR: Desorption Rate*).

Jumlah air yang terserap dapat dihitung dengan mengamati kenaikan tekanan setelah dilakukan penutupan katup antara ruang pengering dengan ruang evaporator, dibagi dengan lamanya waktu penutupan dan volume ruang

pengering. Dengan menggunakan barometer, alat pengukur temperatur (*BTM: barometric temperature measurement*) serta pengukuran laju desorpsi (*DR: desorption rate*) didapat bahwa pengaruh variasi kondisi pengeringan dapat dilihat dan dianalisa.

#### 2.4.6 Pengukuran Temperatur dan Tekanan

Pengukuran temperatur dan tekanan selama proses pengeringan beku (*freeze-drying*) merupakan salah satu pekerjaan yang tidak mudah. Elemen thermal (*Th; thermal element*) serta dependensi tahanan elektrik terhadap temperatur (RTD) sistem hanya melakukan pengukurannya sendiri dan hanya melakukan temperatur pada daerah yang melakukan kontak ataupun yang paling dekat dengan alat ukur tersebut. Lebih dari itu, alat ukur melakukan pemanasan sendiri dan sekelilingnya dengan adanya arus listrik yang mengalir pada sensor selama proses dan juga mempengaruhi proses kristalisasi produk disekelilingnya dengan cara:

- Dengan energi yang ditimbulkannya
- Dengan induksi *heterogeneous crystallization* yang menimbulkan efek yang berbeda seandainya tanpa sensor.
- Dengan proses *subcooling* yang berbeda dimana dapat menjadi lebih kecil pada daerah sekeliling sensor yang akhirnya dapat menghasilkan kekasaran struktur produk

Struktur produk akan berubah dan masukan panas oleh sensor juga akan mempengaruhi proses pengeringan utama pada botol/wadah produk yang menggunakan sensor. Berkaitan dengan pengukuran itu, permasalahan lain yang muncul dalam prakteknya adalah dimana sensor *Th* dan RTD harus dimasukkan kedalam produk lalu disambungkan dengan saluran yang melawati dinding vakum menuju rangkaian sistem pengukur. Sementara pengaturan posisi sensor memiliki pengaruh yang terbatas dimana selama proses pembekuan, sensor temperatur menghasilkan gambaran pengukuran yang cukup akurat meskipun sebenarnya produk memberikan reaksi yang berbeda pada saat dimasuki sensor pengukur dan tanpa sensor.

Selama proses pengeringan utama situasinya berbeda dimana kondisi kontak permukaan sensor yang paling dekat dengan produk hanya akurat pada awal proses pengeringan utama untuk kemudian temperatur yang terukur tergantung secara tidak langsung pada kondisi proses dimana sangat sulit untuk dianalisa. Adapun posisi sensor, diatas, di tengah ataupun pada bagian bawah botol / wadah sangat menentukan hasil data yang terukur. Volume isi botol yang lebih kecil (ketebalan sekian millimeter) akan menghasilkan data pengukuran yang tidak cukup menghasilkan data yang bermanfaat sebagai bahan analisa. Parameter utama dalam proses pengeringan utama adalah temperatur pada daerah lapisan dimana terjadi proses sublimasi yang tidak bisa diukur dengan T<sub>hs</sub> ataupun RTDs.

#### 2.4.7 Transportasi Uap Air Selama Pengeringan

Perpindahan uap air dalam proses pengeringan beku bisa dijelaskan secara skematik dengan mengacu padat diubah menjadi uap dan harus mengalir keluar dari botol menuju ruang pengering. Diantara dinding ruang pengering atau batasan lain diperlukan ruangan sebesar. Uap air kemudian mengalir menuju kondensor dimana sebagian besar uap air akan mengalami kondensasi. Campuran sisa uap air akan ataupun sisa udara kemudian dipompa oleh pompa vakum.

### 2.5 Perpindahan Kalor dan Massa

Bila pada dua benda atau lebih terjadi kontak termal maka akan terjadi aliran kalor dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah, hingga tercapainya kesetimbangan termal. Perpindahan kalor dapat terjadi melalui tiga mekanisme, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Namun pada skripsi ini, perpindahan kalor yang terjadi pada material yang dikeringkan hanya melalui dua mekanisme, yaitu konduksi dan radiasi. Hal ini dikarenakan udara di dalam ruang material telah tervakum oleh pompa vakum sehingga tidak ada perantara bagi perpindahan kalor konveksi. Dalam proses pengeringan, proses perpindahan kalor tidak dapat dipisahkan

dengan proses perpindahan massa. Proses perpindahan kalor akan menyebabkan sejumlah massa berpindah dengan kecepatan tertentu ( $m$ ).

#### 2.4.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Jika sebuah logam yang salah satu ujungnya dipanaskan dalam selang waktu tertentu, ujung lainnya pun akan terasa panas. Hal ini menunjukkan bahwa pada batang logam tersebut terjadi aliran atau perpindahan kalor dari bagian logam yang bertemperatur tinggi ke bagian logam yang bertemperatur rendah. Perpindahan kalor pada benda padat yang tidak diikuti perpindahan massa ini disebut dengan perpindahan kalor secara konduksi. Jadi konduksi adalah perpindahan kalor melalui zat perantara dan selama terjadi perpindahan kalor tidak disertai dengan perpindahan partikel-partikel zat perantaranya.

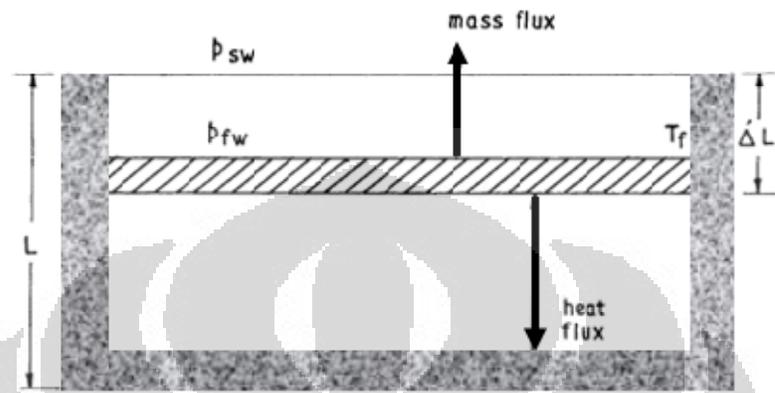
Perpindahan kalor di dalam zat padat dapat dijelaskan dengan teori atom. Atom-atom dalam zat padat yang dipanaskan akan bergetar dengan kuat. Atom-atom yang bergetar akan memindahkan sebagian energinya kepada atom-atom tetangga terdekat yang ditumbuknya. Kemudian atom tetangga yang ditumbuk dan mendapatkan kalor ini akan ikut bergetar dan menumbuk atom tetangga lainnya, demikian seterusnya sehingga terjadi perpindahan kalor dalam zat padat.

Syarat terjadinya konduksi kalor suatu benda adalah adanya perbedaan temperatur antar dua tempat pada benda tersebut. Kalor akan berpindah dari tempat bertemperatur tinggi ke tempat bertemperatur rendah. Jika temperatur kedua tempat tersebut menjadi sama, maka rambatan kalor pun akan terhenti.

Berdasarkan kemampuan suatu zat menghantarkan kalor secara konduksi, zat dapat digolongkan menjadi dua golongan, yaitu konduktor dan isolator. Konduktor adalah zat yang dapat menghantarkan kalor dengan baik, sedangkan isolator adalah kebalikannya, yaitu zat yang sukar menghantarkan kalor. Dari hasil percobaan diperoleh bahwa perpindahan kalor secara konduksi bergantung pada jenis logam, luas penampang penghantar kalor, perbedaan temperatur antar ujung-ujung logam, serta panjang penghantar yang dilalui oleh kalor tersebut.

Gambar 2.4 merepresentasikan perpindahan panas dan massa pada material yang dikeringkan di tahap awal. Wadah material diisolasi sehingga perpindahan panas hanya dari arah lingkungan menuju material beku secara satu

dimensi. Batas antara material kering dengan material beku adalah permukaan sublimasi. Kondisi batas adalah hanya pada wadah material.



Gambar 2.4. Skema Perpindahan Kalor dan Massa dengan Kondisi Batas Konduksi [12]

Persamaan matematis untuk besarnya perpindahan kalor konduksi pada skema di atas adalah:

$$q = \frac{\lambda}{L-\Delta L} (T_s - T_f) \quad (2.8)$$

Jika dilakukan substitusi  $\Delta L = (1-x)L$ , maka didapat:

$$q = \frac{\lambda}{xL} (T_s - T_f) \quad (2.9)$$

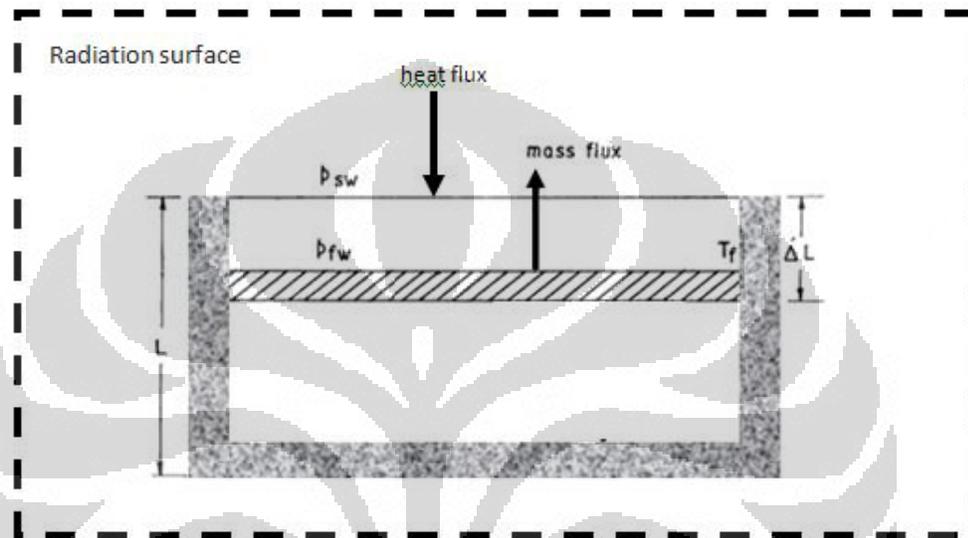
Sementara laju pengeringan dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$m = \frac{q}{\Delta h} \quad (2.10)$$

#### 2.4.2 Perpindahan Kalor Radiasi

Radiasi adalah perpindahan kalor dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Pada radiasi, kalor atau energi merambat tanpa membutuhkan zat perantara, berbeda halnya dengan konduksi atau konveksi yang selalu membutuhkan medium.

Gambar 2.5 merepresentasikan proses perpindahan panas radiasi dan massa pada material yang dikeringkan di tahap awal. Wadah material diisolasi sehingga perpindahan panas hanya dari arah lingkungan menuju material beku secara satu dimensi. Batas antara material kering dengan material beku adalah permukaan sublimasi. Kondisi batas adalah ruangan material.



Gambar 2.5 Skema Perpindahan Kalor dan Massa dengan Kondisi Batas Radiasi [12]

Persamaan matematis untuk besarnya perpindahan kalor radiasi adalah:

$$q = \sigma FL(T_s^4 - T_f^4) \quad (2.11)$$

Laju pengeringan dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$m = \frac{q}{\Delta h} \quad (2.12)$$

## 2.6 Pengukuran Aliran Udara Panas

Untuk mengukur jumlah udara panas yang mengalir ke dalam ruang pengering digunakan alat tambahan berupa *air flow meter* yang berfungsi untuk mengatur aliran udara yang masuk dari lingkungan ke dalam reservoir. Kemudian, untuk mengalirkan udara tersebut ke dalam ruang pengering menggunakan pipa kapiler yang diletakkan pada reservoir. Untuk menghasilkan panas pada reservoir, reservoir dililit oleh pipa tembaga yang dimanfaatkan sebagai panas buang kondenser di Low Stage.

### 2.6.1 Reservoir

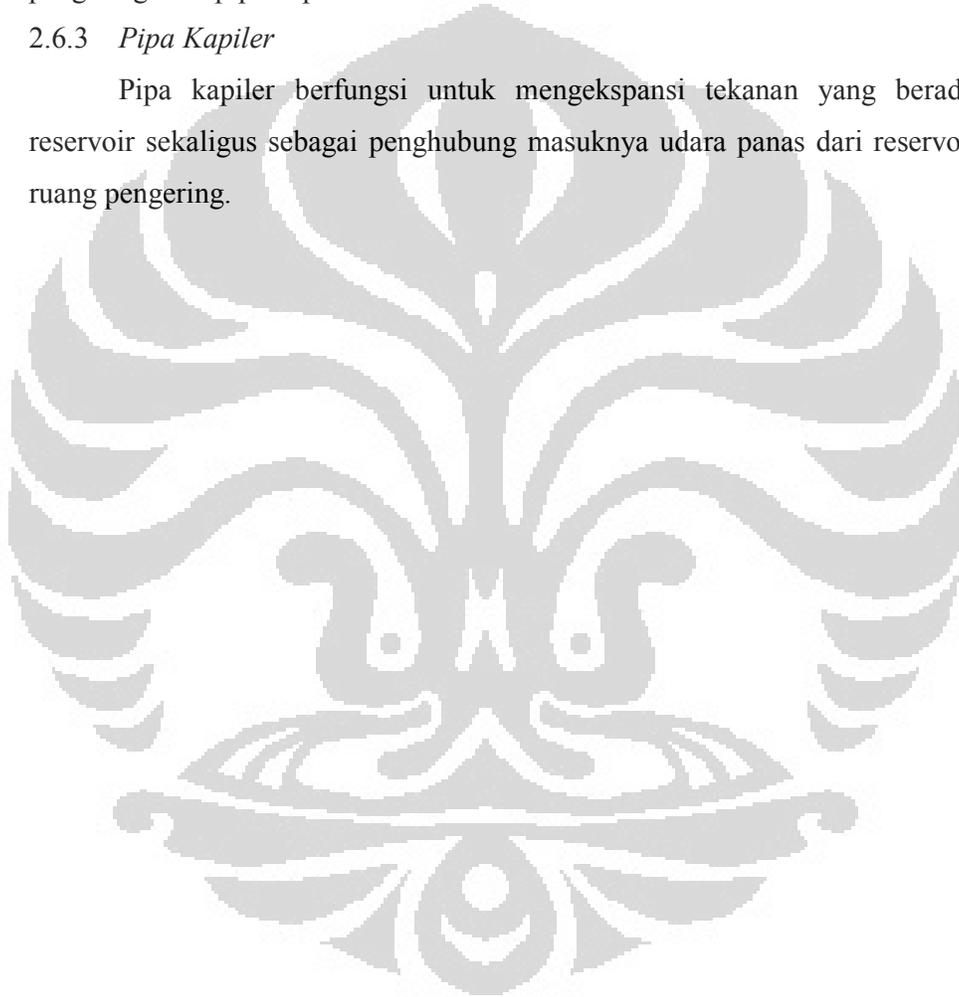
Reservoir adalah tabung yang berfungsi sebagai tempat penyerapan udara dari lingkungan yang dipanaskan melalui panas buang kondenser di sistem Low Stage.

#### 2.6.2 *Air Flow Meter*

Air Flow Meter berfungsi untuk mengatur jumlah massa udara yang masuk dari lingkungan ke dalam reservoir kemudian dialirkan menuju ruang pengering oleh pipa kapiler.

#### 2.6.3 *Pipa Kapiler*

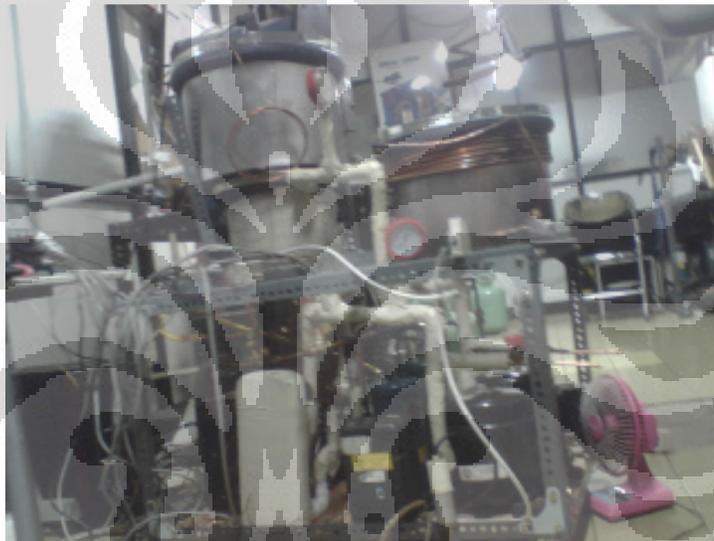
Pipa kapiler berfungsi untuk mengekspansi tekanan yang berada di reservoir sekaligus sebagai penghubung masuknya udara panas dari reservoir ke ruang pengering.



## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Garis Besar Pengujian

Bab ini menjelaskan mengenai prosedur pada saat pengujian alat pengering beku vakum *compact* yang telah dilakukan penulis untuk mendapatkan data yang digunakan untuk melihat unjuk kerja dari alat *freeze vacuum drying compact* yang telah dirancang dan dibuat. Untuk lebih jelasnya penulis merangkumnya pada bab ini dan dapat dijelaskan seperti dibawah ini.



Gambar 3.1 Freeze Vacuum Drying

#### 3.1.1 Parameter – parameter yang Ditentukan

Pada pengoperasian *freeze vacuum drying* terdapat parameter-parameter yang ditentukan, adapun parameter-parameter tersebut adalah :

##### ⊙ Tekanan

Tekanan yang dimaksud adalah tekanan vakum yang dihasilkan pada ruang vakum dibatasi dengan range 0.1 mbar dibawah nol relatif tekanan ambien. Dalam hal ini tekanan vakum yang terbatas mengingat kemampuan pompa vakum dan tabung yang akan digunakan sebagai ruang vakum.

### ⊙ Temperatur

Temperatur yang dimaksud adalah temperatur pada ruang cold trap yang dihasilkan oleh evaporator LS dan temperatur ruang vakum yang dibatasi sesuai dengan pengambilan data (dijadikan variable pengambilan data).

*Software* instrumentasi yang digunakan pada saat pengukuran :

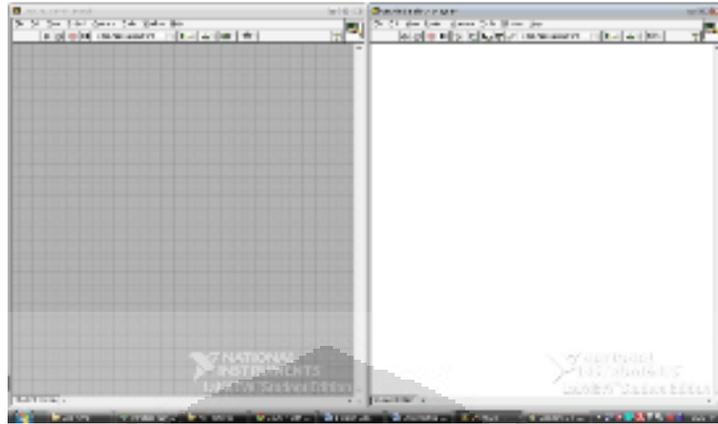
#### 3.1.2 *LabVIEW*

*LabVIEW* (singkatan dari *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) adalah perangkat lunak komputer untuk pemrosesan dan visualisasi data dalam bidang akuisisi data, kendali instrumentasi serta automasi industri yang pertama kali dikembangkan oleh perusahaan *National Instruments* pada tahun 1986. *LabVIEW* merupakan salah satu bahasa pemrograman komputer grafik yang menggunakan icon-icon sebagai pengganti teks dalam membuat aplikasi. Memang belum begitu banyak yang mengenal *LabVIEW*, biasanya program *LabVIEW* dipakai saat praktikum sistem kendali. Berbeda dengan pemrograman berbasis teks dimana instruksi-instruksi menentukan eksekusi program, *LabVIEW* merupakan pemrograman aliran data dimana aliran data menentukan eksekusi dari program.

Program *LabVIEW* disebut dengan *Virtual Instrumen* karena beberapa tampilan dan operasi pada program *LabVIEW* menyerupai suatu instrumen seperti *osiloskop* dan *multimeter*. Setiap *VI* menggunakan fungsi-fungsi yang memanipulasi input dari user interface atau sumber lain dan menampilkan informasi tersebut atau memindahkan informasi tersebut ke *file* komputer lain.

*LabVIEW* terdiri dari tiga komponen, yaitu :

1. *Front panel*, merupakan *user interface*.
2. *Block diagram*, terdiri dari sumber-sumber grafik yang mendefinisikan fungsi-fungsi dari *VI*.
3. *Icon* dan *connector panel*, mengidentifikasi suatu *VI* sehingga bisa digunakan pada *VI* yang lain. *VI* yang terdapat pada *VI* lain disebut dengan sub*VI*.



Gambar 3.2 Tampilan *LabVIEW*

### 3.2 Komponen Mesin Pengering Beku Vakum

Pada pengujian komponen yang dibutuhkan yang kemudian disusun sesuai dengan kebutuhan pengujian. Komponen-komponen yang digunakan pada mesin beku vakum antara lain :

#### 3.2.1 Pompa Vakum

Pompa vakum yang dipergunakan untuk memvakum sistem sebelum diisi refrijeran dan digunakan juga untuk menurunkan tekanan pada tabung vakum. Pompa vakum yang digunakan mempunyai spesifikasi :



Gambar 3.3 Pompa Vakum

*Model* : *VE2100N*

*Free Air Displacement*: 12 CFM  
*Ultimate Vacuum* : 15 micron  
*Voltage* : 230V~/50-60Hz  
*Power* : 1 HP  
*Oil Capacity* : 590 mL

### 3.2.2 Ruang Material

Ruang material merupakan salah satu bagian utama dari alat *freeze vacuum drying* dimana digunakan untuk tempat pengujian. Tabung ini ditutup dengan akrilik setebal 2 cm. Tutup tabung dirancang untuk dapat digunakan sebagai tempat meletakkan alat ukur seperti *pressure transmitter* dan termokopel. Ruang material juga digunakan untuk tempat menaruh produk uji (*specimen*).



Gambar 3.4 Ruang Material

### 3.2.3 Kompresor

Pada mesin pengering beku vakum menggunakan dua kompresor yang memiliki spesifikasi yang sama.

Merk : Tecumseh  
Tipe : Full Hermetik  
Daya : ½ PK



Gambar 3.5 Kompresor

#### 3.2.4 *Plate Heat Exchanger (PHE)*

*Plate Heat Exchanger (PHE)* adalah jenis penukar kalor yang menggunakan plat metal sebagai perantara antara dua aliran fluida. Dalam alat ini, PHE digunakan sebagai evaporator pada bagian HS dan sebagai kondenser pada LS.



Gambar 3.6 Plate Heat Exchanger

#### 3.2.5 *Needle Valve*

*Needle valve* dalam sistem digunakan sebagai peralatan ekspansi.

Kelebihan jenis katup ini adalah dapat dilakukan pengaturan *plunger* yang jauh lebih teliti daripada TXV. *Needle valve* juga digunakan sebagai alat bantu saat kalibrasi *pressure transmitter*.

Merk / Tipe : Hy-Lock  
Tekanan max. : 6000 psi



Gambar 3.7 Needle Valve

### 3.2.6 Kondenser

Pada alat ini, terdapat dua kondenser, yaitu kondenser HS yang diletakkan setelah kompresor HS dan kondenser LS yang terletak di pada percabangan discharge kompresor LS.

Tipe : - HS = *fin & tube air cooled*  
- LS = *tube air cooled*

Material : pipa tembaga



Gambar 3.8 Kondenser

### 3.2.7 Evaporator

Evaporator pada alat ini biasa disebut dengan *coldtrap*. Coldtrap terletak di bawah ruang material. Ruangan tersebut dibuat dari tabung *stainless steel* yang dililit dengan pipa tembaga 3/8 “ dengan dimensi diameter 220 mm, tinggi 220 mm, dan tebal 2 mm.



Gambar 3.9 Evaporator

### 3.2.8 *Stop Valve*

Komponen ini digunakan untuk membuka dan menutup aliran refrijeran.



Gambar 3.10 *Stop Valve*

### 3.2.9 *Check Valve*

*Check valve* berfungsi untuk menjamin arah aliran refrijeran hanya mengalir satu arah dan menjamin tidak terjadi aliran balik refrijeran. *Check valve* yang digunakan adalah tipe *ball valve*.



Gambar 3.11 *Check Valve*

Perbedaan antara *valve* yang terdapat pada sistem refrijerasi mesin pengering beku adalah :

- *Needle valve* berfungsi untuk mengatur aliran refrijeran yang mengalir dalam sistem refrigasi dan berfungsi untuk menurunkan tekanan refrijeran.
- *Stop valve* berfungsi untuk membuka dan menutup aliran refrijeran secara manual.
- *Check valve* berfungsi menjamin arah aliran refrijeran hanya terjadi satu arah dan mencegah terjadinya lairan balik refrigeran.

### 3.2.10 Tempat Material

Tempat material terbuat dari panci teflon yang diisolasi semua sisinya sehingga yang menerima panas hanya bagian permukaannya saja. Diameter tempat material adalah sekitar 12 cm.



Gambar 3.12 Tempat Material

### 3.2.11 Filter Dyer

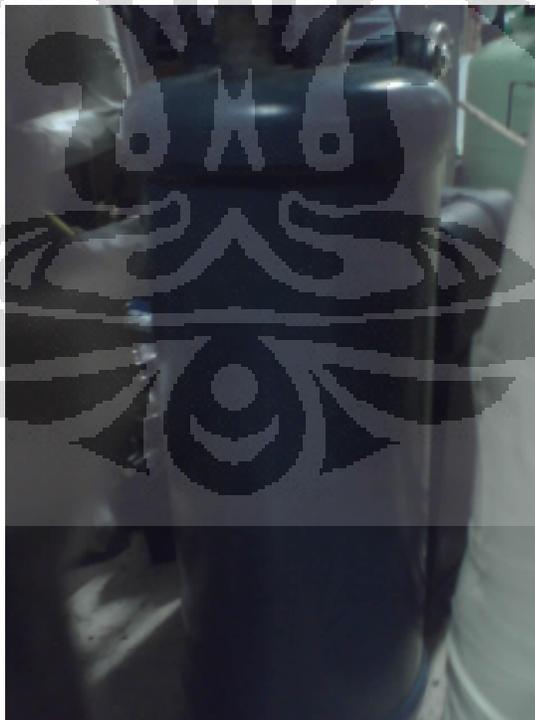
Komponen ini berfungsi untuk menyaring refrijeran yang masih berada dalam fase liquid sehingga refrijeran yang mengalir menuju needle valve berada dalam fase gas.



Gambar 3.13 Filter Dryer

### 3.2.12 Oil Separator

Komponen ini berfungsi untuk memisahkan refrigeran dengan oli yang berada di kompresor sehingga performa sistem refrigerasi menjadi lebih baik.



Gambar 3.14 Oil Separator

### 3.2.13 Air Flow Meter

Komponen ini berfungsi untuk mengatur massa udara yang mengalir menuju ruang pengering.



Gambar 3.15 Air flow meter

### 3.2.14 Ball Valve

Komponen ini berfungsi untuk mengatur aliran refrijeran yang masuk menuju reservoir.



Gambar 3.16 Ball Valve

### 3.2.15 Pipa Kapiler

Pipa ini berfungsi sebagai penghubung antar reservoir dengan ruang pengering. Selain itu, pipa ini berfungsi untuk mengekspansi tekanan sehingga dapat menurunkan tekanan yang masuk ke ruang pengering yang mendekati titik triple point.



Gambar 3.17 Pipa kapiler

## 3.3 Alat Ukur

Pada penelitian pengeringan beku vakum compact terdapat variabel – variabel yang perlu diukur. variabel tersebut adalah tekanan, temperature, dan massa refrijeran, massa spesimen, *mass flow* refrijeran. Untuk mengukur keempat hal tersebut, digunakan alat ukur antara lain:

### 3.3.1 *Thermocouple*

*Thermocouple* adalah alat yang digunakan untuk mengukur suhu pada beberapa titik dalam sistem refrijerasi dan sistem pengeringan. *Thermocouple* terdiri dari dua logam yang didekatkan yang apabila terpapar oleh kalor dengan suhu tertentu akan menghasilkan beda potensial yang sebanding adengan perubahan suhu (*Seedback Effect*).

Tipe : K

*Range kerja* : -200°C – 1350°C



Gambar 3.18 *Thermocouple* Tipe K

### 3.3.2 *Pressure Gauge*

*Pressure gauge* adalah alat untuk mengukur tekanan refrigeran dalam sistem refrigerasi. *Pressure gauge* bekerja secara analog dan hasil pembacaannya dapat langsung dilihat. *Pressure gauge* yang digunakan untuk mengukur tekanan refrigeran terdiri dari dua macam yaitu *pressure gauge* yang digunakan untuk mengukur low pressure berwarna biru dan yang digunakan untuk mengukur high pressure berwarna merah. Namun, pada alat ini hanya digunakan *pressure gauge* berwarna merah,

*Tipe* : *Freon pressure gauge*

*Range kerja* : Merah = hingga 300 psi



Gambar 3.19 *Pressure gauge*

### 3.3.3 Pressure Transmitter

*Pressure transmitter* adalah alat untuk mengukur tekanan pada sistem refrijerasi dan tabung vakum. *Pressure transmitter* mengkonversi masukan analog yang diterima menjadi digital sehingga dapat terbaca di computer melalui DAQ.

Merk/ Tipe : Druck PTX 1400  
Range kerja : hingga 40 bar



Gambar 3.20 Pressure Transmitter

### 3.3.4 Timbangan Digital

Timbangan digital yang digunakan ada dua macam, yaitu untuk mengukur massa refrijerant yang masuk kedalam sistem refrijerasi dan timbangan digital yang digunakan untuk mengukur massa spesimen sebelum dan sesudah pengeringan. Timbangan digital yang digunakan untuk mengukur massa refrijeran adalah timbangan digital merk quatro tipe Macs series.



Gambar 3.21 Timbangan digital

### 3.3.6 *National Instrument*

*National Instrument* adalah sebuah instrumentasi yang digunakan untuk membantu pengukuran yang berbasis data akuisisi (DAQ), instrumen ini berupa modul yang digunakan untuk membantu pembacaan hasil pengukuran yang berupa gelombang elektromagnetik kemudian diubah menjadi data pengukuran yang sebenarnya. Sebagai contohnya pada saat mengukur tekanan menggunakan *pressure transmitter* hasil pengukuran berupa arus tetapi setelah melewati modul *national instrument* akan diubah menjadi satuan tekanan (bar).

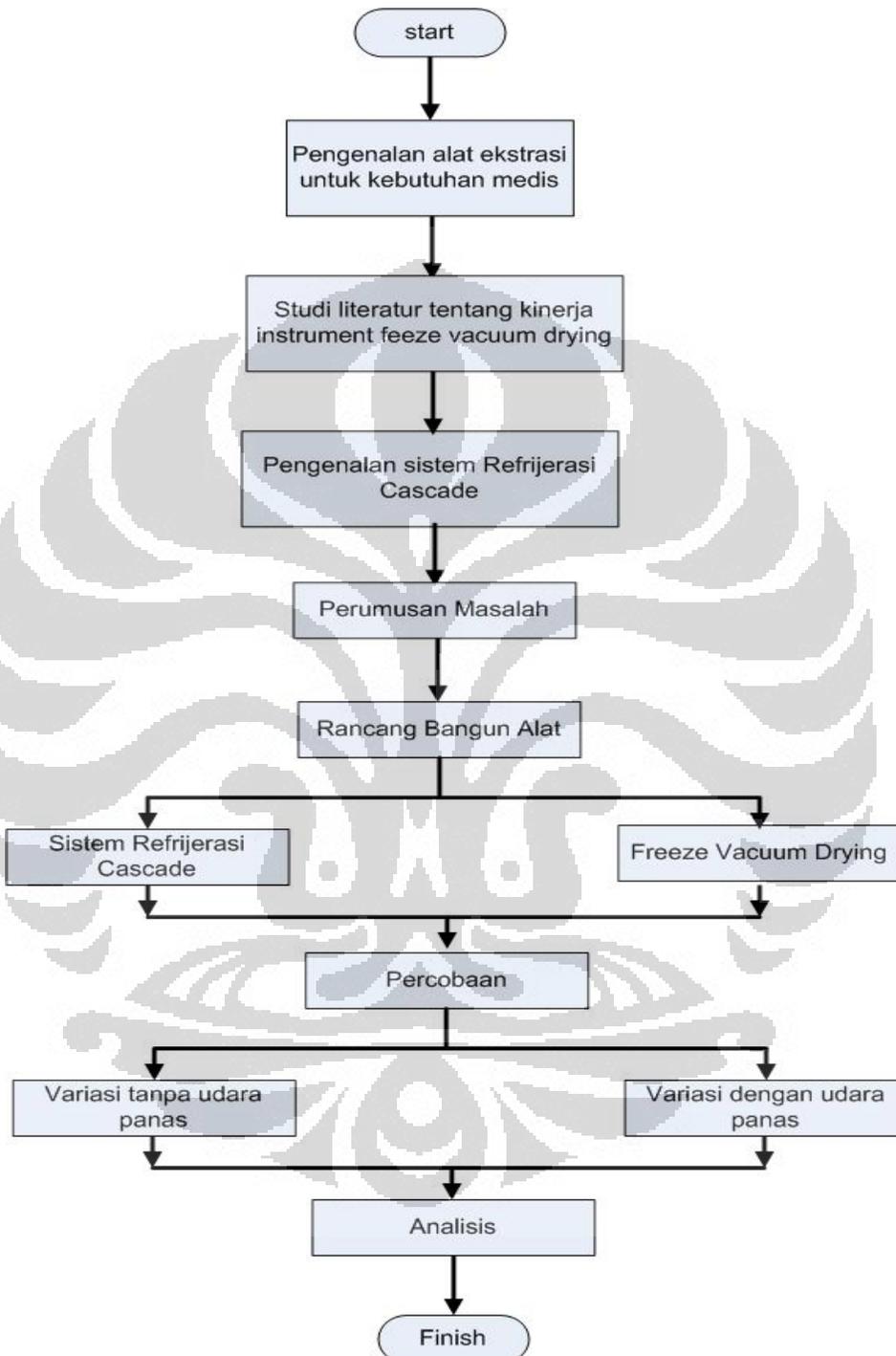
Adapun *national instrument* yang dipakai pada saat pengambilan data adalah tipe DAQ – 9174, tetapi aplikasi modul yang digunakan untuk pengukuran berbeda-beda sesuai dengan spesifikasinya sebagai berikut:

- *Thermocouple* → *National Instrument* (NI) 9211 TC  $\pm 0$  mV
- *Pressure Transmitter* → *National Instrument* (NI) 9203 AI  $\pm 20$  mA
- *Input* 9 – 30 V ; 15 W max.



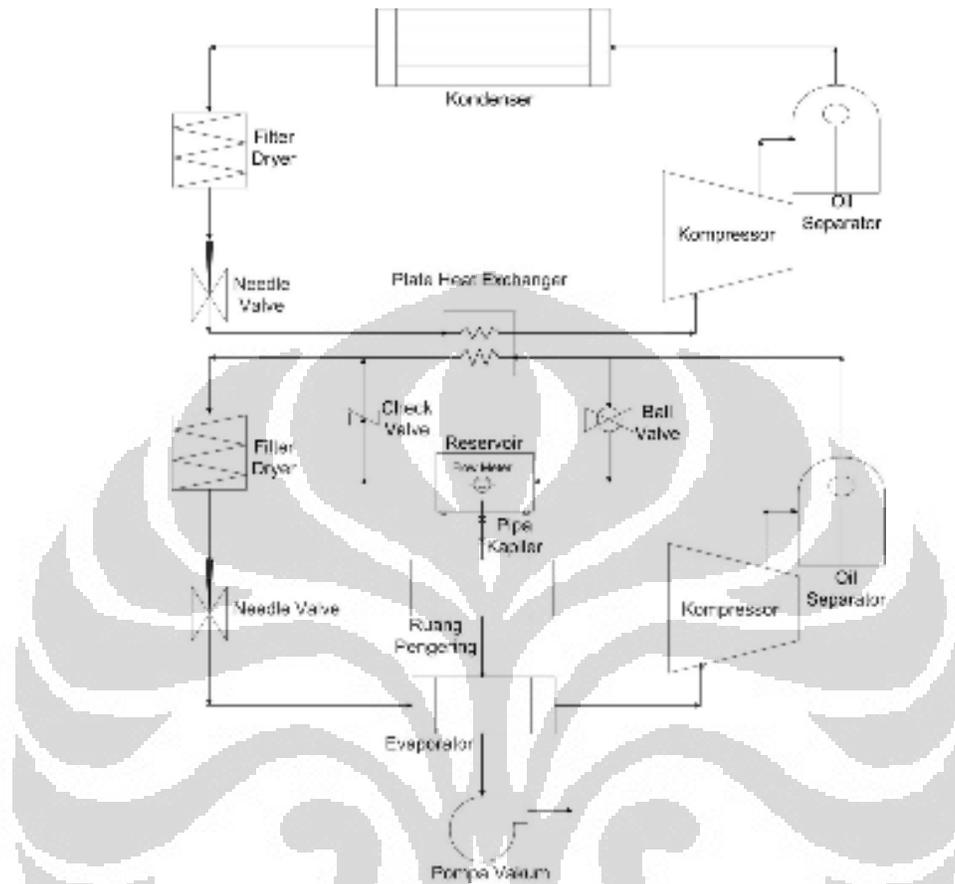
Gambar 3.22 National Instrument

### 3.4. Diagram Alir percobaan



Gambar2 .23 Diagram Alir Percobaan

### 3.5 Skema Alat



Gambar 3. 24 Skema Alat Freeze Vacuum Drying

Skema dari mesin pengering beku vakum yang digunakan pada percobaan ini. Seperti yang telah disebutkan, evaporator dari LS dimanfaatkan sebagai *cold trap* kemudian disambungkan dengan sebuah pompa vakum. Pada ruangan material dipasang satu *pressure transmitter* untuk mengetahui tekanan ruang material dan tiga *thermocouple* untuk mengetahui suhu ruang dan dua untuk mengetahui suhu material. Pada *coldtrap* dipasang satu *thermocouple* untuk mengetahui suhu *coldtrap*. Selain itu *thermocouple* dan *pressure gauge* juga di titik- titik tertentu pada sistem refrijerasi

Tabel 3. 1 Posisi *Thermocouple* dan *Pressure Gauge*

<i>Pressure gauge</i>	<i>Thermocouple</i>	<i>Sistem</i>	<i>Setelah</i>	<i>Sebelum</i>
1	1	<i>Low Stage</i>	<i>Evaporator</i>	<i>Compressor</i>
2	2		<i>Compressor</i>	<i>PHE</i>
3	3		<i>PHE</i>	<i>Needle valve</i>
4	4		<i>Needle valve</i>	<i>Evaporator</i>
5	5	<i>High Stage</i>	<i>PHE</i>	<i>Compressor</i>
6	6		<i>Compressor</i>	<i>Condenser</i>
7	7		<i>Condenser</i>	<i>Needle valve</i>
8	8		<i>Needle valve</i>	<i>PHE</i>

Pengambilan data terbagi menjadi dua variable, yaitu dengan menambahkan udara panas dan tanpa perlakuan udara panas. Untuk pengambilan data dengan memberikan udara panas, air flow meter di buka sehingga udara yang berada di lingkungan masuk ke dalam reservoir yang telah dihubungkan dengan pipa kapiler, kemudian udara tersebut masuk ke dalam ruang pengering hingga pada akhirnya menuju coldtrap dan pompa vakum. Selain itu, untuk memanaskan temperatur reservoir, katup ball valve di buka penuh untuk mengalirkan refrijeran panas yang berada pada discharge kompressor Low Stage.

Untuk pengambilan data tanpa menggunakan udara panas, Air flow meter ditutup sehingga tidak ada udara yang mengalir ke ruang pengering. Begitu juga katup ball valve di tutup untuk menutup laju refrijeran yang menuju reservoir.

### 3.6 Persiapan Pengujian

#### 3.6.1 Pengisian Refrijeran

Refrijeran yang digunakan pada alat ini adalah R22 untuk HS dan HCR22 (propan) dicampur dengan CO<sub>2</sub> (Karbon dioksida) untuk LS dengan perbandingan 80%-20%. Sistem HS diisi refrijeran R22 sebanyak 400 g, sementara sistem LS diisi refrijeran HCR22 sebanyak 160 g dan CO<sub>2</sub> sebanyak 40 g.

Untuk pengisian refrijeran dibutuhkan *testing manifold*, pompa vakum, tabung refrijeran, dan timbangan digital. Langkah- langkah pengisian refrijeran ke dalam sistem refrijerasi adalah sebagai berikut :

1. Menyambungkan system, pompa vakum, dan tabung refrijeran menggunakan *testing manifold*. Kemudian meletakkan tabung refrijeran diletakkan di atas timbangan digital.
2. Menyalakan pompa vakum hingga sistem dan selang *testing manifold* menjadi vakum
3. Menutup kedua katup yang terdapat *testing manifold* dan kemudian mematikan pompa
4. Membuka katup pada yang mengarah pada sistem refrijerasi, refrijeran akan mengalir menuju sistem karena adanya perbedaan tekanan
5. Menggunakan katup yang menghubungkan *testing manifold* dengan sistem refrijerasi untuk mengatur jumlah refrijeran yang masuk ke sistem refrijerasi

### 3.6.2 Persiapan Benda Uji

Benda uji yang akan digunakan dalam pengujian ini adalah ubur- ubur (*Aurella Sp.*). Ubur- ubur memiliki kandungan *moisture* sebesar 95,6 % dalam 50 g massa spesimen. Namun tidak semua bagian dari ubur- ubur dapat dimanfaatkan. Bagian yang dimanfaatkan dari ubur- ubur adalah tentakelnya. Tentakel tersebut dipotong kemudian dipisahkan ke dalam beberapa toples plastik kecil sebanyak 50 g untuk kemudian diblender. Maksud pemisahan tersebut adalah untuk memastikan jumlah kandungan air yang terkandung dalam tiap material yang digunakan untuk pengujian sama banyaknya. Agar tahan lama, toples berisi ubur- ubur tersebut disimpan di dalam *freezer*.

## 3.7 Pengujian

### 3.7.1 Lokasi Pengujian

Pengujian mengambil tempat di Laboratorium Perpindahan Kalor (*Heat Transfer Laboratory*) lantai 3 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.

### 3.7.2 Variasi Pengujian

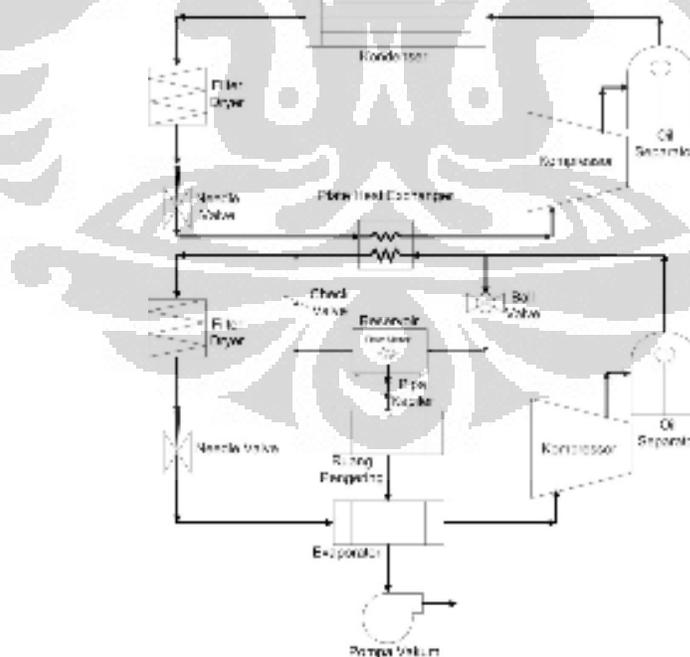
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, variasi diambil menjadi dua variable, berikut adalah tabel variasi percobaan :

Tabel 3.2 Variasi Pengujian Data

No	Variasi	Keterangan
1.	Air flow meter	Tutup
2.	Air flow meter	buka

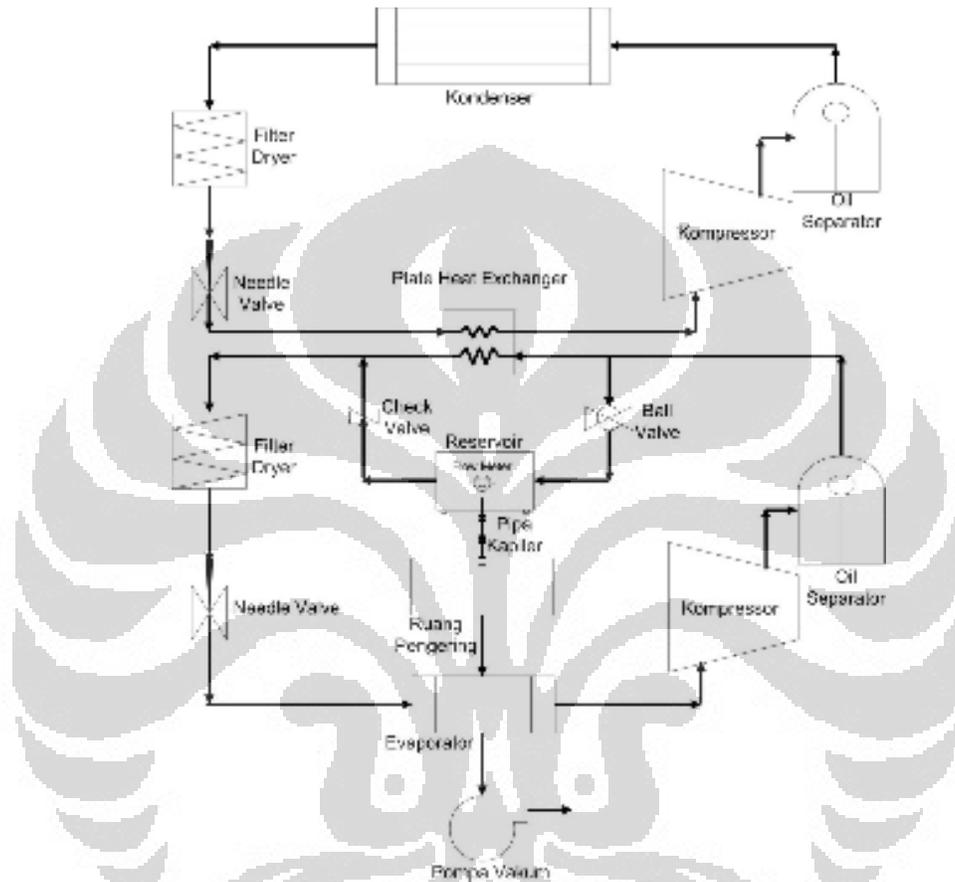
Pengambilan data terbagi menjadi dua variable, yaitu dengan menambahkan udara panas dan tanpa perlakuan udara panas. Untuk pengambilan data dengan memberikan udara panas, air flow meter di buka sehingga udara yang berada di lingkungan masuk ke dalam reservoir yang telah dihubungkan dengan pipa kapiler, kemudian udara tersebut masuk ke dalam ruang pengering hingga pada akhirnya menuju coldtrap dan pompa vakum. Selain itu, untuk memanaskan temperatur reservoir, katup ball valve di buka penuh untuk mengalirkan refrijeran panas yang berada pada discharge kompresor Low Stage.

Berikut ini adalah skema alat tanpa penambahan udara panas :



Gambar 3.25 Skema alat tanpa penambahan udara panas

Untuk pengambilan data tanpa menggunakan udara panas, Air flow meter ditutup sehingga tidak ada udara yang mengalir ke ruang pengering. Begitu juga katup ball valve di tutup untuk menutup laju refrijeran yang menuju reservoir. Berikut ini adalah skema alat dengan penambahan udara panas :



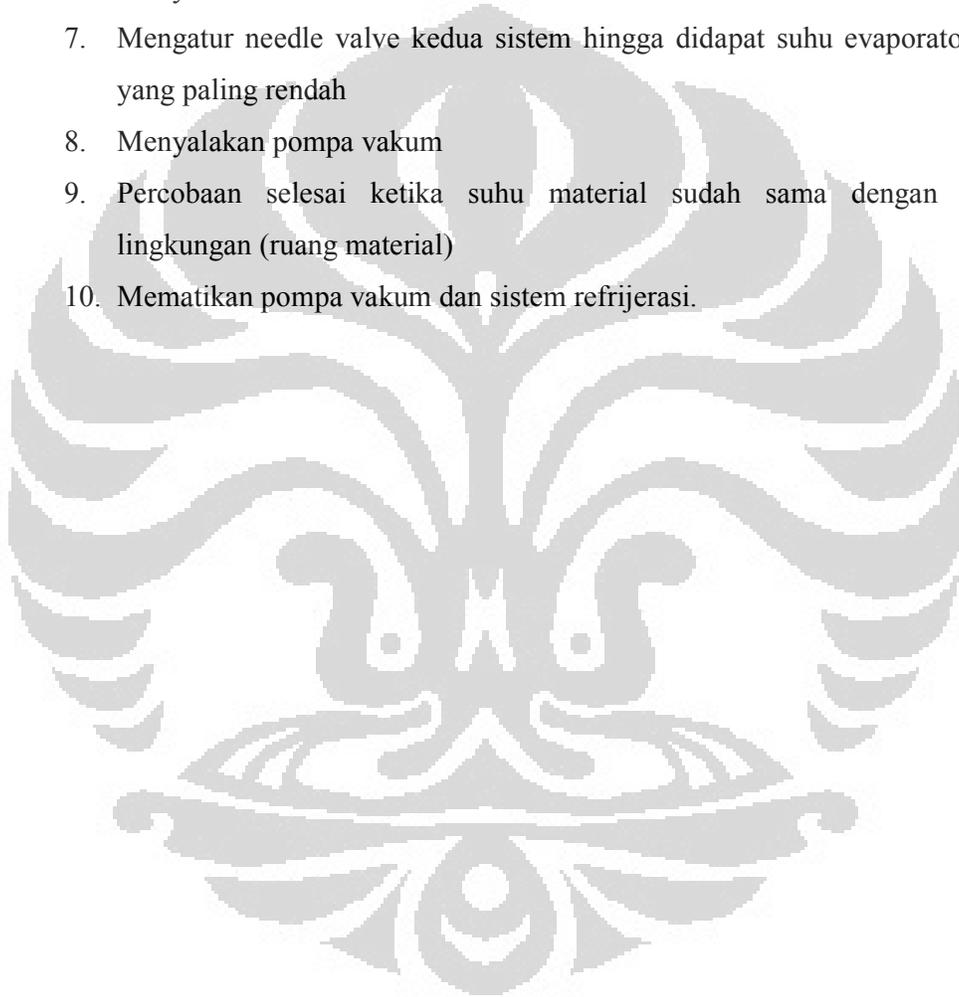
Gambar 3.27 Skema alat dengan penambahan udara panas

Untuk pengambilan data dengan penambahan udara panas, Air flow meter dibuka sehingga aliran udara yang berada di lingkungan masuk ke dalam reservoir kemudian mengalir ke ruang pengering. Begitu juga katup ball valve di tutup untuk menutup laju refrijeran yang menuju reservoir. Temperatur pada reservoir dijaga konstan pada range 33°C-35°C

### 3.7.3 Prosedur Pengambilan Data

Langkah- langkah pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan benda uji
2. Menyalakan software LabView
3. Menghubungkan alat- alat ukur digital seperti *thermocouple* dan *pressure transmitter* ke DAQ National Instrument
4. Meletakkan benda uji ke dalam ruang material dan kemudian ditutup
5. Menyalakan sistem HS hingga evaporatornya mencapai suhu minimum
6. Menyalakan sistem LS
7. Mengatur needle valve kedua sistem hingga didapat suhu evaporator LS yang paling rendah
8. Menyalakan pompa vakum
9. Percobaan selesai ketika suhu material sudah sama dengan suhu lingkungan (ruang material)
10. Mematikan pompa vakum dan sistem refrijerasi.



## BAB 4

### PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

Semua variasi data yang telah terkumpul diolah dan ditampilkan dalam grafik *Pressure vs Temperature* agar dapat dilihat gambaran secara umum proses perubahan fase tiap variasi, mulai dari proses kombinasi pendinginan internal dan vakum, proses pengeringan awal, dan proses pengeringan lanjut. Analisis yang akan dilakukan pada tiap variasi dilakukan dengan didasarkan pada asumsi-asumsi dan penyederhanaan berikut:

1. perpindahan panas dan massa terjadi satu dimensi, normal terhadap batas sublimasi dan permukaan;
2. sublimasi terjadi pada batas yang sejajar dan pada jarak  $X$  dari permukaan sampel;
3. ketebalan batas sublimasi dapat diabaikan;
4. daerah beku dianggap mempunyai temperatur yang sama dengan temperatur batas sublimasi;
5. hanya uap air yang mengalir melalui daerah kering;
6. di daerah yang berpori, matriks padat dan air yang tidak tersublimasi mempunyai temperatur yang sama; serta
7. bagian sisi dan bawah material terisolasi sempurna.

Analisis pada proses pengeringan beku vakum ini mencakup analisis laju pengeringan pada material uji pada dua kondisi batas, yaitu:

1. kondisi batas konduksi, yaitu hanya mencakup daerah beku, batas sublimasi, dan daerah kering; serta
2. kondisi batas radiasi, yaitu mencakup daerah beku, batas sublimasi, daerah kering, dan lingkungan.

## 4.1 Pengolahan Data

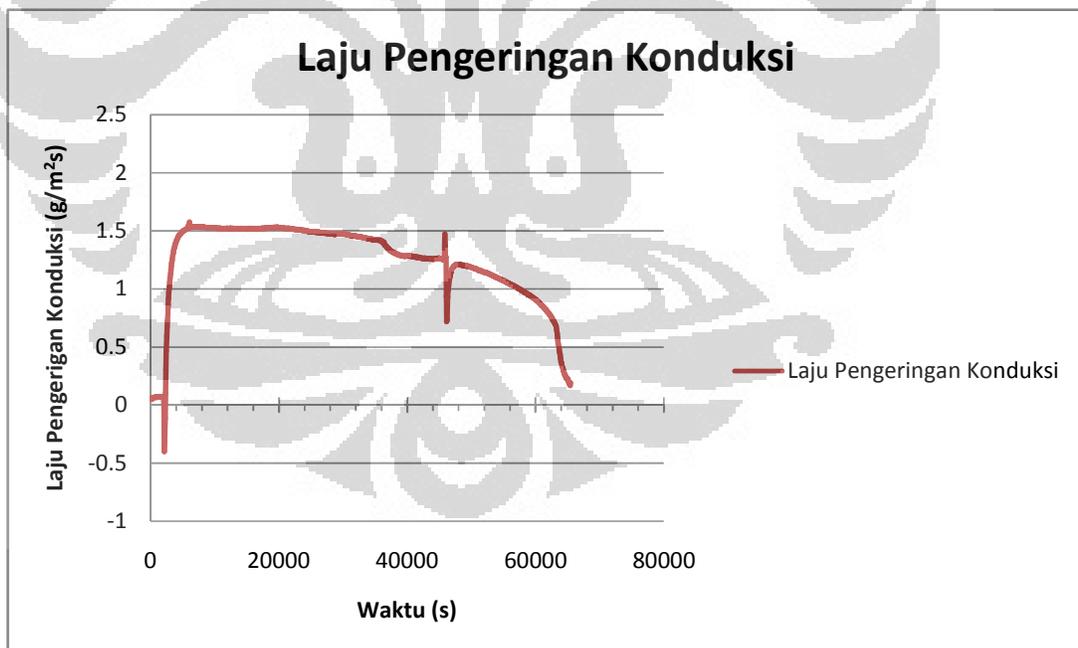
Pada awal proses pengeringan, material uji masih berupa cairan. Saat memasuki proses pembekuan vakum, maka material akan berubah fase menjadi padatan (es). Kemudian dengan adanya penambahan panas, maka material akan berubah fase menjadi gas pada tekanan rendah. Sisa dari material uji adalah padatan yang memiliki sifat- sifat yang berbeda dari air sehingga pada tekanan vakum tidak berubah *properties*-nya seperti air.

### 4.1.1 Laju Pengeringan Material

#### 4.1.1.1 Laju Pengeringan Secara Konduksi

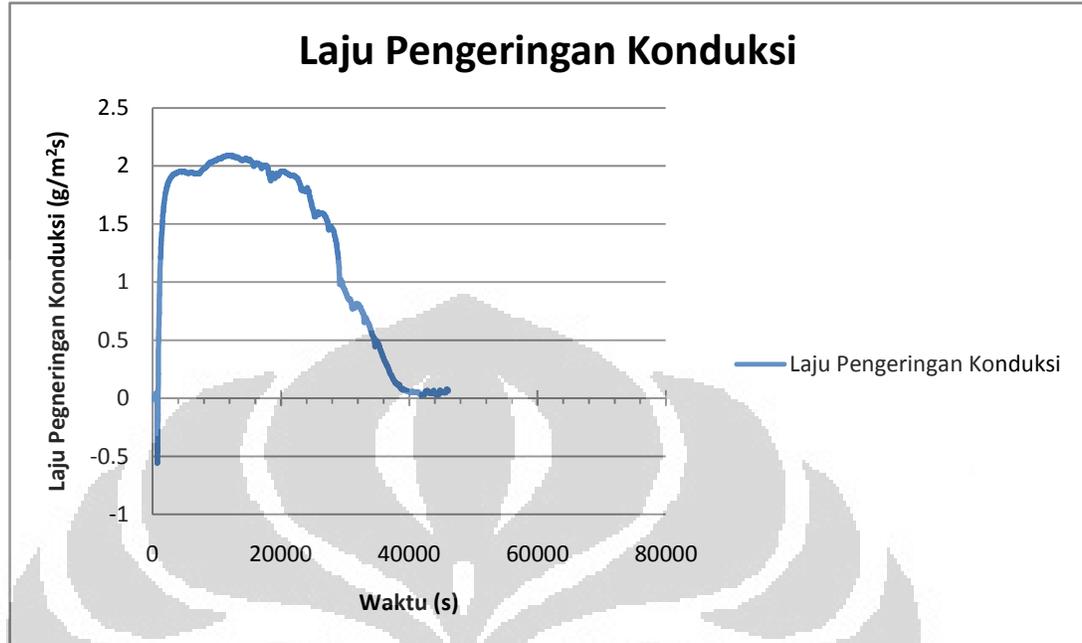
Laju pengeringan karena konduksi dihitung menggunakan rumus persamaan konduksi yang ada di bab 2 dengan mencari  $q$ . Ketebalan material ( $L$ ), konduktivitas thermal ( $\lambda$ ), dan kalor laten sublimasi es ( $\Delta h$ ) adalah 0,008 m, 2,24 W/m.K, dan 2,83 J/Kg.K. Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3 memperlihatkan laju pengeringan konduksi variasi 1, 2, dan perbandingannya.

*Variasi 1*

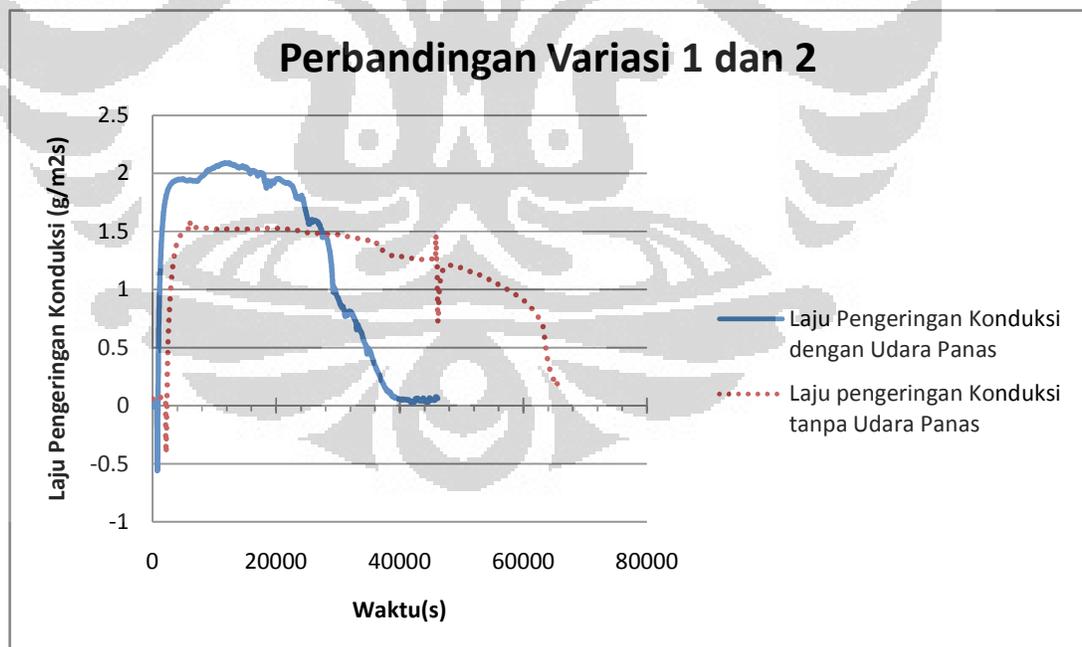


4.1 Laju Pengeringan Secara konduksi variasi 1

## Variasi 2



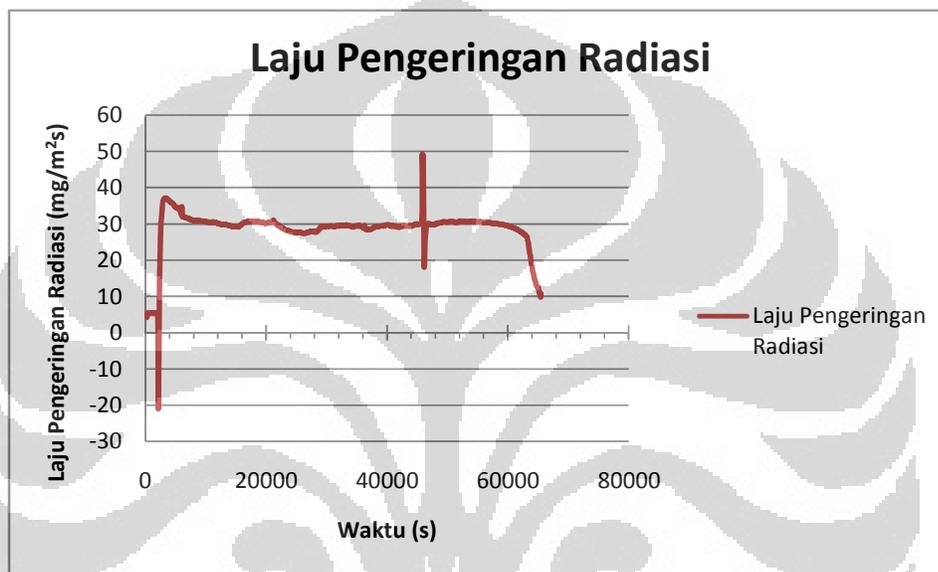
## Perbandingan Variasi 1 dan 2



#### 4.1.1.2 Laju Pengeringan Secara Radiasi

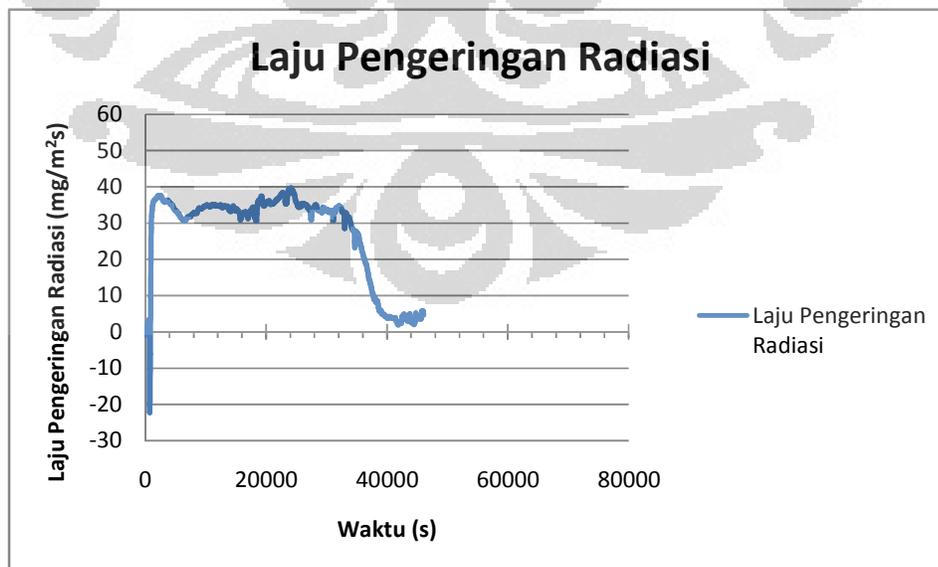
Laju pengeringan karena radiasi dihitung menggunakan rumus dengan mencari  $q$  untuk mengetahui heat loss. Ketebalan material ( $L$ ), konstanta Boltzman ( $\sigma$ ), dan emisivitas air ( $F$ ) adalah 0,008 m,  $5,6484 \times 10^8 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$ , dan 0,95. Gambar 4.4, 4.5, dan 4.6 memperlihatkan laju pengeringan variasi 1, 2, dan perbandingannya.

##### Variasi 1



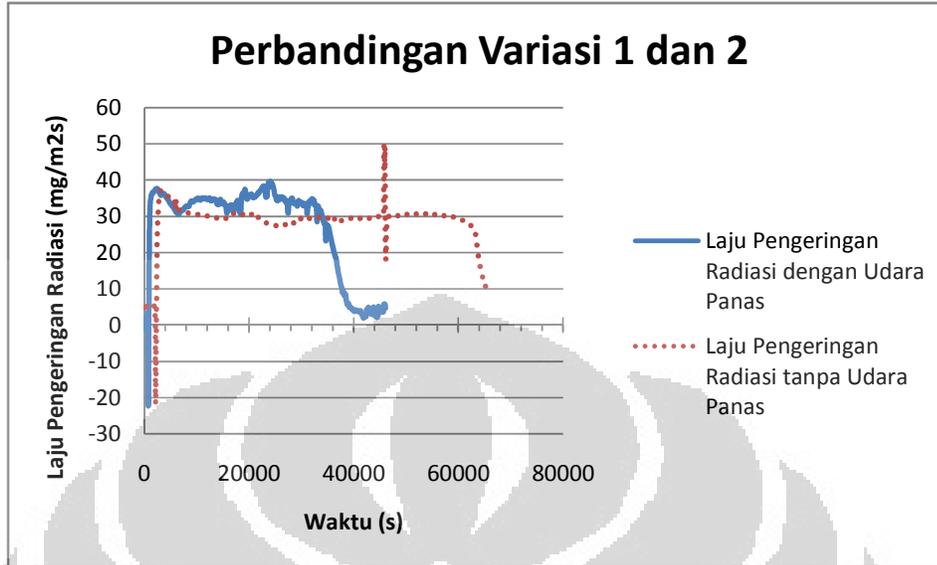
Gambar 4.4. Laju pengeringan Secara Radiasi Variasi 1

##### Variasi 2



Gambar 4.5. Laju pengeringan Secara Radiasi Variasi 2

### Perbandingan Variasi 1 dan 2

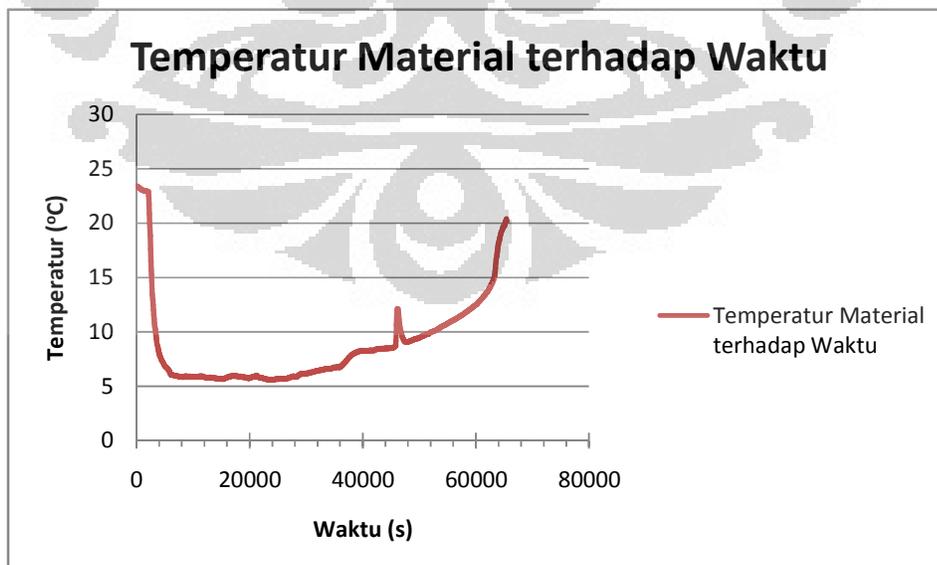


Gambar 4.6 Perbandingan Variasi 1 dan 2

#### 4.1.2. Temperatur Material terhadap Waktu

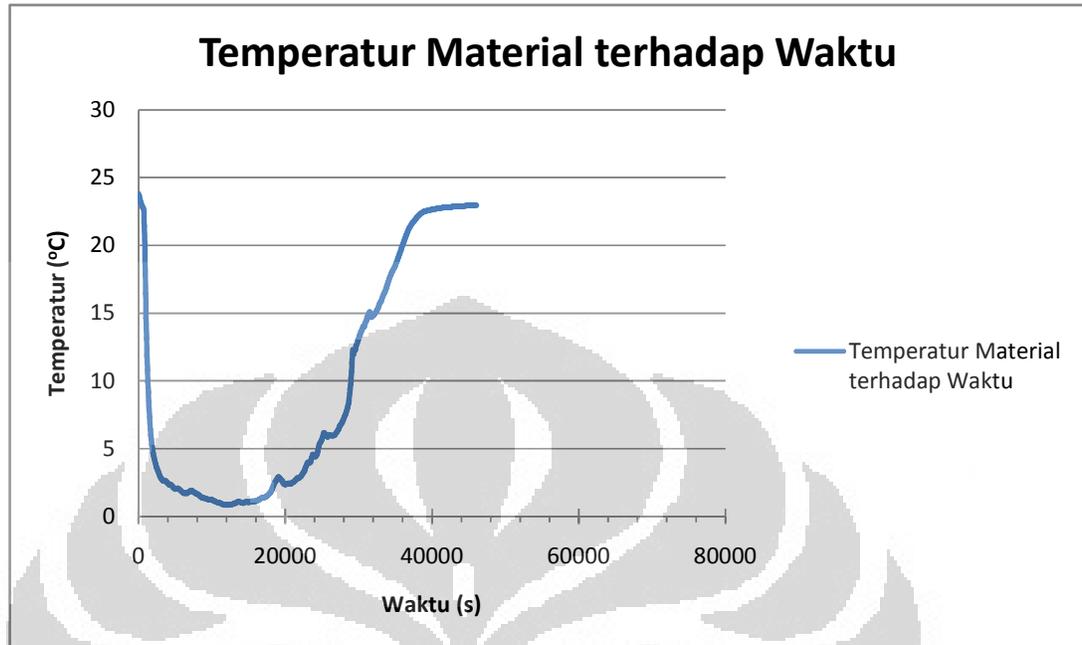
Pada alat Freeze Vacuum Dying mempunyai 3 tahap yaitu tahap pembekuan, tahap pengeringan primer, dan tahap pengeringan sekunder. Berikut gambar 4.7, 4.8 dan 4.9 menunjukkan perubahan temperatur ketika proses berlangsung pada variasi 1, 2, dan perbandingannya.

##### Variasi 1



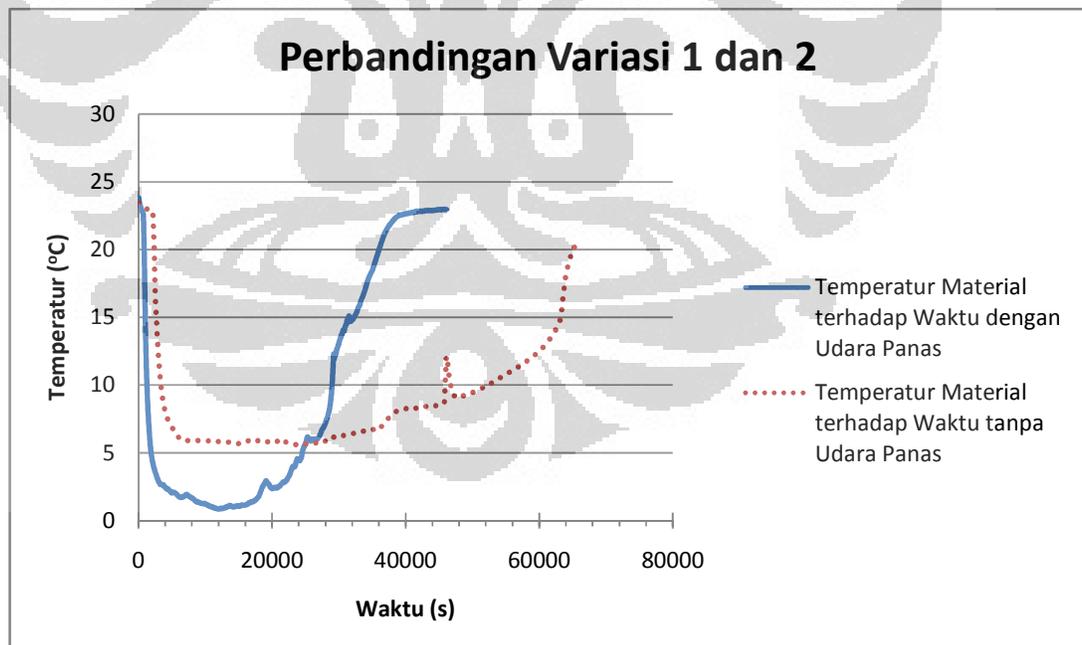
Gambar 4.7 Temperatur vs Waktu variasi 1

Variasi 2



Gambar 4.8 Temperatur vs Waktu variasi 2

Perbandingan Variasi 1 dan 2



Gambar 4.9 Perbandingan Variasi 1 dan 2

#### 4.1.3 *Moisture Content* Akhir Material

Kandungan air pada ubur- ubur adalah 95,6 % dalam 50 g massa ubur-ubur (Uji kandungan air Pusat Penelitian Sumberdaya Hayati dan Bioteknologi IPB, Juni 2011 ), artinya material kering atau produk yang dihasilkan seharusnya mempunyai massa sebesar 2,2 g.

Pada percobaan tanpa pemberian udara panas, massa ubur-ubur adalah sebagai berikut :

##### *Variasi 1*

Massa Awal : 50 g

Massa Akhir : 2,125 g

Artinya masa yang hilang dari percobaan ini sebesar 0,075 g.

##### *Variasi 2*

Massa Awal : 50 g

Massa Akhir : 1,5 g

Artinya masa yang hilang dari percobaan ini sebesar 0,7 g.

## **4.2 Analisis**

### 4.2.1 Analisis Laju pengeringan Material

Proses pengeringan mengalami pengeringan secara konduksi dan radiasi. Jika dilihat dari pengeringan secara konduksi, laju pengeringan mengalami penurunan pada detik awal kemudian meningkat secara drastis beberapa selang menit berikutnya. Hal ini dapat terjadi karena material berada dalam proses pembekuan sehingga tidak terjadi pengeringan dan mulai terjadi pengeringan ketika laju pengeringan meningkat. Selang beberapa waktu kemudian laju pengeringan mulai menurun secara perlahan hingga pada proses pengeringan berakhir. Kemungkinan yang terjadi adalah bahwa ini merupakan proses pengeringan sekunder dan pengeringan primer.

Jika dilihat pada perbandingan antara variasi 1 dan variasi 2, terdapat perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan variasi 2 diberi penambahan udara panas sehingga laju pengeringan konduksi semakin meningkat.

Untuk laju pengeringan secara radiasi tidak memiliki perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan laju pengeringan konduksi, hanya saja

terdapat sedikit perbedaan yaitu ketika proses pengeringan mulai berlangsung laju pengeringan secara radiasi mempunyai laju yang konstan hingga pada akhir pengeringan mulai mengalami penurunan karena moisture pada material mulai menipis.

Perbandingan laju pengeringan secara radiasi antara variasi 1 dan 2 memiliki perbedaan yang tipis, tetapi variasi 2 tetap memiliki laju pengeringan radiasi yang lebih tinggi karena diberi penambahan udara panas.

#### 4.2.2. Analisis Temperatur Material Terhadap Waktu

Jika dibandingkan dengan literature Temperatur Material Terhadap Waktu, hasil yang didapat kurang memiliki batas yang jelas untuk menentukan tahapan tiap proses. Kemungkinan ini terjadi dikarenakan tidak ada perlakuan pendinginan atau pemanasan di ruang pengering sehingga temperatur menurun dan meningkat secara perlahan hingga proses pengeringan berakhir. Namun, walaupun laju temperatur kurang mendekati literatur yang ada, proses pengeringan sekunder dan primer masih dapat terlihat.

#### 4.2.3. Analisis *Moisture Content* Akhir Material

Dapat terlihat bahwa massa akhir pada material relatif lebih sedikit dibandingkan daripada yang seharusnya. Kemungkinan penyebabnya adalah timbangan yang digunakan kurang akurat sehingga terjadi kesalahan penimbangan pada massa akhir material. Kemungkinan berikutnya adalah material masih menempel pada wadah sehingga mengurangi massa pada material. Selain itu, ada kemungkinan kesalahan prosedur penimbangan sehingga hasil kurang akurat.

Massa material tidak berkurang dari awal proses. Namun, material mulai mengalami penyusutan ketika proses pengeringan berlangsung. Hal ini disebabkan pada awal merupakan proses terjadi pembekuan terlebih dahulu setelah itu proses pengeringan primer dan sekunder.

*Variasi 1*

Gambar 4.11 material yang telah kering variasi 1

*Variasi 2*

Gambar 4.12 material yang telah kering variasi 2

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis dari data yang diperoleh, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

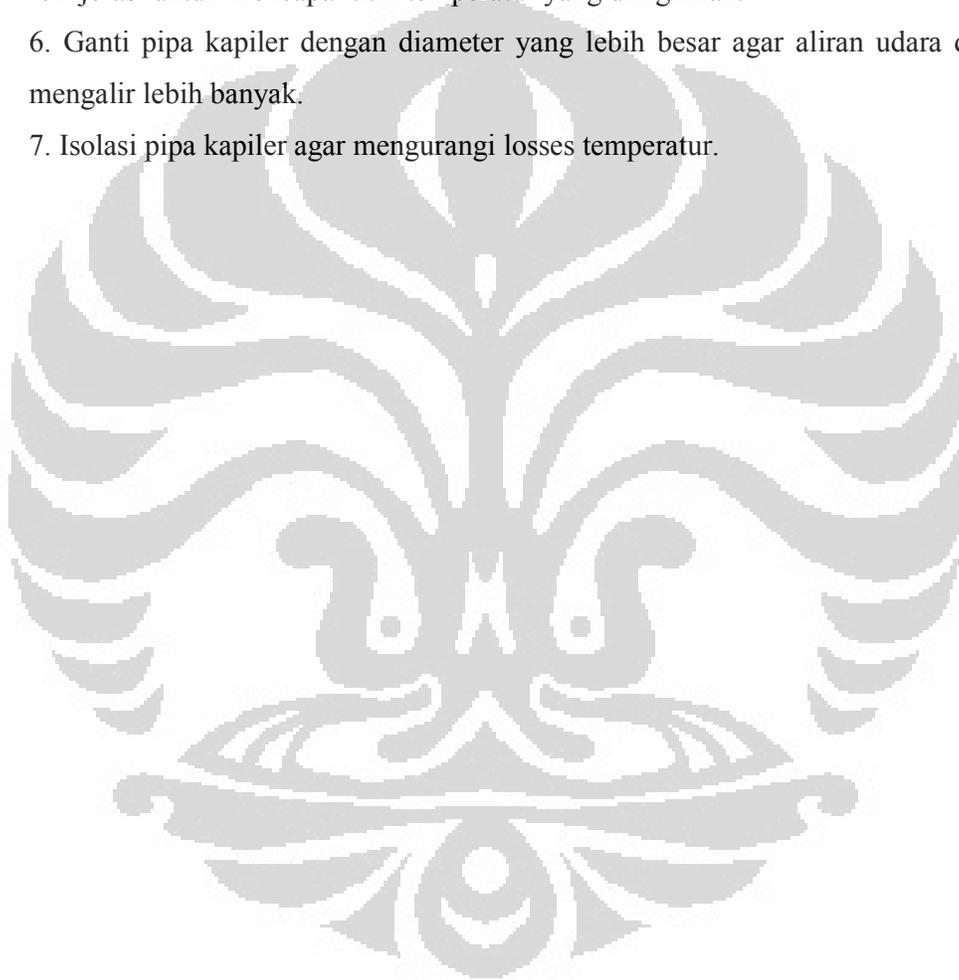
1. Proses pengeringan beku vakum dapat dimodelkan dalam batas kondisi konduksi dan batas kondisi radiasi.
2. Temperatur material turun ketika proses pembekuan dan temperatur naik hingga sama dengan temperatur ruang pengering ketika proses pengeringan primer dan sekunder.
3. Laju pengeringan akibat perpindahan panas konduksi lebih berpengaruh dalam proses pengeringan beku vakum daripada laju pengeringan akibat perpindahan kalor radiasi.
4. Kurva temperatur material mempunyai tiga daerah, yaitu daerah *freezing*, daerah *primary drying*, dan daerah *secondary drying*;
5. Banyak material kering yang hilang pada saat proses pengeringan karena kurangnya metode pewadahan material, adanya material yang berevaporasi pada awal proses, dan adanya material yang melekat di wadah.
6. Penurunan tekanan ruang dapat menurunkan temperatur material.
7. Penambahan udara panas dapat meningkatkan laju pengeringan sehingga mempersingkat lama pengeringan.

#### 5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan penulis untuk kemajuan dan perbaikan ke depannya adalah sebagai berikut:

1. Perlunya perbaikan tabung pada coldtrap, ruang pengering, dan reservoir agar meminimalisir kebocoran ketika proses pemvakuman.
2. Perlu adanya mekanisme pengeringan coldtrap dari air sisa yang lebih baik.

3. Perlunya penggantian wadah uji agar material mendapatkan distribusi perpindahan kalor dan massa dengan baik.
4. Perlu adanya prosedur yang baik dalam pengambilan material yang telah kering karena kesalahan sedikit ketika mengambil material dapat menyebabkan hasil yang jauh berbeda
5. Gunakan software REFPROP untuk memudahkan proses optimasi sistem refrijerasi untuk mencapai titik temperatur yang diinginkan.
6. Ganti pipa kapiler dengan diameter yang lebih besar agar aliran udara dapat mengalir lebih banyak.
7. Isolasi pipa kapiler agar mengurangi losses temperatur.



## DAFTAR REFERENSI

1. Mujumdar, Arun S. (2006). Principles, classification, and selection of driers. In Arun S. Mujumdar (Ed.). *Handbook of Industrial Drying* (p. 4-5). London: Taylor & Francis Group.
2. BBC (2010, November 2). *Jellyfish cells 'diagnose' cancer*. 12 Mei 2011. <http://www.bbc.co.uk/news/uk-england-york-north-yorkshire-11667447>
- Chakraborty, R., Saha, A.K., & Bhattacharya, P. (2006). Modeling and simulation of parametric sensitivity in primary freeze-drying of foodstuffs. *Separation and Purification Technology* 49, 259-261.
3. Cooling Device. (n.d.). *Other refrigeration cycles*. 11 Juni 2011. <http://coolingdevice.net/4.html>
4. Elshinta (2007, September 2). *Penderita kanker di Indonesia diperkirakan naik 7 kali lipat*. 12 Mei 2011. <http://www.elshinta.com/v2003a/readnews.htm?id=42655>
5. Fernando L., Victorio. (2009). *Analisis laju pengeringan pada freeze vacuum drying*. Undergraduate thesis. Mechanical engineering, Universitas Indonesia: Depok.
6. George, James P. & Datta, A.K. (2002). Development and validation of heat and mass transfer models for freeze-drying of vegetable slices. *Journal of Food Engineering* 52, p. 90.
7. Greenstar Artek Indonesia. (n.d.). *Hydrocarbon refrigerant*. 18 Mei 2011. <http://www.greenstar-artek.com/what-we-offer/hydrocarbon-refrigerant/>
- Hidayah, Rohman. (2009). *Perancangan mesin pengering beku vakum untuk pengering aloe vera dengan pemanasan kondenser*. Undergraduate thesis. Mechanical engineering, Universitas Indonesia: Depok.
8. International Rice Research Institute. (2009). *The drying process*. 18 Juni 2011. <http://www.knowledgebank.irri.org/rkb/index.php/drying-basics/the-drying-process>
9. Liapis, Athanasios I. & Bruttini, Roberto. (2006). Freeze drying. In Arun S. Mujumdar (Ed.). *Handbook of Industrial Drying* (p. 257-281). London: Taylor & Francis Group.

10. Yulianto, M., M.Idrus Alhamid., Nasruddin., Engkos A. Kosasih. 2011. Proses Perubahan Fase Material yang Melibatkan Evaporasi dan Sublimasi pada Pengerian Beku Vakum. SNTTM X. Paper ID ke 037
11. Nasruddin., M. Idrus Alhamid., Engkos A. Kosasih, M. Yulianto. 2011. Effect of Freeze Vacuum Drying and Heating from Condenser's Loss on Drying Rate and Microstructure of Aloe Vera. Research Journal of Applied Sciences 6(5) : 335-343
12. George, James P. and Datta, A.K. (2001). *Development And Validation of Heat and Mass Transfer Models for Freeze-Drying of Vegetable Slices.*
13. M. Idrus Alhamid, Darwin R. B. Syaka, and Nasruddin. (2010). *Exergy and Energy Analysis of a Cascade System Using R744+R170 for Low Temperature Applications*, International Journal of Mechanical & Mechatronic Engineering IJMME – IJENS Vol: 10 No: 06
14. <http://blog.ub.ac.id/muhammadkhairul/2012/02/26/perlakuan-panas-permukaan-diagram-fasa/>
15. Sumber : <http://teachintegration.wordpress.com>