



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK PENGERINGAN BEKU VAKUM DENGAN
PEMANFAATAN PENDINGINAN INTERNAL DAN PANAS
BUANG KONDENSER UNTUK PROSES SUBLIMASI**

SKRIPSI

**RIO RICARDI
0706267313**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK PENGERINGAN BEKU VAKUM DENGAN
PEMANFAATAN PENDINGINAN INTERNAL DAN PANAS
BUANG KONDENSER UNTUK PROSES SUBLIMASI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RIO RICARDI
0706267313**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul :

**KARAKTERISTIK PENDINGINAN BEKU VAKUM DENGAN
PEMANFAATAN PENDINGINAN INTERNAL DAN PANAS BUANG
KONDENSER UNTUK PROSES SUBLIMASI**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian 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 : Rio Ricardi

NPM : 0706267313

Tanda Tangan : 

Tanggal : 27 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rio Ricardi
NPM : 0706267313
Program studi : Teknik Mesin
Judul skripsi : Karakteristik Pengeringan Beku Vakum dengan Pemanfaatan Pendinginan Internal dan Panas Buang Kondenser untuk Proses Sublimasi

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.Ir. M.Idrus Alhamid



Pembimbing : Dr.-Ing.Ir. Nasruddin, M.Eng.



Penguji : Dr. Ir. Budihardjo Dipl.Ing.



Penguji : Ir. Rusdy Malin, M.Sc.



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena hanya dengan kasih karunia-Nya yang berlimpah, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memnuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin di Fakultas Teknik Universitas Indonesia (FTUI).

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama proses pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi ini, terutama kepada:

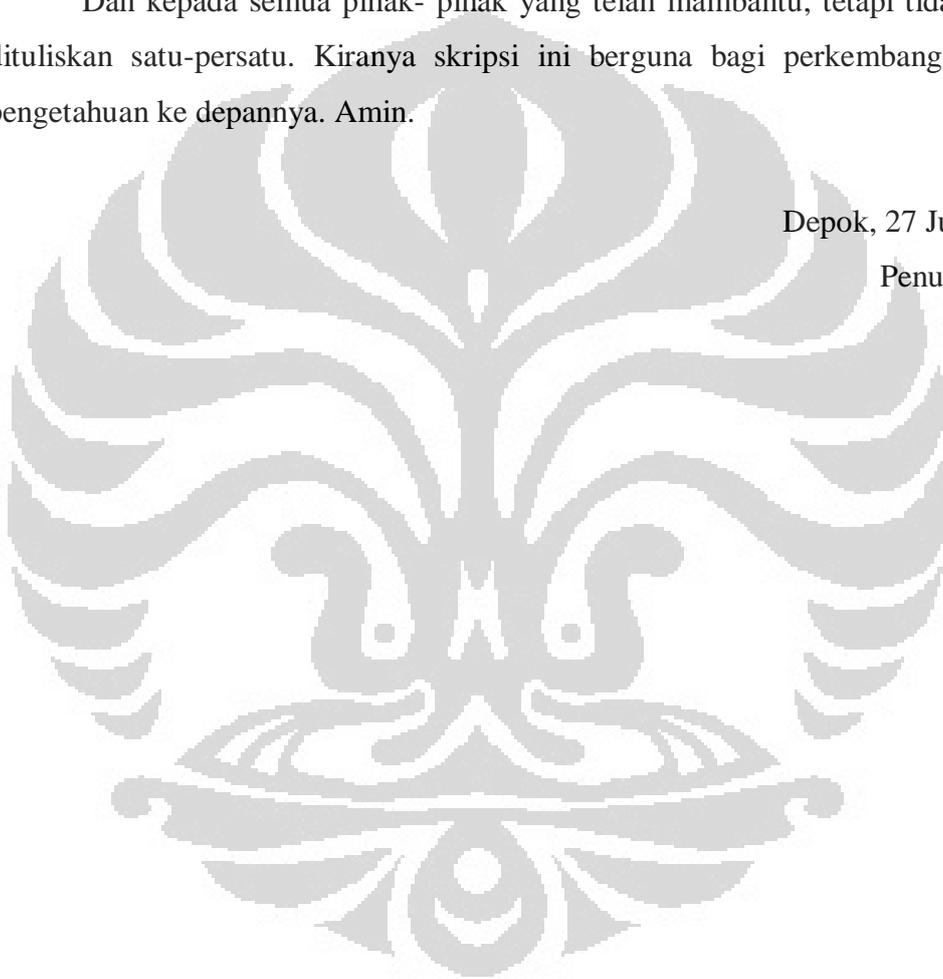
- (1) Dr. –Ing, Ir. Nasruddin, M.Eng, atas segala waktu, ilmu, nasehat, dan perhatian yang telah dicurahkan;
- (2) Dr.Ir. M.Idrus Alhamid selaku dosen pembimbing atas segala nasehat, ilmu, dan perhatian yang telah dicurahkan;
- (3) Pak Yulianto, atas segala bimbingannya yang luar biasa dari awal hingga akhir proses pengerjaan skripsi ini;
- (4) Pak Darwin, Pak Seno, Pak Supri, dan Pak Rully, atas nasihat-nasihat berharganya dalam pengerjaan skripsi ini;
- (5) Mas Udiyono, Mas Syarif, dan seluruh karyawan Departemen Teknik Mesin yang telah banyak membantu;
- (6) Pak Tabat, atas bantuannya dalam proses pengerjaan alat;
- (7) orang tua dan keluarga penulis, yang selalu setia memberikan dukungan dan doa;
- (8) M. Novel Hidayat sebagai teman satu tim yang selalu ada di saat suka maupun duka;
- (9) Ase, Ridwan, Bayu, Rizky Arif, Zico, Farid, Taufik, Ical, Firman, Dedy, Miko, Irawan, Ricky, Eka, Lucky, dan Julian Mo, selaku rekan-rekan Laboratorium Pendingin dan Tata Udara, yang telah bersama- sama menghadapi masa-masa sulit pengerjaan alat maupun pengambilan data;
- (10) Freddy Lay, Kenfery, Andre, Edward, Rikko, dan Bob, selaku rekan-rekan laboratorium Mekanika Fluida atas segala bantuan dan kehadiran yang sangat berarti bagi penulis;

- (11) Teguh, Jediel, Vincent, dan Gani, selaku rekan-rekan laboratorium Manufaktur atas segala kebaikan dan bantuannya selama proses pengerjaan skripsi;
- (12) Yunita sebagai sahabat penulis yang turut membantu dalam poses pengeditan skripsi ini; serta
- (13) rekan-rekan dan sahabat penulis pada Departemen Teknik Mesin FTUI angkatan 2007 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. Amin.

Depok, 27 Juni 2011

Penulis



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

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

Nama : Rio Ricardi
NPM : 0706267313
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:

**KARAKTERISTIK PENDINGINAN BEKU VAKUM DENGAN
PEMANFAATAN PENDINGINAN INTERNAL DAN PANAS BUANG
KONDENSER UNTUK PROSES SUBLIMASI**

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 : 27 Juni 2011
Yang menyatakan



(Rio Ricardi)

ABSTRAK

Nama : Rio Ricardi
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Karakteristik Pengeringan Beku Vakum dengan Pemanfaatan Pendinginan Internal dan Panas Buang Kondenser untuk Proses Sublimasi

Pengeringan beku vakum merupakan metode pengeringan yang terbaik, tetapi tidak hemat energi karena proses pengeringan yang relatif lama. Skripsi ini membahas mengenai efek pemanfaatan panas buang kondenser sebagai usaha untuk mempercepat laju pengeringan material. Selain itu, skripsi ini juga membahas mengenai efek pengkombinasian pendinginan internal dari sistem refrijerasi dengan *vacuum freezing* pada proses penurunan tekanan material uji pada pengeringan beku vakum. Hasil penelitian membuktikan bahwa pemanfaatan pemanasan dari panas buang kondenser dapat mempercepat laju pengeringan hingga $0,0035 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Selain itu, proses pendinginan awal dengan pendinginan internal dapat membantu material untuk mencapai solid region tanpa mengalami evaporasi terlebih dahulu.

Kata kunci:

Pengeringan beku vakum, sublimasi, laju pengeringan, panas buang kondenser, pendinginan internal

ABSTRACT

Name : Rio Ricardi
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Characteristic of Vacuum Freeze Drying Process with Utilization of Internal Cooling and Condenser Wasted Heat for Sublimation Process

Vacuum freeze drying is the best drying method but very energy-intensive due to relatively long drying time. This thesis investigates the effect of utilization of condenser heat waste to sublimation process as a way to accelerate the drying rate. In addition, this undergraduate thesis also investigates the effect of combination of internal cooling and vacuum cooling in the pressure reduction process. The result shows that the utilization heating by condenser heat waste can accelerate the drying rate until $0,0035 \text{ kg/m}^2\text{s}$. In addition, the pre-freezing process by internal cooling could help the specimen to transforms into solid phase without evaporating first.

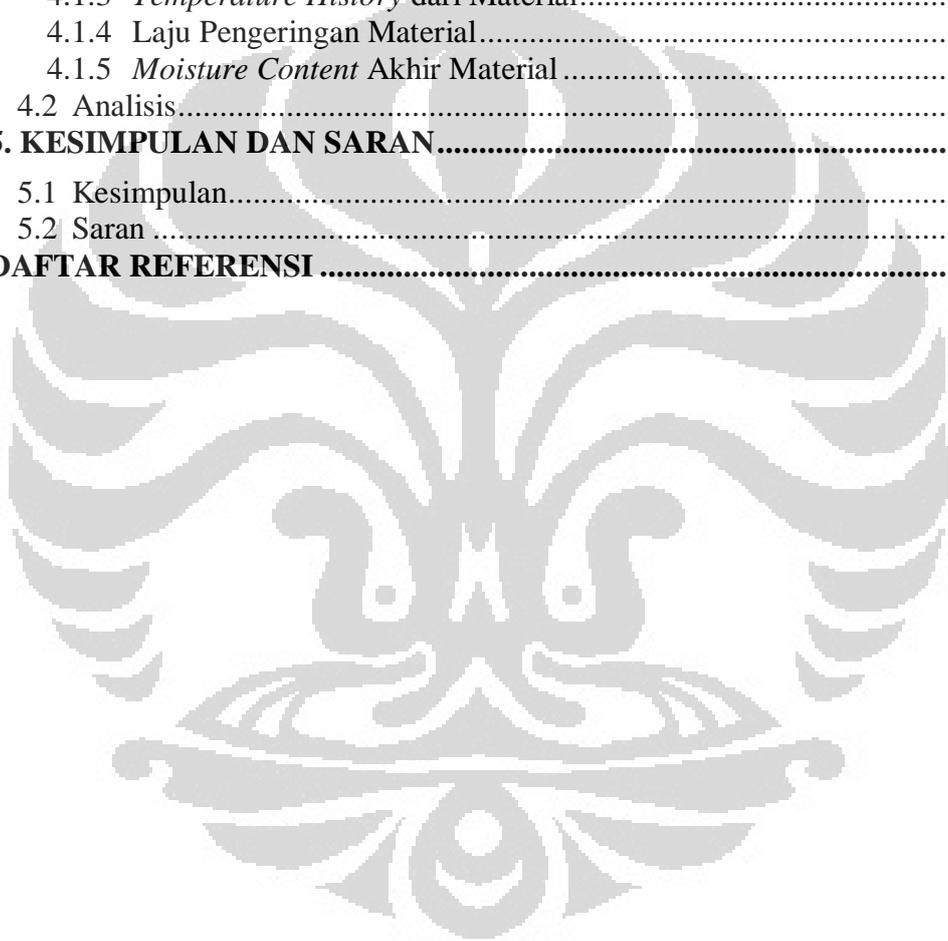
Key words:

Vacuum freeze drying, sublimation, drying rate, condenser heat waste, internal cooling

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penulisan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penulisan	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
2. DASAR TEORI	5
2.1 Proses Pengeringan	5
2.2 Pengeringan Beku Vakum	6
2.2.1 Pendinginan Vakum	7
2.2.1 Pengeringan	8
2.3 Kandungan Air (<i>Moisture Content</i>)	10
2.4 Perpindahan Kalor dan Massa	10
2.4.1 Perpindahan Kalor Konduksi	11
2.4.2 Perpindahan Kalor Radiasi	12
2.5 Siklus Refrijerasi	13
2.5.1 Refrijeran	13
2.5.2 Siklus Refrijerasi Tunggal	20
2.5.3 Siklus Refrijerasi <i>Cascade</i>	22
3. METODOLOGI PENGUJIAN	23
3.1 Diagram Alir Penelitian	23
3.2 Peralatan Pengujian	24
3.2.1 Mesin Pengering Vakum Beku Kompak (<i>Compact Freeze Vacuum Drying Machine</i>)	24
3.2.2 Alat Ukur	29
3.2.3 Alat- Alat Pendukung Lainnya	32
3.3 Skematik Alat	37
3.4 Persiapan Pengujian	38

3.4.1 Kalibrasi Alat Ukur	38
3.4.2 Pengisian Refrijeran	41
3.4.3 Persiapan Benda Uji	41
3.5 Pengujian.....	42
3.5.1 Lokasi Pengujian	42
3.5.2 Variasi Pengujian	42
3.5.3 Prosedur Pengambilan Data	45
4. PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS.....	47
4.1 Pengolahan Data	47
4.1.1 Perubahan Fase Material.....	47
4.1.2 Tekanan Saturasi Material	50
4.1.3 <i>Temperature History</i> dari Material.....	52
4.1.4 Laju Pengeringan Material.....	53
4.1.5 <i>Moisture Content</i> Akhir Material	55
4.2 Analisis.....	55
5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran	61
DAFTAR REFERENSI	63



DAFTAR TABEL

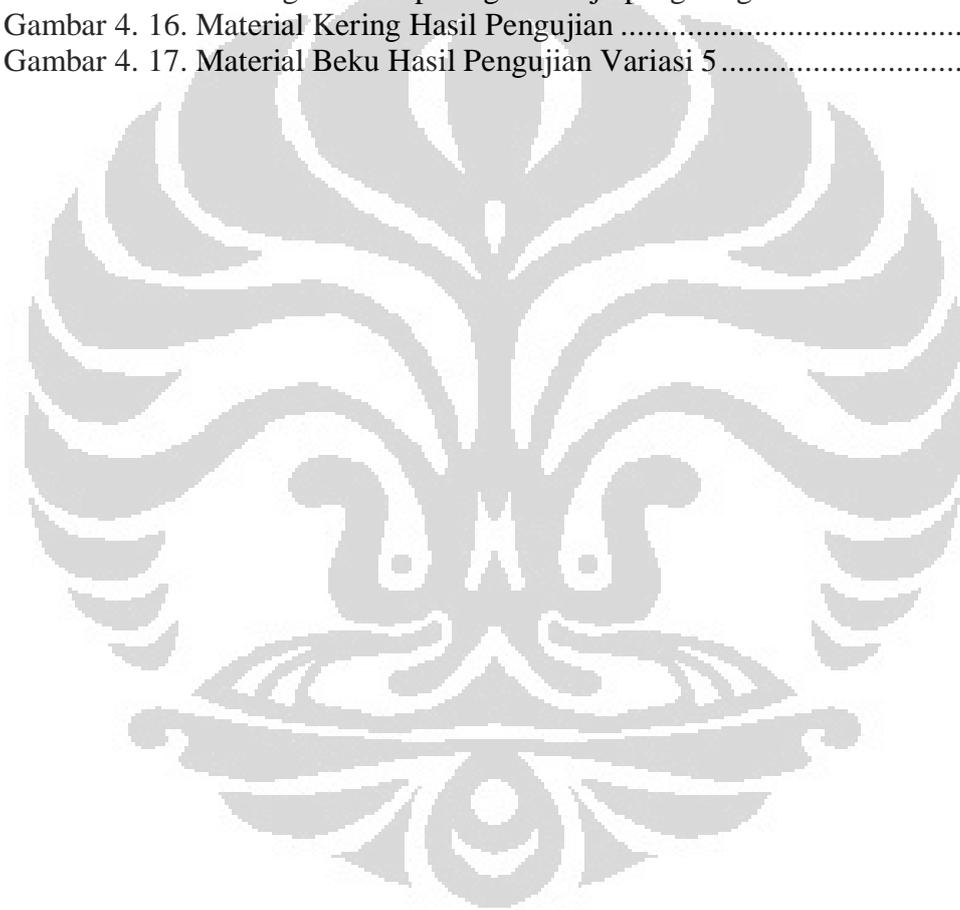
Tabel 2. 1. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran.....	15
Tabel 2.2. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran (Sambungan)	16
Tabel 2.3. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran (Sambungan)	17
Tabel 2.4. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran (Sambungan)	18
Tabel 3.1. Posisi <i>Thermocouple</i> dan <i>Pressure Gauge</i>	38
Tabel 3.2. Tabel Bantu Kalibrasi <i>Thermocouple</i>	39
Tabel 3.3. Tabel Bantu Kalibrasi <i>Pressure Transmitter</i>	40
Tabel 3.4. Variasi Data Pengujian	43
Tabel 4. 1. Waktu Pengeringan.....	53
Tabel 4. 2. Massa Material Kering yang Hilang.....	55



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Grafik Umum Pada Proses Pengeringan.....	6
Gambar 2. 2. Diagram Tekanan <i>Versus</i> Temperatur Untuk Air	7
Gambar 2. 3 Skematik Proses Pengeringan Beku Vakum	7
Gambar 2.4. Tekanan Saturasi Air	8
Gambar 2.5. Proses Pengeringan Awal.....	9
Gambar 2.6. Tiga Mekanisme Perpindahan Kalor	10
Gambar 2.7. Skema Perpindahan Kalor Dan Massa Dengan Kondisi Batas Konduksi.....	12
Gambar 2.8. Skema Perpindahan Kalor Dan Massa Dengan Kondisi Batas Radiasi	13
Gambar 2.9. Grafik Perbandingan Odp	19
Gambar 2.10. Grafik Perbandingan Gwp.....	19
Gambar 2.11. Siklus Refrijerasi Tunggal.....	21
Gambar 2.12. Sistem Refrigerasi <i>Cascade</i>	22
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3.2. <i>Compact Freeze Vacuum Drying Machine</i>	24
Gambar 3.3. Kompresor	25
Gambar 3.4. PHE.....	26
Gambar 3.5. <i>Needle Valve</i>	26
Gambar 3.6. Kondenser dan <i>Fan</i>	27
Gambar 3.7. Evaporator	27
Gambar 3.8. <i>Stop Valve</i>	28
Gambar 3. 9 <i>Check Valve</i>	28
Gambar 3.10. Wadah Material	29
Gambar 3.11. <i>Thermocouple</i> Tipe K.....	30
Gambar 3.12. <i>Pressure Gauge</i>	30
Gambar 3.13. <i>Pressure Transmitter</i>	31
Gambar 3.14. <i>Orifice</i>	31
Gambar 3.15. DAQ NI.....	32
Gambar 3.16. Tampilan LabVIEW.....	33
Gambar 3.17. Pompa Vakum	33
Gambar 3.18. Timbangan Digital	34
Gambar 3.19. <i>Testing Manifold</i>	35
Gambar 3.20. CTB.....	35
Gambar 3.21. Termometer Air Raksa.....	36
Gambar 3.22. <i>Kalibrator Pressure</i>	36
Gambar 3.23. Skematik Alat Pengering Beku Vakum	37
Gambar 3.24. Ubur-ubur yang Telah Diblender.....	42
Gambar 3. 25. Variasi 1 (Tanpa Pendinginan Internal dan Pemanasan)	44
Gambar 3. 26. Variasi 2 (<i>Full</i> Pendinginan Internal dan Pemanasan)	44
Gambar 3. 27. Variasi 3(Pendinginan Internal dan Pemanasan Setengah).....	44
Gambar 3. 28. Variasi 4 (Tanpa Pendinginan Internal, <i>Full</i> Pemanas).....	44
Gambar 3. 29. Variasi 5 (Full Pendinginan Internal, Tanpa Pemanasan).....	45
Gambar 4. 1. Diagram P vs T Variasi 1	48
Gambar 4. 2. Diagram P vs T Variasi 2	48

Gambar 4. 3. Diagram P vs T Variasi 3	49
Gambar 4. 4. Diagram P vs T Variasi 4	49
Gambar 4. 5. Diagram P vs T Variasi 5	50
Gambar 4. 6. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 1	50
Gambar 4. 7. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 2	51
Gambar 4. 8. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 3	51
Gambar 4. 9. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 4	52
Gambar 4. 10. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 5	52
Gambar 4. 11. <i>Temperature History</i> dari Material	53
Gambar 4. 12. Laju Pengeringan Material Karena Konduksi	54
Gambar 4. 13. Laju Pengeringan Material Karena Radiasi	54
Gambar 4. 14. Pembagian zona pada grafik <i>temperature history</i>	57
Gambar 4. 15. Pembagian zona pada grafik laju pengeringan	58
Gambar 4. 16. Material Kering Hasil Pengujian	59
Gambar 4. 17. Material Beku Hasil Pengujian Variasi 5	59



DAFTAR NOTASI

Simbol	Arti	Satuan
X	Fraksi kandungan air (<i>moisture content</i>)	
m	Massa material	(g)
q	Aliran kalor	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
L	Ketebalan material	(m)
T	Temperatur	(K)
m	Laju pengeringan/ laju aliran massa	$\left(\frac{kg}{m^2s}\right)$
F	Emisivitas air	
 Huruf Yunani		
Δh	Kalor laten sublimasi es	$\left(\frac{J}{kgK}\right)$
ΔL	Jarak bagian beku ke permukaan material	(m)
σ	Konstanta Stefan Boltzman	$\left(\frac{J}{m^2sK^4}\right)$
λ	Konduktivitas termal es	$\left(\frac{W}{mK}\right)$
 Subskrip		
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>)	

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 (SCTV, 2011). Pada tahun 2007, kanker diklaim telah merenggut nyawa 7,6 juta orang di seluruh dunia (Medical News Today, 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 (Elshinta, 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 Duan, Zhang M., Mujumdar, Arun S., Shaojin Wang, 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.

1.2 Perumusan Masalah

Skripsi ini membahas mengenai proses pengeringan beku vakum dengan sistem refrigerasi dua tingkat (*cascade*) dan efek penggunaan kombinasi pendinginan internal dengan *vacuum freezing* pada dan pemanasan dari panas buang kondenser saat proses pengeringan sebagai sebagai solusi mempercepat laju pengeringan.

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah:

1. merancang dan membuat alat pengering vakum beku kompak (*vacuum freeze drying machine*);
2. melakukan pengujian dan pengambilan data dengan menggunakan alat pengering vakum beku kompak (*vacuum freeze drying machine*); dan
3. 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 dengan variasi kombinasi pendinginan internal dan *vacuum cooling* saat proses pembekuan;
2. membahas mengenai karakteristik proses pengeringan beku vakum dengan variasi pemanasan menggunakan panas buang dari kondenser saat proses pengeringan;
3. membahas mengenai karakteristik proses pengeringan beku vakum dengan kombinasi dua proses tersebut di atas;
4. membahas karakteristik pengeringan beku vakum dari sisi perpindahan kalor konduksi dan radiasi; dan
5. membahas karakteristik pengeringan beku vakum dari sisi perpindahan massa material yang dikeringkan akibat adanya proses perpindahan kalor konduksi dan radiasi.

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 kompak;
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 pengeringan secara umum, pengeringan beku vakum, *moisture content*, perpindahan kalor dan massa, refrijeran, dan siklus refrijerasi.

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.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Proses Pengeringan

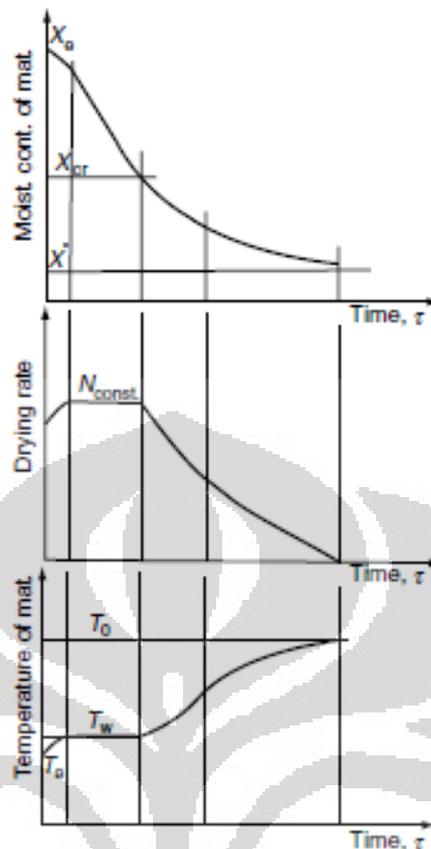
Pengeringan adalah proses pemanfaatan kalor yang terkontrol untuk menyerap kandungan air di dalam suatu material. Selama proses pengeringan, diperlukan kalor untuk menyerap kandungan air di permukaan dan di dalam material. Ketika permukaan material terpapar kalor, terjadi perpindahan kalor dan air akan menguap. Jadi, dalam proses pengeringan terjadi dua peristiwa, yaitu (Arum S. Mujumdar, 2006):

1. transfer energi (dalam bentuk panas) dari lingkungan untuk mengevaporasi permukaan material; dan
2. transfer massa (kandungan air) ke permukaan material dari dalam material karena proses 1.

Uap air berdifusi melalui lapisan tipis udara akan terbawa keluar. Hal ini menyebabkan terjadinya daerah bertekanan uap air yang rendah di permukaan material dibandingkan tekanan saturasi air di material. Inilah yang menimbulkan gaya yang mendorong air keluar dari material, karena adanya gradien tekanan. Air bergerak ke permukaan material melalui mekanisme berikut (Arum S. Mujumdar, 2006):

1. pergerakan cairan karena gaya kapilaritas;
2. difusi cairan; dan
3. difusi uap air karena perbedaan tekanan uap.

Ketika material yang akan dikeringkan diletakkan pada pengering, akan ada periode pendek di mana temperatur permukaan mencapai temperatur yang sama dengan temperatur bola basah (*wet bulb temperature*). Proses pengeringan kemudian berjalan konstan dengan syarat bahwa permukaan selalu basah karena air dari dalam material bergerak ke atas dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan evaporasi air di permukaan. Periode ini dinamakan *constant rate period*. Periode ini terus berlangsung hingga mencapai titik kandungan air kritis tercapai. Pada titik ini proses pengeringan masuk ke *falling rate period*.

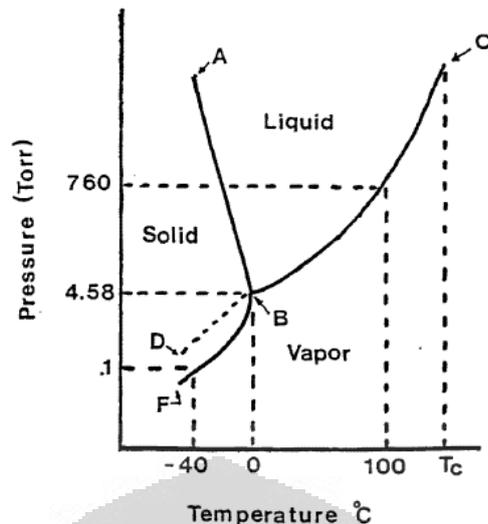


Gambar 2. 1. Grafik umum pada proses pengeringan

Sumber : Molnar, Karoly. (2006). *Experimental Technique in Drying*. In Arun S. Mujumdar (Ed.). *Handbook of Industrial Drying*.

2.2 Pengeringan Beku Vakum

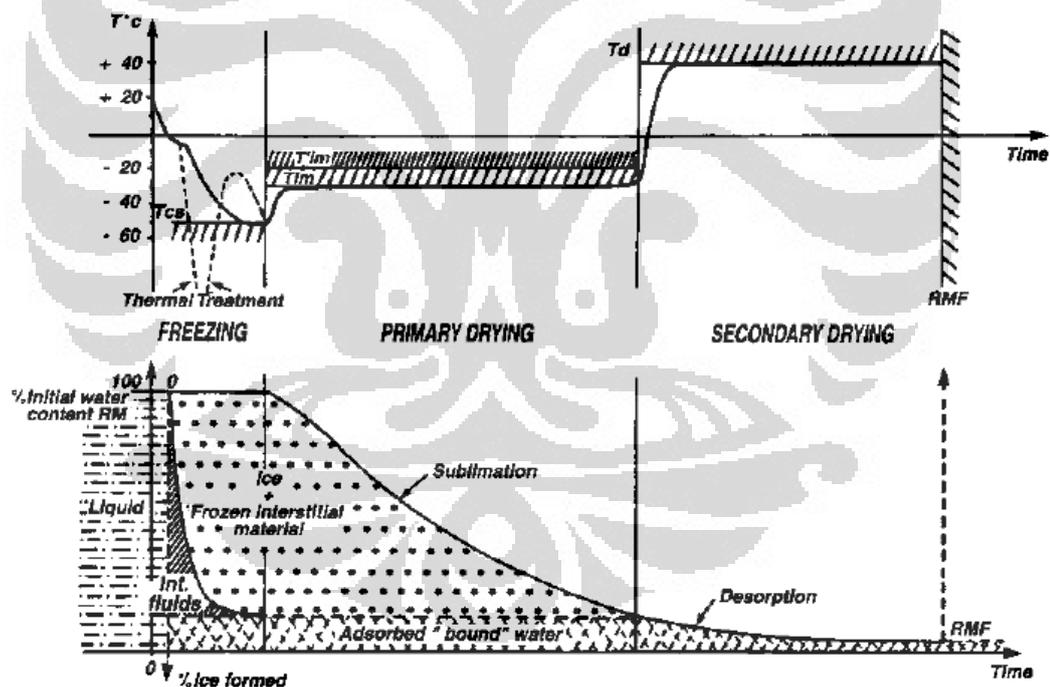
Freeze vacuum drying (pengeringan beku vakum) merupakan proses pengeringan di mana larutan mengalami proses pemvakuman untuk menurunkan tekannannya sehingga menjadi kristal es dan menambahkan panas agar es yang tercipta dapat langsung bersublimasi ke bentuk gas. Proses pengeringan ini terdiri dari tiga tahap, yaitu tahap pembekuan vakum (*vacuum freezing*), tahap pengeringan awal, dan tahap pengeringan lanjut.



Gambar 2. 2. Diagram Tekanan *Versus* Temperatur untuk Air

Sumber: Jennings, Thomas A. (2008). *Lyophilization : Introduction and Basic Principles*.

Skematik proses pengeringan beku vakum secara umum dapat dilihat pada gambar 2.3.



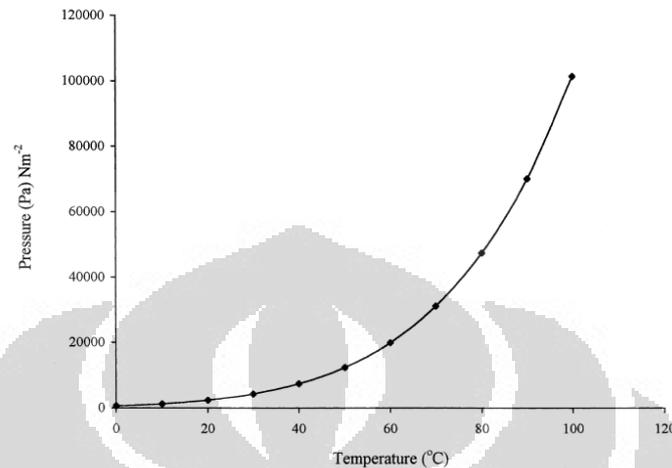
Gambar 2. 3 Skematik Proses Pengeringan Beku Vakum

Sumber : Rey, Louis. (2004). *Glimpse Into the Realms of Freeze Drying : Fundamental Issues*. In Louis Rey (Ed.). *Freeze Drying/ Lyophilization of Pharmaceutical and Biolitical Products* (2nd ed.)

2.2.1 Pendinginan Vakum

Pada tahap pendinginan vakum, temperatur material diturunkan sehingga semua bagiannya berada pada keadaan beku dengan proses pemvakuman

menggunakan pompa vakum. Proses *vacuum freezing* ini berdasarkan prinsip bahwa titik didih berubah seiring fungsi tekanan saturasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Proses ini terus berlanjut hingga material berada pada titik di bawah *triple point* air yaitu tekanan 6,1 mbar dan temperatur 0 °C.

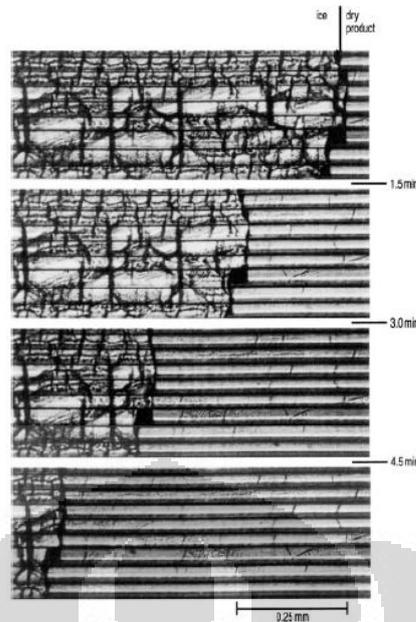


Gambar 2.4. Tekanan Saturasi Air

Sumber: McDonald, Karl & Da-Wen Sun. (2000). *Vacuum Cooling Technology for the Food Processing Industry: a Review*.

2.2.1 Pengeringan

Pengeringan pada dasarnya terdiri dari dua mekanisme perpindahan, yaitu (1) perpindahan energi untuk mengubah es menjadi uap air dan (2) perpindahan uap air dari permukaan sublimasi melalui produk yang telah kering menuju ke ruang pengering dan selanjutnya menuju pompa vakum. Pada tahap pengeringan awal, larutan beku dibuang lewat proses sublimasi. Proses ini membutuhkan tekanan dari sistem (ruang material) yang lebih kecil atau mendekati *triple point*. Jika larutan adalah air, maka tekanan ruang material harus dijaga di bawah 6,1 mbar dan temperatur di bawah 0 °C. Gambar di bawah menunjukkan proses pengeringan awal pada tepung kanji *hydroxyethyl* dengan campuran 10% larutan dilihat menggunakan *cryomicroscope*.



Gambar 2.5. Proses Pengeringan Awal

Sumber: Oetjen, George W. and Aseley, Peter H. (2004). *Freeze Drying*, (2nd ed.).

Seiring dengan tersublimasinya es, lapisan sublimasi yang tercipta dari bagian luar permukaan material berkurang dan menyisakan material kering yang berpori. Setelah es tersublimasi, air yang tidak tersublimasi diserap keluar dari padatan. Proses ini disebut proses pengeringan lanjutan. Pada proses ini, perpindahan energi tidak memainkan peranan penting karena jumlah air yang terkandung kurang dari 10% dari padatan. Namun demikian, proses pengeringan lanjut tetap memakan waktu yang cukup lama seperti pengeringan awal.

Kelebihan dari *vacuum freeze drying* dibandingkan dengan teknik pengeringan lainnya adalah sebagai berikut:

- proses pengeringan pada temperatur rendah dapat mengurangi kerusakan material yang tidak tahan panas;
- jumlah kandungan uap air produk dapat dikontrol pada saat proses; serta
- produk kering mempunyai struktur yang bagus.

Sementara itu, kekurangannya adalah sebagai berikut:

- tingginya biaya investasi, operasi, dan pemeliharaan; serta
- kompleksitas dari proses dan alat-alat sehingga memerlukan operator yang terlatih.

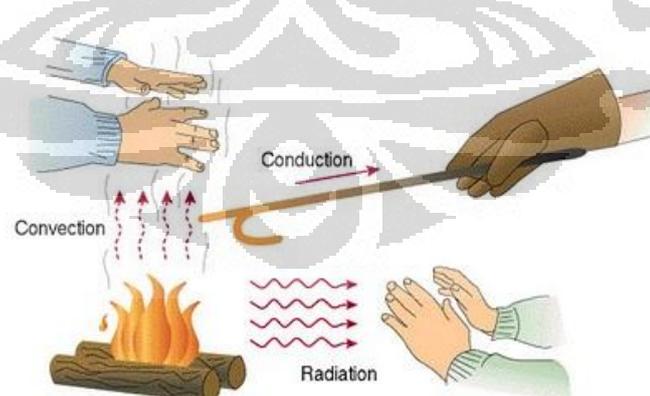
2.3 Kandungan Air (*Moisture Content*)

Moisture content adalah kuantitas air yang terkandung dalam sebuah material. *Moisture content* digunakan di banyak bidang teknikal dan sains dan biasanya dinyatakan dalam bentuk rasio. Rasio *moisture content nol* artinya adalah kering total. Persamaan untuk mencari nilai fraksi *moisture content* pada *wet basis* (g/g) dari suatu material setelah dikeringkan selama t adalah:

$$X_t = \frac{(m_d+m_w)-m_t}{m_d+m_w} \quad (2.1)$$

2.4 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).



Gambar 2. 6. Tiga Mekanisme Perpindahan Kalor

Sumber: Rahmat, D . (2010). *Jenis Aliran Panas*. 18 Mei 2011.

2.4.1 Perpindahan Kalor Konduksi

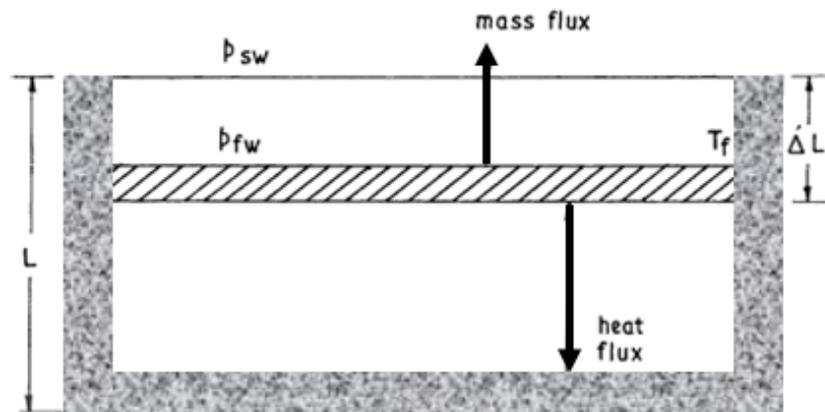
Jika sebuah logam yang salah satu ujungnya dipanaskan dalam selang waktu tertentu, ujung lainnya pun akan terasa panas. Hal ini menunjukkan bahwa pada batang logam tersebut terjadi aliran atau perpindahan kalor dari bagian logam yang bertemperatur tinggi ke bagian logam yang bertemperatur rendah. Perpindahan 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-atom tetangga yang ditumbuk dan mendapatkan kalor ini akan ikut bergetar dan menumbuk atom-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 2.7 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 2.7. Skema Perpindahan Kalor dan Massa dengan Kondisi Batas Konduksi

Sumber: George, James P. and Datta, A.K. (2001). *Development And Validation of Heat and Mass Transfer Models for Freeze-Drying of Vegetable Slices*. Telah diolah kembali.

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

$$q = \frac{\lambda}{L - \Delta L} (T_s - T_f) \quad (2.2)$$

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

$$q = \frac{\lambda}{xL} (T_s - T_f) \quad (2.3)$$

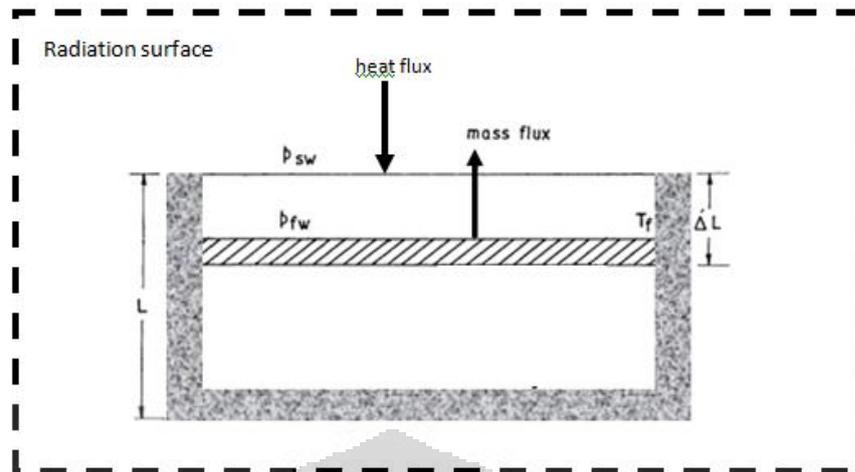
Sementara laju pengeringan dapat dimodelkan sebagai berikut :

$$m = \frac{q}{\Delta h} \quad (2.4)$$

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 2.8 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 2.8. Skema Perpindahan Kalor dan Massa dengan Kondisi Batas Radiasi

Sumber: George, James P. and Datta, A.K. (2001). *Development And Validation of Heat and Mass Transfer Models for Freeze-Drying of Vegetable Slices*. Telah diolah kembali.

Persamaan matematis untuk besarnya perpindahan kalor radiasi adalah:

$$q = \sigma FL(T_s^4 - T_d^4) \quad (2.7)$$

Laju pengeringan dapat dicari menggunakan persamaan (2.4).

2.5 Siklus Refrijerasi

Refrijerasi adalah proses penyerapan kalor dari suatu benda ruang. Kalor diserap dari makanan untuk menjaga kualitas dan rasanya. Kalor diserap dari udara ruangan untuk menjaga kenyamanan manusia. Selama proses refrijerasi, kalor yang tidak dibutuhkan ditransfer secara mekanikal ke daerah lain. Fluida yang disebut refrijeran merupakan bagian utama dari perpindahan kalor oleh sistem refrijerasi.

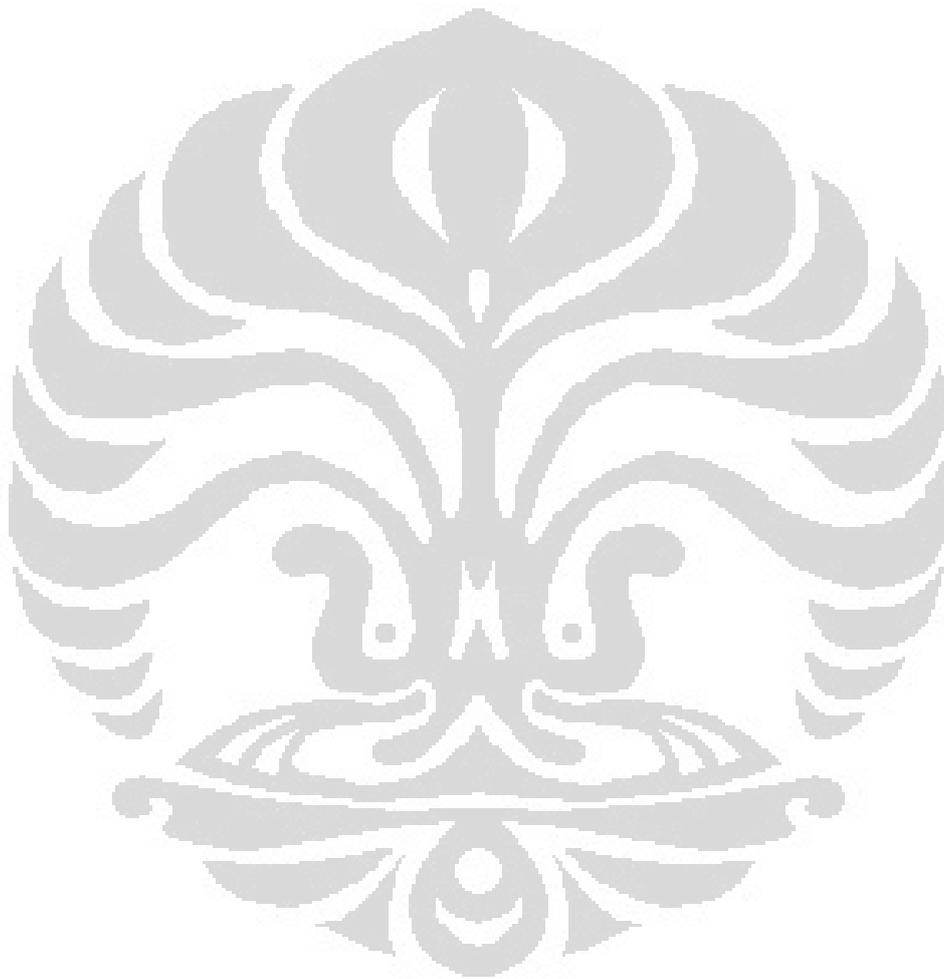
2.5.1 Refrijeran

Refrijeran adalah substansi yang dapat menyerap kalor laten ketika berubah fase dari cair menjadi uap. Hal ini terjadi pada tekanan dan temperatur yang rendah. Refrijeran membuang kalor laten ketika berkondensasi dari gas menjadi cairan. 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.

Pada tabel 2.1 berikut ditampilkan beberapa sifat fisis dari beberapa jenis refrigeran.



Tabel 2. 1. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran

Refrigerant	Name	Molecular Mass	Boiling point at atmospheric pressure (°F)	Freezing Point at atmospheric pressure (°F)	Critical Point		
					Temperature (°F)	Pressure (psia)	Specific Volume (Cu.Ft./lb.)
R-10	<i>Carbontetrachloride</i>	153.8	170.2				
R-11	<i>Trichlorofluoromethane</i>	137.37	74.9	-168	388	640	0.0289
R-12	<i>Dichlorodifluoromethane</i>	120.91	-21.8	-252	234	597	0.0287
R-13	<i>Monochlorotrifluoromethane</i>	104.46	-114.6	-294	84	561	0.0277
R-13B1	<i>Bromotrifluoromethane</i>	148.91	-72	-270	153	575	0.0215
R-14	<i>Tetrafluoromethane (Carbon tetrafluoride)</i>	88	-198.2	-299	-50	543	0.0256
R-14	<i>Chloroform</i>	119.4	142				
R-21	<i>Dichloro-fluoromethane</i>	102.92	48.1	-211			
R-22	<i>Monochlorodifluoromethane</i>	86.468	-41.3	-256	205	722	0.0305
R-23	<i>Trifluormethane</i>	70	-119.9				
R-30	<i>Methylene Chloride</i>	84.9	105.2				
R-31	<i>Monochloromonofluoromethane</i>	68.5	48				
R-32	<i>Methylene Fluoride</i>	52	-61.4				

Tabel 2.2. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran (Sambungan)

R-40	<i>Chloromethane (Methyl Chloride)</i>	50.488	-10.7	-144	290	969	0.0454
R-41	<i>Methyl Fluoride</i>	34	-109				
R-50	<i>Methane</i>	16.044	-259	-296.6			
R-110	<i>Hexachloroethane</i>	236.8	365				
R-111	<i>Pentachloromonofluoroethane</i>	220.3	279				
R-112	<i>Tetrachlorodifluoroethane</i>	203.8	199				
R-113	<i>Trichlorotrifluoroethane</i>	187.39	118	-31	417	499	0.0278
R-114	<i>1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoroethane</i>	170.92	38.4	-137	294	473	0.0275
R-115	<i>Chloropentafluoroethane</i>	154.47	-38	-149	176	458	0.0261
R-116	<i>Hexafluoroethane</i>	138	-108.8				
R-120	<i>Pentachloroethane</i>	202.3	324				
R-123	<i>Dichlorotrifluoroethane</i>	152.93	82	-161	363	533	
R-124	<i>Monochlorotetrafluoroethane</i>	136.5	10.4				
R-125	<i>Pentafluoroethane</i>	120	-55				
R-133a	<i>Monochlorotrifluoroethane</i>	118.5	43				
R-134a	<i>Tetrafluoroethane</i>	102.03	-15	-142	214	590	0.029
R-140a	<i>Trichloroethane</i>	133.4	165				
R-142b	<i>1-chloro-1,1-difluoroethane</i>	100.5	14	-204	279	598	0.0368

Tabel 2.3. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran (Sambungan)

R-143a	<i>Trifluoroethane</i>	84	-53.5				
R-150a	<i>Dichloroethane</i>	98.9	140				
R-152a	<i>Difluoroethane</i>	66.05	-13				
R-160	<i>Ethyl Chloride</i>	64.515	12.2	-218			
R-170	<i>Ethane</i>	30.07	-127	-278	90	710	0.083
R-218	<i>Octafluoropropane</i>	188	-36.4				
R-290	<i>Propane</i>	44.097	-44	-309.8	206	617	0.0728
RC-318	<i>Octafluorocyclobutane</i>	200.04	22	-43	240	404	0.0258
R-410A	<i>R-32 Difluoromethane (50% weight), R-125 Pentafluoroethane (50% weight)</i>	72.6	-55.4		162	690	
R-500	<i>Dichlorodifluoromethane/ Difluoroethane</i>	99.31	-28	-254	222	642	0.0323
R-502	<i>Chlorodifluoromethane/ Chloropentafluoroethane</i>	111.63	-50		180	591	0.0286
R-503	<i>Chlorotrifluoromethane/ Trifluoromethane</i>	87.5	-128		67	607	0.0326
R-600	<i>n-Butane</i>	58.12	31.2	-217	306	551	0.0702
R-600a	<i>Isobutane (2-Methyl propane)</i>	58.12	10.8	-229	275	529	0.0725

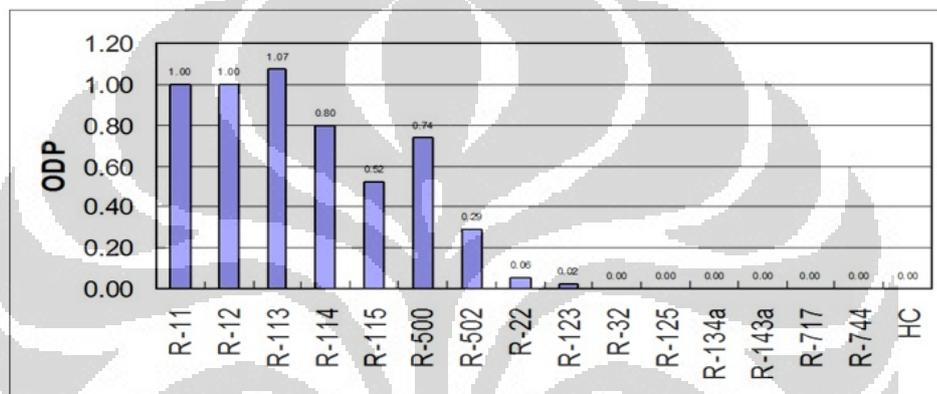
Tabel 2.4. Sifat Fisis Beberapa Jenis Refrijeran (Sambungan)

R-611	<i>Methyl formate</i>	60.05	89	-146	417	870	0.0459
R-702	<i>Hydrogen</i>	2.016	-423	-434.6			
R-704	<i>Helium</i>	4.0026	-452				
R-717	<i>Ammonia</i>	17.02	-28	-107.9	271	1657	0.068
R-720	<i>Neon</i>	20.179	-410.9	-415.6			
R-728	<i>Nitrogen</i>	28.0134	-320.4	-346			
R-729	<i>Air</i>	28.966	-320	-357.2			
R-732	<i>Oxygen</i>	31.9988	-297.3	-361.3			
R-740	<i>Argon</i>	39.948	-303	-308.5			
R-744	<i>Carbon Dioxide</i>	44.01	-109.4	-70	88	1070	0.0342
R-744A	<i>Nitrous Oxide</i>	44.012	-127.3	-131.5			
R-764	<i>Sulfur Dioxide</i>	64.06	14	-104	316	1143	0.0306
R-1150	<i>Ethylene</i>	28.05	-155	-272	49	742	0.07
R-1270	<i>Propylene</i>	42.08	-54	-301	197	670	0.072

Sumber : The Engineering Toolbox. (n.d.). *Refrigerants-Physical Properties*. 18 Mei 2011.

Sejak disepakatinya protokol Kyoto dan Montreal, terdapat dua kriteria keamanan refrijeran yang harus dipenuhi oleh suatu refrijeran agar dapat digunakan secara aman dan komersil. Dua kriteria tersebut adalah ODP (*Ozone Depletion Potential*) dan GWP (*Global Warming Potential*). ODP adalah nilai yang menunjukkan potensi suatu refrijeran terhadap kerusakan ozon, sementara GWP adalah nilai yang menunjukkan potensi suatu refrijeran terhadap pemanasan global. Di bawah ini adalah grafik yang menunjukkan perbandingan ODP dan GWP beberapa refrijeran:

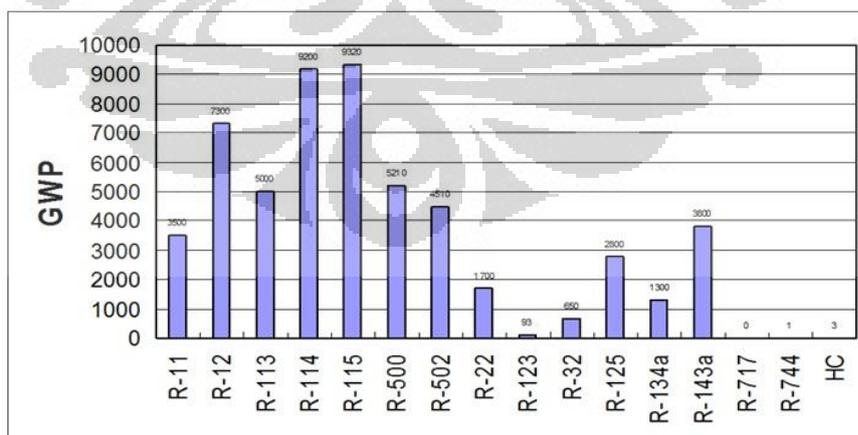
REFRIGERANT COMPARISON



Gambar 2.9. Grafik Perbandingan ODP

Sumber: Greenstar Artek Indonesia. (n.d.). *Hydrocabon Refrigerant*. 18 Mei 2011.

REFRIGERANT COMPARISON



Gambar 2.10. Grafik Perbandingan GWP

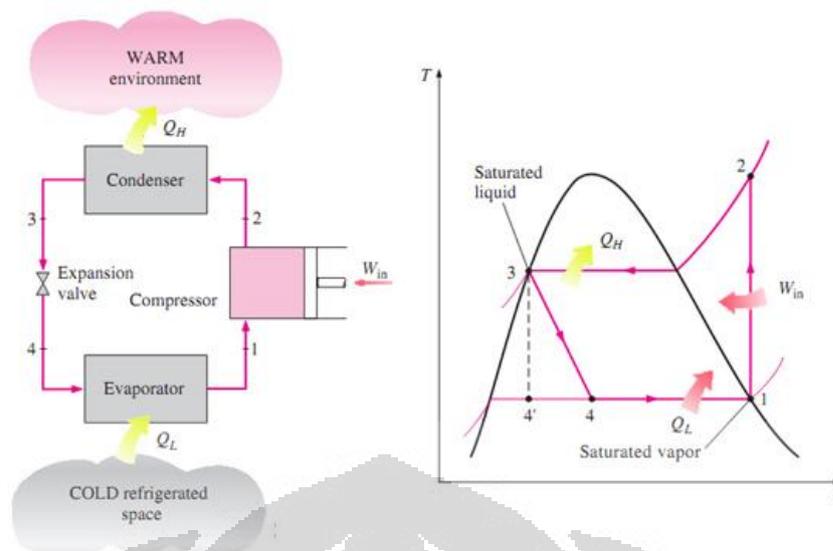
Sumber: Greenstar Artek Indonesia. (n.d.). *Hydrocabon Refrigerant*. 18 Mei 2011.

Refrijeran diklasifikasi ke dalam beberapa kelas berdasarkan jenis fluida yang digunakan, yaitu:

- *Chlorodifluorocarbon (CFC)*
CFC adalah senyawa yang mengandung klorin, fluor, dan karbon. CFC memiliki efek ODP dan GWP yang sangat tinggi. Contoh CFC antara lain: R11, R12, R13, R500, dan lain- lain.
- *Hydrochlorofluorocarbon (HCFC)*
HCFC adalah senyawa haloalkana di mana terdapat hidrogen pada ikatannya. HCFC digunakan sebagai pengganti CFC karena nilai ODP-nya lebih rendah. Contoh HCFC antara lain: R22, R123, R401A, dan lain- lain.
- *Hydrofluorocarbon (HFC)*
HFC tidak mengandung klorin dan hanya mengandung hidrogen, fluor, dan karbon sehingga nilai ODP dan GWP-nya lebih rendah. Contoh HFC antara lain: R134A, R404A, R407, dan lain- lain
- *Hydrocarbon (HC)*
HC adalah senyawa organik yang hanya terdiri dari hidrogen dan karbon. HC tidak memiliki dampak negatif terhadap lingkungan namun memiliki dampak negatif terhadap pengguna karena mudah terbakar. Contoh HC antara lain: propana, etana, iso-butana, dan lain- lain.
- *Natural*
Refrijeran natural adalah refrijeran yang berasal dari alam dan tidak memiliki dampak negatif terhadap lingkungan. Contohnya adalah CO₂ dan ammonia.

2.5.2 Siklus Refrijerasi Tunggal

Siklus refrijerasi tunggal memiliki satu tingkat kompresor seperti gambar 2.11.



Gambar 2.11. Siklus Refrijerasi Tunggal

Sumber: Cooling Device. (n.d.). *Other Refrigeration Cycles*. 18 Mei 2011.

Siklus refrigerasi kompresi-uap ideal merupakan kebalikan siklus Carnot, di mana refrigeran harus menguap seluruhnya sebelum dikompresi pada kompresor dan kemudian mengalir menuju *expansion valve* (digantikan peranannya oleh needle valve pada alat ini). Seperti terlihat pada skema dan diagram $T-s$ di atas, ada empat proses yang terjadi, yaitu:

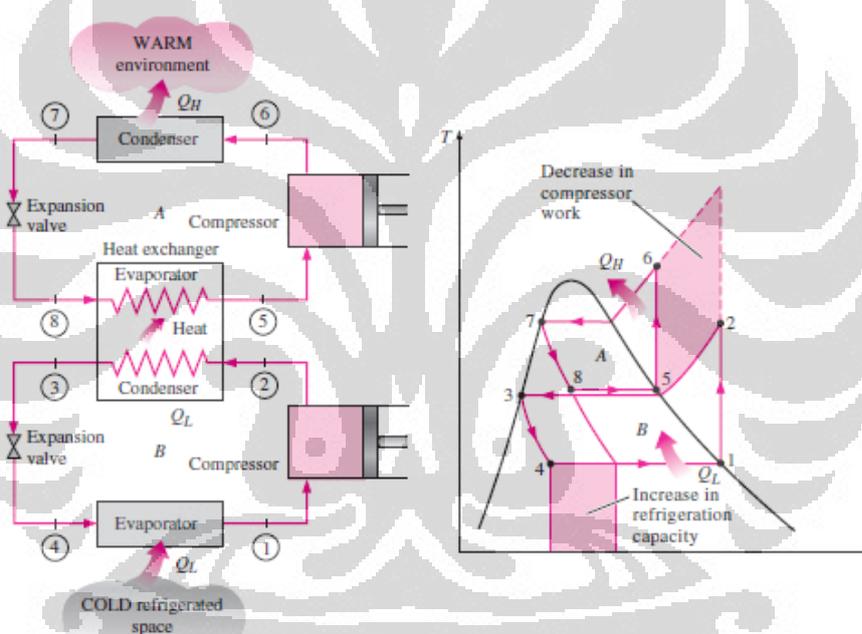
- 1-2 : Kompresi isentropis dalam kompresor
- 2-3 : Pembuangan kalor secara isobaris dalam kondenser
- 3-4 : *Throttling* dalam katup ekspansi
- 4-1 : Penyerapan kalor secara isobaris dalam evaporator

Dari gambar 2.10, alur refrigeran dimulai pada kondisi 1 saat masuk kompresor sebagai uap jenuh kemudian dikompresi secara isentropik sampai tekanan kondensor. Temperatur refrigeran naik selama proses kompresi ini di atas temperatur lingkungan. Refrigeran kemudian masuk ke kondensor sebagai uap *superheat* pada tingkat keadaan 2 dan keluar sebagai cairan jenuh pada tingkat keadaan 3 sehingga terjadi pelepasan kalor ke lingkungan. Refrigeran pada tingkat keadaan 3 ini diekspansi sampai tekanan evaporator melalui katup ekspansi atau pun pipa kapiler. Temperatur refrigeran menjadi turun di bawah temperatur ruangan yang dikondisikan selama proses ini. Refrigeran masuk ke evaporator pada tingkat keadaan 4 (diidealisasi sebagai ekspansi isentropik pada tingkat keadaan 4') sebagai campuran saturasi dua-fasa (cair-uap) dengan kualitas rendah,

kemudian refrigeran menguap seluruhnya dengan menyerap kalor dari ruangan yang dikondisikan tersebut. Refrigeran keluar dari evaporator sebagai uap jenuh dan masuk kembali ke kompresor pada tingkat keadaan 1.

2.5.3 Siklus Refrijerasi *Cascade*

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



Gambar 2.12. Sistem Refrijerasi *Cascade*

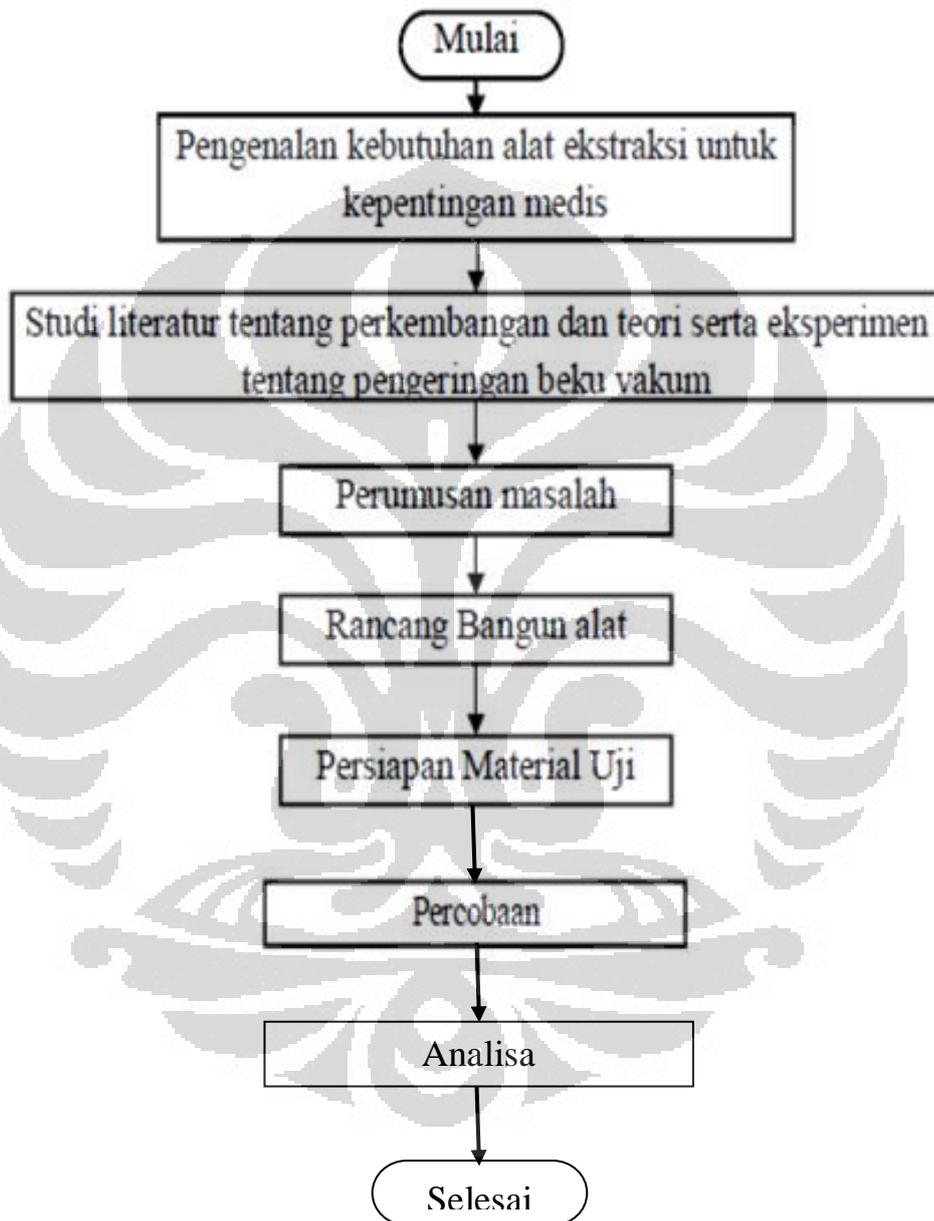
Sumber : Cooling Device. (n.d.). *Other Refrigeration Cycles*. 18 Mei 2011.

Pada gambar 2.12, dua siklus refrigrasi kompresi uap dihubungkan dengan suatu *heat exchanger*. *Heat exchanger* tersebut berfungsi sebagai evaporator pada siklus yang pertama (*High Temperatur Cascade/HS*) dan berfungsi sebagai kondenser pada siklus yang kedua (*Low Temperature Cascade/HS*). Pada prinsipnya, efek refrigrasi yang dihasilkan oleh evaporator HS dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dilepas oleh kondenser LS sehingga dapat dihasilkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator LS.

BAB 3 METODOLOGI PENGUJIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Peralatan Pengujian

3.2.1 Mesin Pengering Vakum Beku Kompak (*Compact Freeze Vacuum Drying Machine*)

Mesin pengering beku vakum kompak (*compact freeze vacuum drying machine*) yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dua sistem utama, yaitu sistem vakum dan sistem refrijerasi. Sistem vakum berfungsi untuk menurunkan tekanan dalam ruang material hingga di bawah *triple point* air (temperatur 0,01 °C dan tekanan 6,1 mbar) dari temperatur dan tekanan atmosfer (temperatur 27 °C dan tekanan 1013,25 mbar) atau biasa disebut *vacuum freezing*. Sementara itu, sistem refrijerasi berfungsi untuk menurunkan temperatur di ruang *coldtrap* dan ruang material (pendinginan internal). *Coldtrap* adalah suatu sistem yang berfungsi untuk menangkap uap air yang terbentuk selama proses pengeringan agar tidak masuk ke dalam pompa vakum karena uap air yang masuk ke dalam pompa vakum dapat menyebabkan kerusakan pada alat tersebut.



Gambar 3.2. *Compact Freeze Vacuum Drying Machine*

Inovasi yang ditambahkan dalam mesin ini adalah dengan pengkombinasian antara pembekuan internal (sistem refrijerasi) dan vakum sehingga kemungkinan proses pembekuan pada kondisi di bawah titik *triple point*

dapat diatasi. Selain itu, untuk mengatasi masalah penggunaan energi sublimasi digunakan panas buang dari kondensor. Dengan diterapkannya sistem ini, maka kendala dalam masalah pencapaian kondisi di bawah titik *triple point* dan penggunaan energi dapat diatasi. Sistem refrijerasi yang digunakan di mesin pengering beku vakum ini merupakan sistem *cascade* atau bertingkat. Komponen-komponen yang terdapat di dalam alat ini antara lain:

1. Kompresor

Kedua kompresor yang digunakan dalam alat ini mempunyai spesifikasi yang sama.

Merk : Tecumseh

HP : $\frac{1}{2}$



Gambar 3.3. Kompresor

2. *Plate Heat Exchanger* (PHE)

Plate Heat Exchanger (PHE) adalah jenis penukar kalor yang menggunakan piringan metal sebagai perantara panas antara dua fluida. Dalam alat ini, PHE digunakan sebagai perantara antara kondenser LS dengan evaporator HS.



Gambar 3.4. PHE

3. *Needle valve*

Needle valve adalah jenis katup yang mempunyai celah kecil dan *plunger* yang berbentuk jarum. Kelebihan jenis katup ini adalah pengaturan *plunger* yang jauh lebih teliti daripada katup lainnya. Katup ini digunakan pada alat sebagai pengganti *expansion valve* dan alat bantu saat kalibrasi *pressure transmitter*.

Merk/ tipe : Hy-Lock

Tekanan maksimum : 6000 psi



Gambar 3.5. Needle Valve

4. Kondenser

Pada alat ini, terdapat dua kondenser, yaitu kondenser HS dan kondenser LS. Kondenser LS terletak sebelum PHE. Kondenser LS menggunakan *fan* yang

sama dengan kondenser HS untuk memperbesar koefisien perpindahan kalor konveksi.

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

Material : pipa tembaga



Gambar 3.6. Kondenser dan *Fan*

5. Evaporator

Evaporator pada alat ini terbagi menjadi dua, yaitu ruang material dan *coldtrap*. *Coldtrap* terletak di bawah ruang material. Kedua ruang tersebut dibuat dari panci *stainless steel* yang dililit dengan pipa tembaga $\frac{1}{4}$ " dengan dimensi diameter 160 mm, tinggi 160 mm, dan tebal 1 mm. Ruang material ditutup menggunakan akrilik setebal 2 cm.



Gambar 3.7. Evaporator

6. *Stop valve*

Stop valve digunakan untuk menahan aliran refrijeran.



Gambar 3.8. *Stop Valve*

7. *Check valve*

Check valve adalah katup yang hanya bisa mengalirkan aliran refrijeran dari satu arah saja. Jadi jika ada aliran refrijeran dari arah sebaliknya, maka aliran tersebut tidak dapat melewati *check valve*.



Gambar 3. 9 *Check Valve*

8. Wadah material

Wadah material yang digunakan dalam pengujian ini adalah panci teflon yang diisolasi semua sisi sehingga yang menerima panas hanya bagian permukaannya saja. Diameter wadah material ini adalah 12 cm.



Gambar 3.10. Wadah Material

3.2.2 Alat Ukur

Variabel dalam penelitian ini adalah berupa tekanan, temperature, *mass flow* udara vakum, dan *mass flow* refrijeran. Untuk mengukur keempat hal tersebut, digunakan alat ukur antara lain:

- *Thermocouple*

Thermocouple adalah alat ukur temperatur yang banyak dipakai di industri. *Thermocouple* terdiri dari dua logam yang didekatkan yang apabila terpapar oleh kalor dengan temperatur tertentu akan menghasilkan beda potensial yang sebanding dengan perubahan temperatur (*Seeback Effect*).

Tipe : K

Range kerja : -200 °C – 1.350 °C



Gambar 3.11. *Thermocouple Tipe K*

- *Pressure gauge*

Pressure gauge adalah alat untuk mengukur tekanan fluida, dalam hal ini refrigeran. *Pressure gauge* bekerja secara analog dan hasil pembacaannya dapat langsung dilihat. *Pressure gauge* biru untuk tekanan rendah (biasanya pada *suction* kompresor), sementara *pressure gauge* merah untuk tekanan tinggi (biasanya pada *discharge* kompresor).

Tipe : *Freon pressure gauge*

Range kerja : Biru = hingga 120 psi

Merah = hingga 300 psi



Gambar 3.12. *Pressure Gauge*

- *Pressure transmitter*

Pressure transmitter adalah alat untuk mengukur tekanan fluida, dalam hal ini tekanan 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 600 bar



Gambar 3.13. *Pressure Transmitter*

- *Orifice*
Orifice adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengukur laju aliran volum atau massa fluida di dalam saluran yang tertutup (pipa) berdasarkan prinsip beda tekanan. Alat ini berupa plat tipis dengan gagang yang diapit diantara flens pipa. Aliran yang diukur menggunakan alat ini adalah *mass flow* refrijeran.



Gambar 3.14. *Orifice*

3.2.3 Alat- Alat Pendukung Lainnya

Selain mesin pengering beku vakum dan alat ukur, diperlukan berbagai macam alat- alat lainnya yang digunakan untuk mendukung proses pengujian dan pengambilan data. Alat- alat tersebut antara lain :

- *Data Acquisition Manager (DAQ)*

Data Acquisition Manager (DAQ) adalah alat untuk membantu dalam proses pencatatan dan pengambilan data. Alat ini terhubung ke *thermocouple* dan *pressure transmitter*.

Merk/ tipe : National Instrument / cDAQ-9174

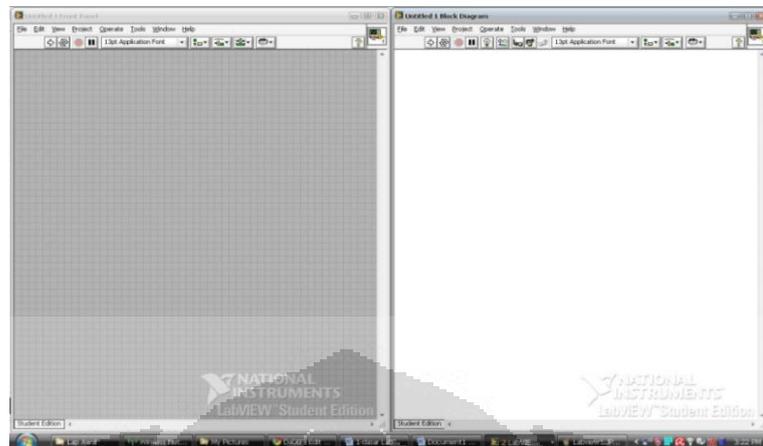


Gambar 3.15. DAQ NI

- *LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument and Engineering Workbench)*
LabVIEW 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. Program LabVIEW disebut dengan *Virtual Instrument (VI)* 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

Universitas Indonesia

memindahkan informasi tersebut ke *file* komputer lain. Data yang didapat dari program ini dalam bentuk teks (.lvm).



Gambar 3.16. Tampilan LabVIEW

- Pompa vakum

Pompa vakum mempunyai beberapa fungsi, yaitu untuk memvakum sistem refrijerasi sehingga refrijeran dapat mengalir ke dalam sistem, alat bantu kalibrasi *pressure transmitter*, dan untuk memvakum ruang material. Spesifikasi pompa vakum yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tipe : *Direct oil rotary vacuum pump*
Max. flow rate : 10 CFM (*Cubic Feet per Minute*)
Ultimate vacuum : 3×10^{-1} Pa
Power : 1 HP



Gambar 3.17. Pompa Vakum

- Timbangan digital

Timbangan digital digunakan saat mengisi refrijeran ke dalam sistem untuk mengetahui jumlah refrijran yang masuk ke dalam sistem dan untuk menimbang material uji sebelum dan sesudah pengujian.

Merk : AND fx4000

Beban maksimum: 4100 g

Ketelitian : 0,01 g



Gambar 3.18. Timbangan Digital

- *Testing manifold*

Testing manifold digunakan untuk mengatur aliran refrijeran yang akan masuk ke dalam sistem refrijerasi. Alat ini memiliki katup untuk mengatur debit fluida yang mengalir di dalamnya dan *pressure gauge* untuk membatasi tekanan refrijeran yang masuk.

Tipe : sama seperti *pressure gauge*

Range kerja : sama seperti *pressure gauge*



Gambar 3.19. *Testing Manifold*

- *Thermal Circulating Bath (CTB)*
CTB adalah alat yang berguna untuk mensirkulasi aliran air di dalam bak dengan temperatur yang dapat diatur-atur. CTB digunakan sebagai alat bantu dalam proses kalibrasi *thermocouple*.



Gambar 3.20. CTB

- Termometer air raksa

Termometer air raksa adalah alat ukur temperatur yang menggunakan air raksa sebagai penunjuk temperatur. Thermometer air raksa digunakan sebagai alat bantu dalam proses kalibrasi *thermocouple*.



Gambar 3.21. Termometer Air Raksa

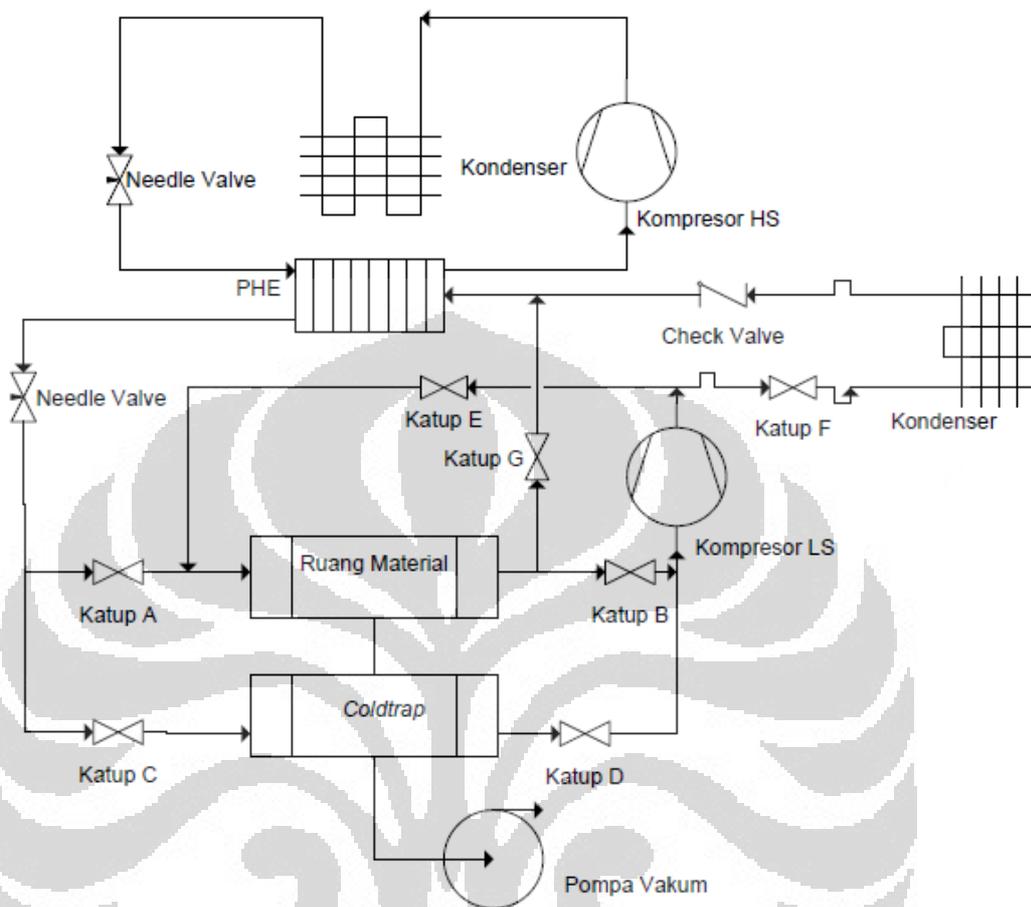
- Kalibrator *pressure*

Kalibrator *pressure* disini sebenarnya adalah *pressure transmitter* digital yang telah dikalibrasi oleh alat ukur nasional. Kegunaannya adalah untuk mengkalibrasi *pressure transmitter* untuk tekanan vakum.



Gambar 3.22. Kalibrator Pressure

3.3 Skematik Alat



Gambar 3.23. Skematik Alat Pengering Beku Vakum

Gambar 3.22 memperlihatkan skema dari mesin pengering beku vakum yang digunakan pada percobaan ini. Seperti yang telah disebutkan di atas, evaporator dari sistem refrijerasi dimanfaatkan sebagai ruangan material dan *coldtrap*. Kedua sistem tersebut kemudian disambungkan dengan sebuah pompa vakum. Pada ruangan material dipasang satu buah *pressure transmitter* untuk mengetahui tekanan di dalam ruang dan tiga *thermocouple*, satu untuk mengetahui temperatur ruang dan dua untuk mengetahui temperatur material. Sementara itu di ruang *coldtrap* terdapat satu *thermocouple* untuk mengetahui temperatur *coldtrap*. Selain itu, di titik-titik tertentu pada sistem refrijerasi juga akan dipasang *thermocouple* dan *pressure gauge* sebanyak delapan buah. Dengan demikian, terdapat 12 *thermocouple*, 8 *pressure gauge*, dan 1 *pressure transmitter* pada alat ini.

Tabel 3.1. Posisi *Thermocouple* dan *Pressure Gauge*

<i>Pressure gauge</i>	<i>Thermocouple</i>	Sistem	Setelah	Sebelum
1	1	Low Stage	<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	High Stage	<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>

Pada tahap pendinginan, jika ingin menggunakan pendinginan internal maka katup A, B, C, D, dan F dibuka, sementara katup E dan G ditutup. Katup A adalah katup *inlet* ruang material sementara katup B adalah katup outlet ruang material. Katup C adalah *inlet coldtrap* sementara katup D adalah *outlet coldtrap*. Katup F adalah katup antara kompresor HS dengan kondenser. Dengan demikian, refrijeran akan mengalir di sistem LS selayaknya sistem refrijerasi biasa yaitu mulai dari kompresor, PHE, *needle valve*, dan evaporator.

Pada tahap pengeringan, jika ingin menggunakan pemanasan dari panas buang condenser maka katup E, G, C, dan D dibuka, sementara katup A, B, dan F ditutup. Kedua katup tersebut menghubungkan aliran panas dari kompresor langsung menuju ruang material. Refrijeran panas yang baru keluar dari kompresor akan dimanfaatkan energinya saat proses pengeringan. Perlu diingat bahwa saat proses pengeringan dengan pemanasan katup A dan B harus tertutup penuh agar tidak terjadi bentrokan aliran refrijeran. *Check valve* berguna untuk memastikan aliran dari katup D tidak berbalik menuju kompresor lagi.

3.4 Persiapan Pengujian

3.4.1 Kalibrasi Alat Ukur

Kalibrasi adalah suatu proses membandingkan nilai yang didapat dari suatu alat ukur dengan alat ukur standar nasional maupun internasional dan kemudian menyetel alat ukur sehingga mendekati nilai yang ditunjukkan oleh alat

ukur standar. Kegiatan ini berdasarkan filosofi bahwa tidak ada alat ukur yang dapat menunjukkan nilai sebenarnya dari suatu besaran.

Kalibrasi Thermocouple

Tidak semua *thermocouple* yang digunakan pada alat ini membutuhkan kalibrasi karena pada dasarnya *thermocouple* yang dijual di pasaran dalam bentuk gulungan sudah dikalibrasi. *Thermocouple* yang perlu dikalibrasi adalah *thermocouple* yang telah mendapat perlakuan tambahan, seperti las- lasan. Las- lasan pada *thermocouple* dilakukan ketika *thermocouple* membutuhkan selongsong tambahan agar *thermocouple* dapat berdiri tegak lurus pada sebuah aliran di pipa. *Thermocouple* dikalibrasi dengan menggunakan termometer air raksa dan CTB. Sebenarnya penggunaan CTB saja sudah cukup, akan tetapi karena kurang presisinya CTB yang terdapat di Laboratorium Pendingin dan Tata Udara Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia maka diperlukan bantuan termometer air raksa. Langkah-langkah kalibrasi *thermocouple* adalah:

1. menyiapkan CTB, termometer air raksa, dan *thermocouple* yang akan dikalibrasi;
2. membuka *software* LabVIEW dan *Virtual Instrument* yang telah disiapkan;
3. menyambungkan *thermocouple* ke slot DAQ;
4. mengatur temperatur air di dalam CTB ke titik tertentu;
5. menggunakan termometer air raksa untuk mengukur temperatur air di dalam CTB;
6. menggunakan *thermocouple* untuk mengukur temperatur air di dalam CTB;
7. mencatat nilai- nilai yang terukur ke dalam tabel seperti yang diperlihatkan pada tabel 3.2;

Tabel 3.2. Tabel Bantu Kalibrasi *Thermocouple*

Temperatur kalibrator	Temperatur <i>thermocouple</i> 1	Temperatur <i>thermocouple</i> 2	Temperatur <i>thermocouple</i> n

8. mengulangi langkah 4 -7 dengan selisih pengaturan temperatur CTB yang konstan;

9. membuat grafik hubungan antara temperatur kalibrator dengan temperatur *thermocouple* dengan temperatur kalibrator sebagai sumbu Y dan temperatur *thermocouple* sebagai sumbu X; serta
10. memasukkan persamaan garis yang terbentuk ke *Block Diagram Virtual Instrument*.

Kalibrasi Pressure Transmitter

Pressure transmitter yang terdapat pada alat ini terletak di atas ruang material. *Pressure transmitter* ini digunakan untuk mengukur tekanan vakum di dalam ruang material dan *coldtrap*. *Pressure transmitter* dikalibrasi menggunakan kalibrator *pressure*. Langkah- langkah kalibrasi *pressure transmitter* adalah:

1. menyiapkan kalibrator *pressure*, pompa vakum, *needle valve*, dan *pressure transmitter* yang akan dikalibrasi;
2. menyambungkan kalibrator *pressure*, pompa vakum, *needle valve*, dan *pressure transmitter* dengan pipa tembaga sedemikian sehingga kalibrator dan *pressure transmitter* posisinya tegak lurus dengan lantai, dan *needle valve* menjadi perantara antara sistem kalibrasi dan pompa vakum;
3. membuka *software* LabVIEW dan *Virtual Instrument* yang telah disiapkan;
4. menyambungkan *pressure transmitter* ke *slot* DAQ;
5. memvakum pipa tembaga menggunakan pompa vakum;
6. mencatat nilai tekanan yang terbaca di kalibrator dan nilai arus yang terbaca di *pressure transmitter* ke dalam tabel seperti yang diperlihatkan pada tabel 3.3;

Tabel 3.3. Tabel Bantu Kalibrasi *Pressure Transmitter*

Tekanan kalibrator	Arus <i>pressure transmitter</i>

7. membuka *needle valve* sedikit sehingga tekanan naik beberapa mbar;
8. mengulangi langkah 6–7 dengan selisih bukaan *needle valve* yang konstan;
9. membuat grafik hubungan antara tekanan kalibrator dan arus *pressure transmitter* dengan tekanan kalibrator sebagai sumbu Y dan arus *pressure transmitter* sebagai sumbu X; serta

10. memasukkan persamaan garis yang terbentuk ke *Block Diagram Virtual Instrument*.

3.4.2 Pengisian Refrijeran

Refrijeran yang digunakan pada alat ini adalah R22 dan HCR22. Sistem HS diisi refrijeran R22 sebanyak 450 g, sementara sistem LS diisi refrijeran HCR22 sebanyak 250 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 sistem dengan pompa vakum dan tabung refrijeran menggunakan *testing manifold*. Tabung refrijeran diletakkan di atas timbangan digital;
2. menyalakan pompa vakum sehingga sistem dan selang *testing manifold* menjadi vakum;
3. menutup katup yang menghubungkan pompa dengan *testing manifold* dan kemudian mematikan pompa;
4. membuka katup tabung refrijeran, sehingga refrijeran akan mengalir menuju sistem karena adanya perbedaan tekanan; serta
5. menggunakan katup yang menghubungkan *testing manifold* dengan tabung refrijeran untuk mengatur jumlah refrijeran yang masuk.

3.4.3 Persiapan Benda Uji

Benda uji yang akan digunakan dalam pengujian ini adalah ubur-ubur (*Aurella Sp.*). 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*.



Gambar 3.24. Ubur-ubur yang Telah Diblender

3.5 Pengujian

3.5.1 Lokasi Pengujian

Pengujian mengambil tempat di Laboratorium Pendingin dan Tata Udara lantai tiga gedung Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.

3.5.2 Variasi Pengujian

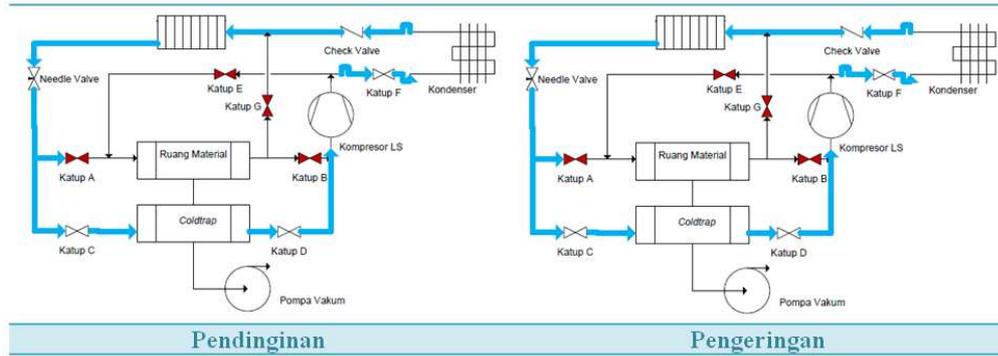
Dalam penelitian ini akan divariasikan dua hal, yaitu temperatur pendinginan internal dan temperatur pemanas dari panas buang kondenser. Pendinginan internal digunakan saat proses vacuum cooling, sementara pemanas dari panas buang kondenser digunakan saat proses pengeringan. Untuk mendapatkan variasi nilai temperatur, maka yang diatur adalah bukaan katup. Untuk mengatur temperatur pendingin, katup yang diatur adalah katup A sebagai *inlet* dan katup B sebagai *outlet*, sedangkan untuk mengatur temperatur pemanas, katup yang diatur adalah katup E sebagai *inlet* dan katup G sebagai *outlet*. Temperatur yang akan terpengaruh karena variasi ini adalah temperatur masukan evaporator untuk pendinginan internal dan temperatur keluaran kompresor LS untuk pemanasan. Perubahan temperatur ini akan berpengaruh kepada temperatur ruangan material.

Kondisi awal dari katup F adalah *normally open*, sementara kondisi awal dari katup E dan G adalah *normally closed*. Untuk katup A dan B dapat *normally open* ataupun *normally closed*.

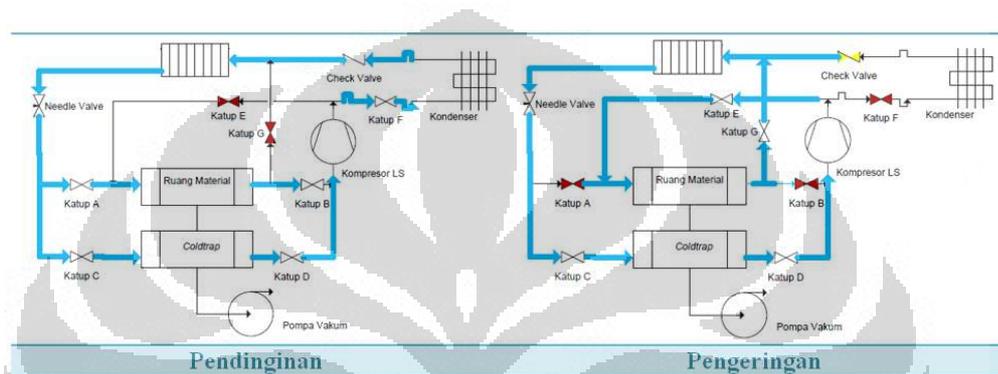
Tabel 3.4. Variasi Data Pengujian

No	Variasi	Fungsi	Bukaan Katup					Perlakuan Tambahan
			A	B	E	F	G	
1	Pendingin internal	Off	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	-
	Pemanas	Off	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	
2	Pendingin internal	On	<i>Fully open</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Pre-freezing</i>
	Pemanas	On	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	
3	Pendingin internal	On	<i>Half open</i>	<i>Half open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	-
	Pemanas	On	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Half open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Half open</i>	
4	Pendingin internal	Off	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	-
	Pemanas	On	<i>Fully closed</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	
5	Pendingin internal	On	<i>Fully open</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	-
	Pemanas	Off	<i>Fully open</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	<i>Fully open</i>	<i>Fully closed</i>	

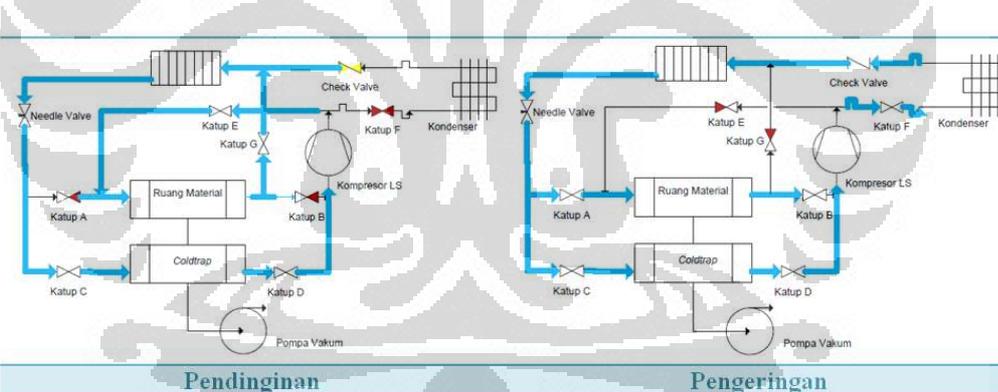
Agar lebih jelas, bukaan katup tiap variasi pengujian baik saat proses pendinginan maupun pengeringan dapat dilihat pada gambar 3.24 sampai gambar 3.28. Katup- katup yang diatur terletak di sistem LS sementara sistem HS dibiarkan terus menyala hingga akhir proses. Untuk mengetahui waktu transisi dimana proses pendinginan telah berakhir atau dimana proses pengeringan telah dimulai adalah dengan cara melihat grafik temperatur material *versus* waktu. Jika garis grafik telah stabil beberapa saat dan mulai naik, artinya proses pengeringan telah mulai dan proses pendinginan telah berakhir dan katup dapat dibuka atau ditutup ataupun dibiarkan sesuai dengan variasi pengujian.



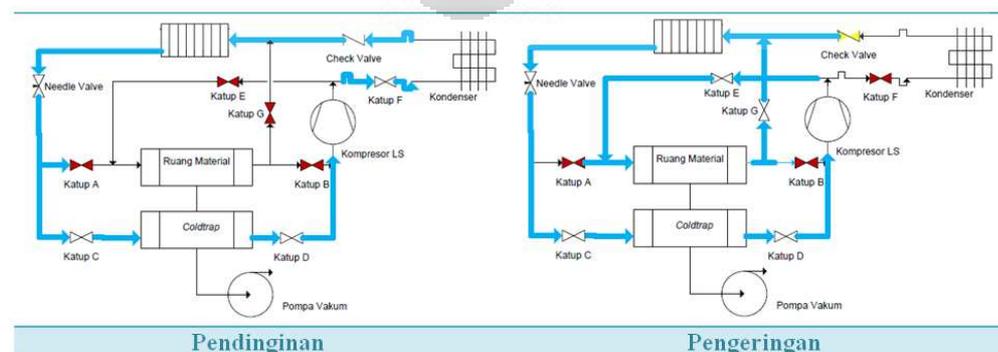
Gambar 3. 25. Variasi 1 (Tanpa Pendinginan Internal dan Pemanasan)



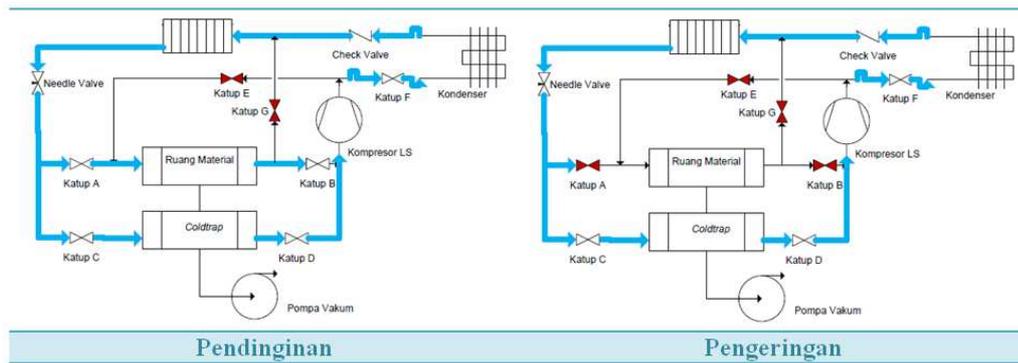
Gambar 3. 26. Variasi 2 (*Full* Pendinginan Internal dan Pemanasan)



Gambar 3. 27. Variasi 3 (Pendinginan Internal dan Pemanasan Setengah)



Gambar 3. 28. Variasi 4 (Tanpa Pendinginan Internal, *Full* Pemanas)



Gambar 3. 29. Variasi 5 (Full Pendinginan Internal, Tanpa Pemanasan)

3.5.3 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. memastikan bahwa tidak terdapat air di dalam *coldtrap*. Jika terdapat air, maka air tersebut dikuras terlebih dahulu;
5. menyalakan sistem HS hingga evaporatornya mencapai temperatur minimum;
6. menyalakan sistem LS;
7. mengatur *needle valve* kedua sistem hingga didapat temperatur evaporator LS yang paling rendah;
8. menunggu hingga sistem stabil;
9. menutup wadah material dengan kain kasa agar material tidak keluar dari wadah saat terjadi proses pendidihan karena tekanan yang rendah;
10. meletakkan benda uji ke dalam ruang material dan kemudian ditutup;
11. a) Prosedur dengan *pre-freezing*
 Katup A dan B dibuka hingga material mencapai temperatur yang paling rendah.
- b) Prosedur tanpa *pre-freezing*
 Langsung ke prosedur nomor 12.
12. menyalakan pompa vakum;
13. a) Prosedur tanpa pendinginan internal

Katup A dan B ditutup sehingga tidak ada refrijeran yang mengalir menuju ruang material.

b) Prosedur dengan pendinginan internal

Katup A dan B dibuka sehingga refrijeran mengalir menuju ruang pendingin.

c) Prosedur tanpa pemanasan

Jika pada proses pendinginan tidak digunakan pendinginan internal, maka proses cukup dibiarkan berjalan seperti biasa hingga material mengering. Sementara itu, jika pada proses pendinginan digunakan pendinginan internal, maka katup A ditutup dahulu hingga semua refrijeran yang sedang mengalir di ruang material habis. Setelah itu katup B ditutup sehingga tidak ada refrijeran yang dapat keluar ataupun masuk ke dalam ruang material. Setelah itu proses cukup dibiarkan berjalan seperti biasa hingga material mengering.

d) Prosedur dengan pemanasan

Jika pada proses pendinginan tidak digunakan pendinginan internal, maka katup F ditutup dan katup E dan G dibuka sehingga aliran refrijeran panas dari kompresor langsung mengalir menuju ruang material untuk dimanfaatkan dalam proses pengeringan. Sementara itu, jika pada proses pendinginan digunakan pendinginan internal, maka katup A ditutup dahulu hingga semua refrijeran yang sedang mengalir di ruang material habis. Setelah itu katup B ditutup sehingga tidak ada refrijeran yang dapat keluar ataupun masuk ke dalam ruang material. Kemudian katup F ditutup dan katup E dan G dibuka sehingga aliran refrijeran panas dari kompresor langsung mengalir menuju ruang material untuk dimanfaatkan dalam proses pengeringan.

14. jika temperatur akhir material sudah sama dengan temperatur lingkungan (ruang material), artinya proses pengeringan telah selesai dan sistem dapat dimatikan. Sebelum mematikan pompa vakum, pipa yang menghubungkan pompa dengan *coldtrap* dilepas terlebih dahulu agar oli pompa tidak terhisap ke dalam *coldtrap*.
15. Setelah proses pengeringan berakhir, maka dilakukan proses penimbangan produk akhir untuk menentukan jumlah kandungan air yang hilang.

BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

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

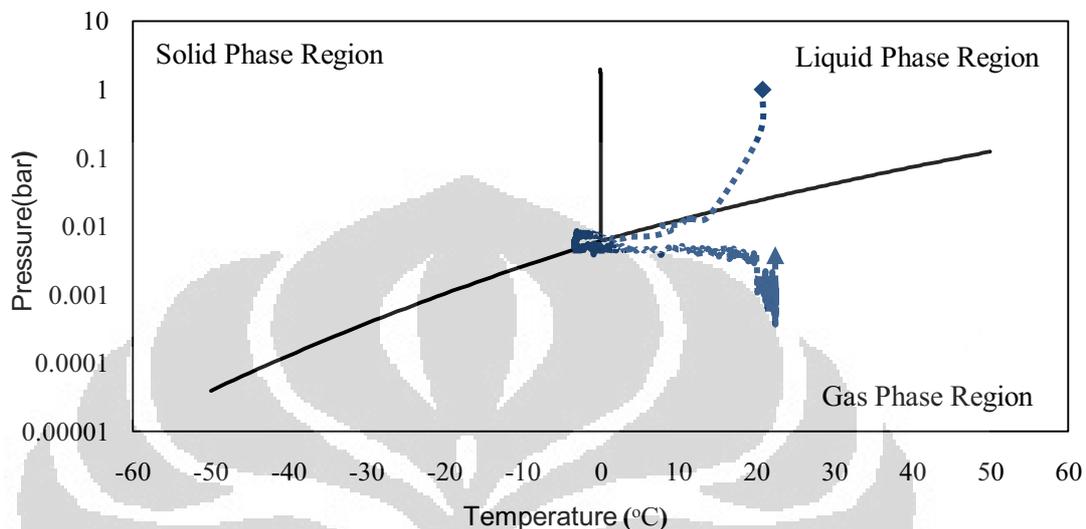
4.1.1 Perubahan Fase Material

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.

1. Variasi 1 (Tanpa Pendinginan Internal dan Pemanasan)

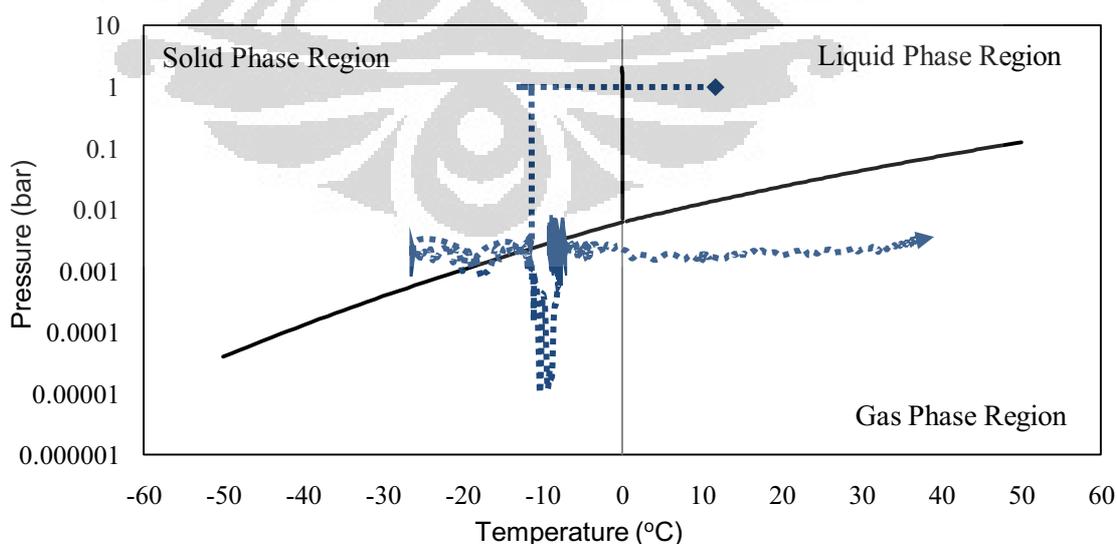
Pada pengujian variasi ini tidak ada pendinginan internal maupun pemanasan dari panas buang kondenser.



Gambar 4. 1. Diagram P vs T Variasi 1

2. Variasi 2 (*Pre-freezing*+ *Full* Pendinginan Internal dan Pemanasan)

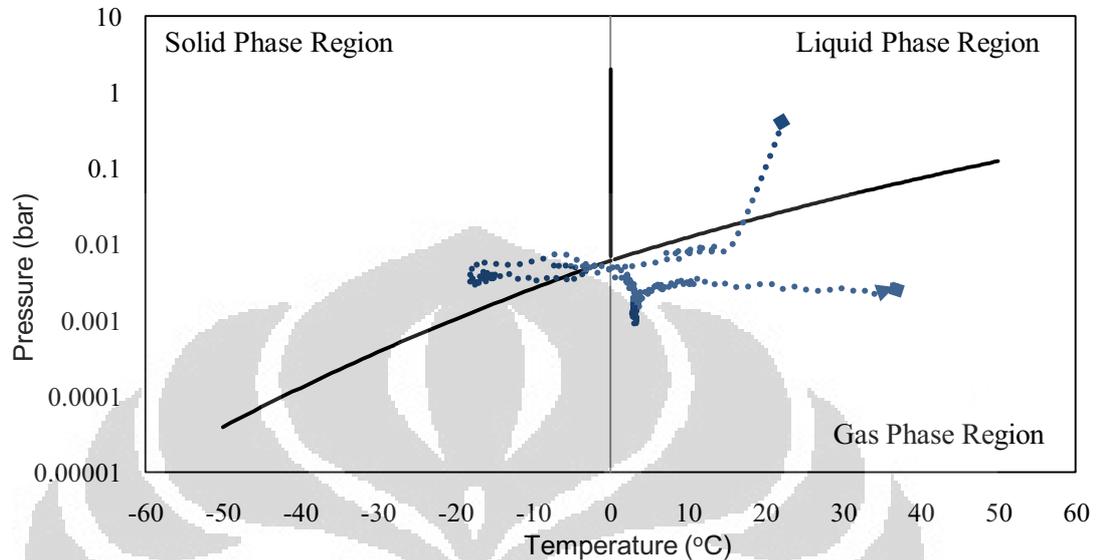
Pada pengujian ini dilakukan pendinginan internal dan pemanasan, \. Sebagai tambahan, pada variasi ini juga dilakukan proses *pre-freezing* untuk mendinginkan material hingga temperatur terendah terlebih dahulu sebelum ruang material divakum.



Gambar 4. 2. Diagram P vs T Variasi 2

3. Variasi 3 (Pendinginan Internal dan Pemanasan *Half Open*)

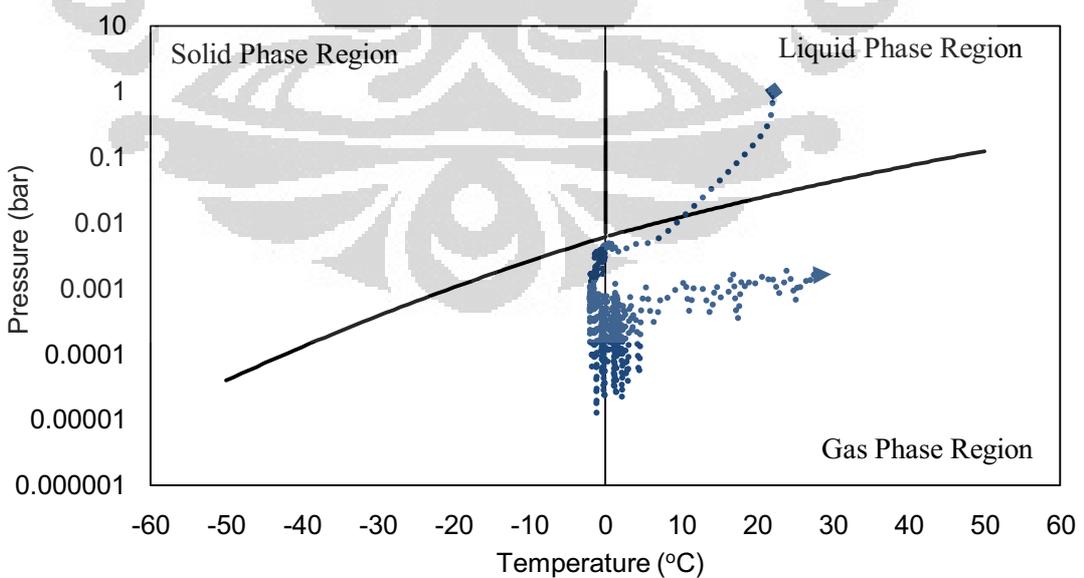
Pada pengujian ini dilakukan pendinginan internal dengan bukaan katup setengah dan pemanasan dengan bukaan katup setengah juga. Pada pengujian ini tidak dilakukan *pre-freezing*.



Gambar 4. 3. Diagram P vs T Variasi 3

4. Variasi 4 (Tanpa Pendinginan Internal, *Full* Pemanasan)

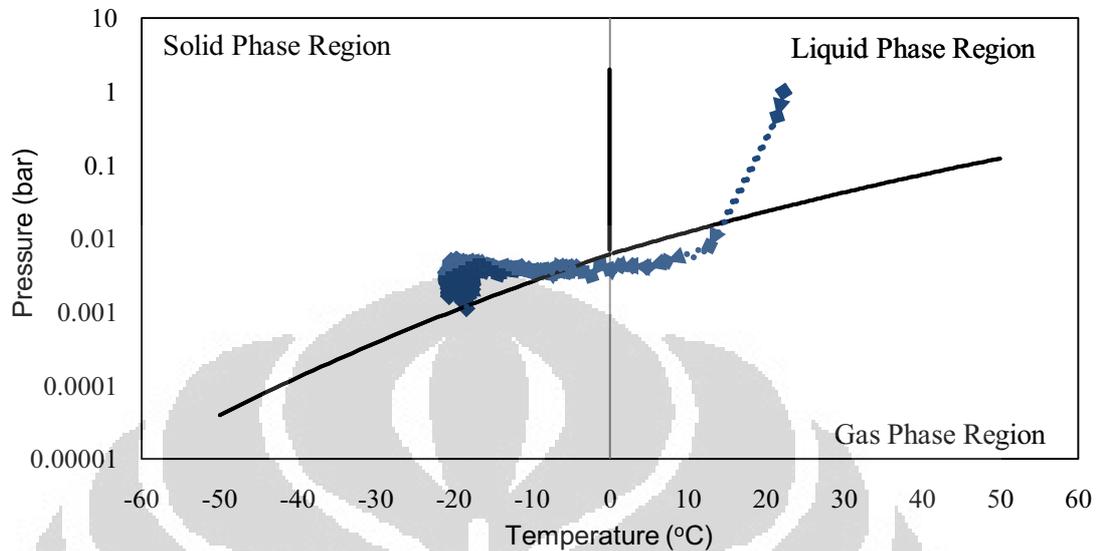
Pada pengujian variasi ini tidak ada pendinginan internal tetapi dilakukan pemanasan dengan bukaan katup penuh.



Gambar 4. 4. Diagram P vs T Variasi 4

5. Variasi 5 (*Full Pendinginan Internal, Tanpa Pemanasan*)

Pada pengujian variasi ini tidak ada pemanasan tetapi dilakukan pendinginan internal dengan bukaan katup penuh.



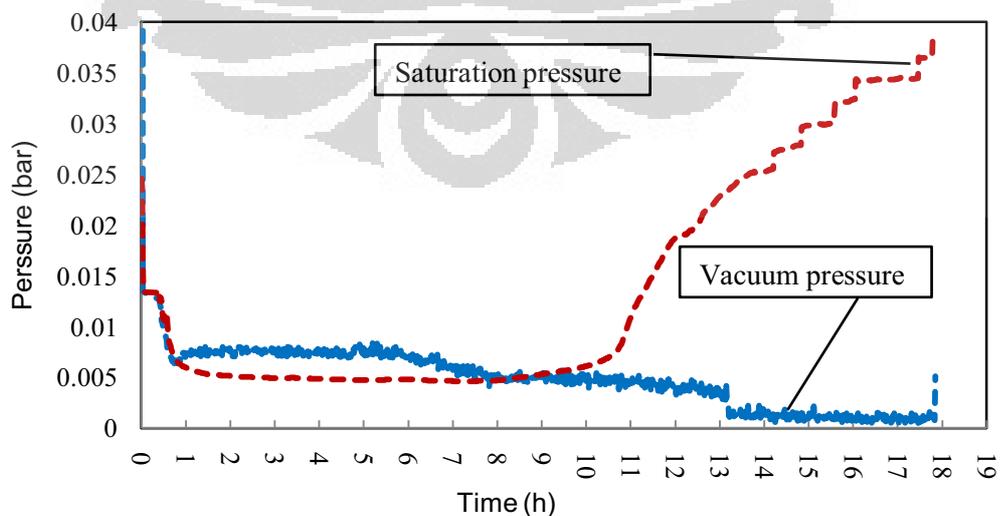
Gambar 4. 5. Diagram P vs T Variasi 5

4.1.2 Tekanan Saturasi Material

Pada proses pengeringan beku vakum, air dalam material dapat bersublimasi karena adanya perbedaan tekanan antara tekanan saturasi air di lapisan material dengan tekanan vakum di lingkungan.

1. Variasi 1 (*Tanpa Pendinginan Internal dan Pemanasan*)

Grafik tekanan saturasi air berbanding tekanan vakum variasi 1 dapat dilihat pada gambar 4.6.

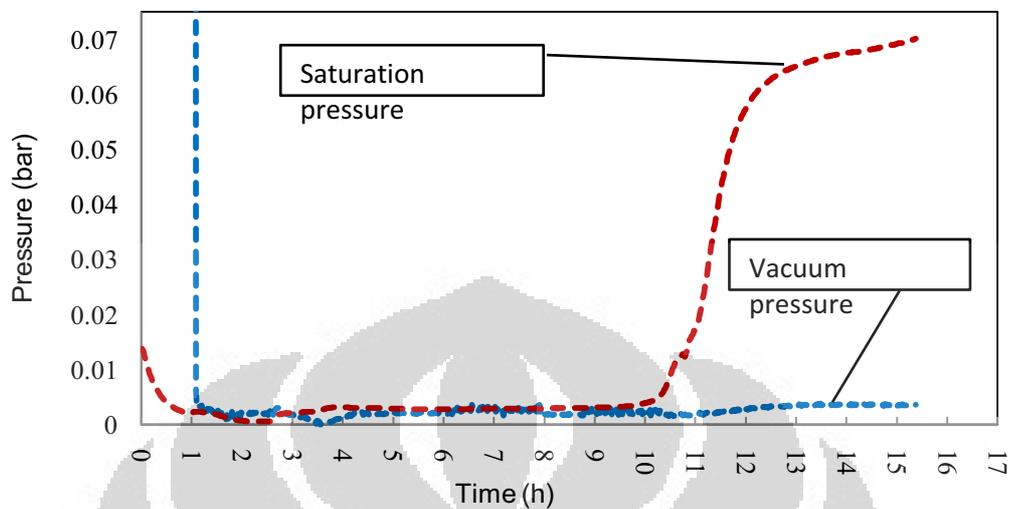


Gambar 4. 6. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 1

Universitas Indonesia

2. Variasi 2 (*Pre-freezing+ Full* Pendinginan Internal dan Pemanasan)

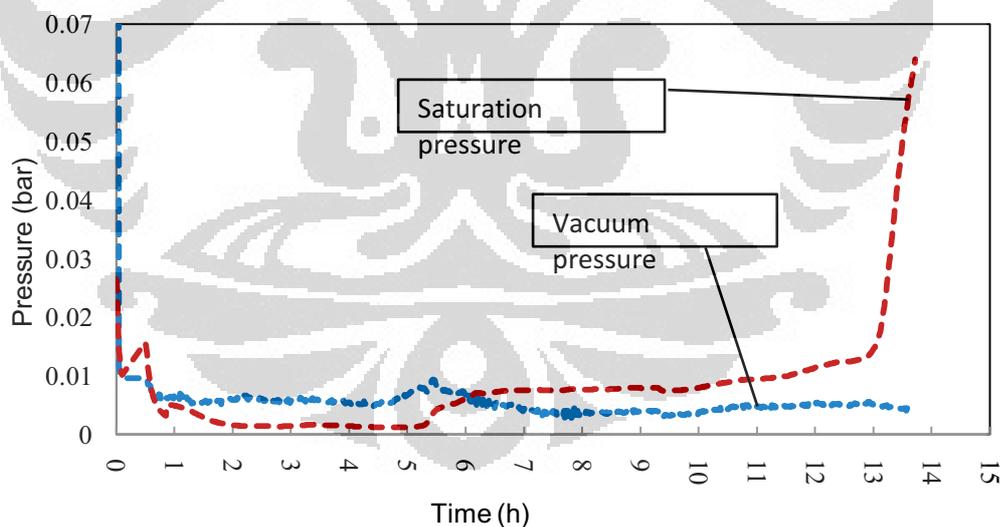
Grafik tekanan saturasi air berbanding tekanan vakum variasi 1 dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4. 7. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 2

3. Variasi 3 (Pendinginan Internal dan Pemanasan *Half Open*)

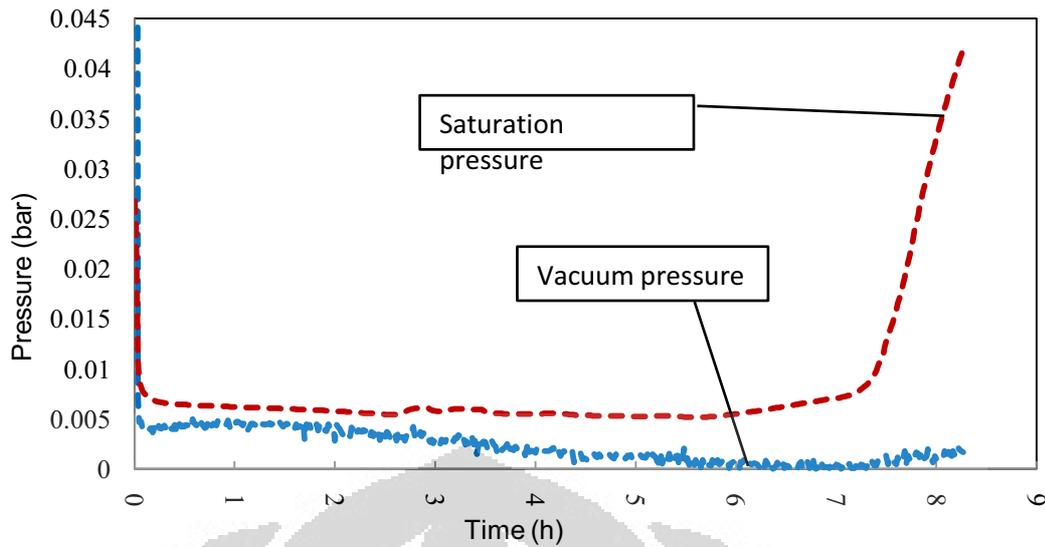
Grafik tekanan saturasi air berbanding tekanan vakum variasi 1 dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4. 8. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 3

4. Variasi 4 (Tanpa Pendinginan Internal, *Full* Pemanasan)

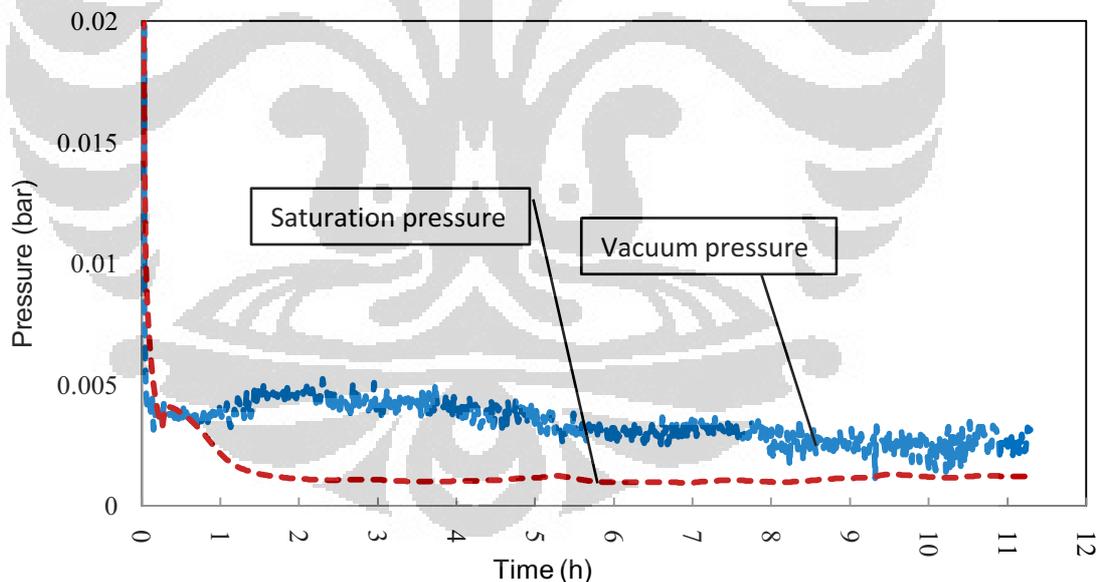
Grafik tekanan saturasi air berbanding tekanan vakum variasi 1 dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4. 9. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 4

5. Variasi 5 (*Full Pendinginan Internal, Tanpa Pemanasan*)

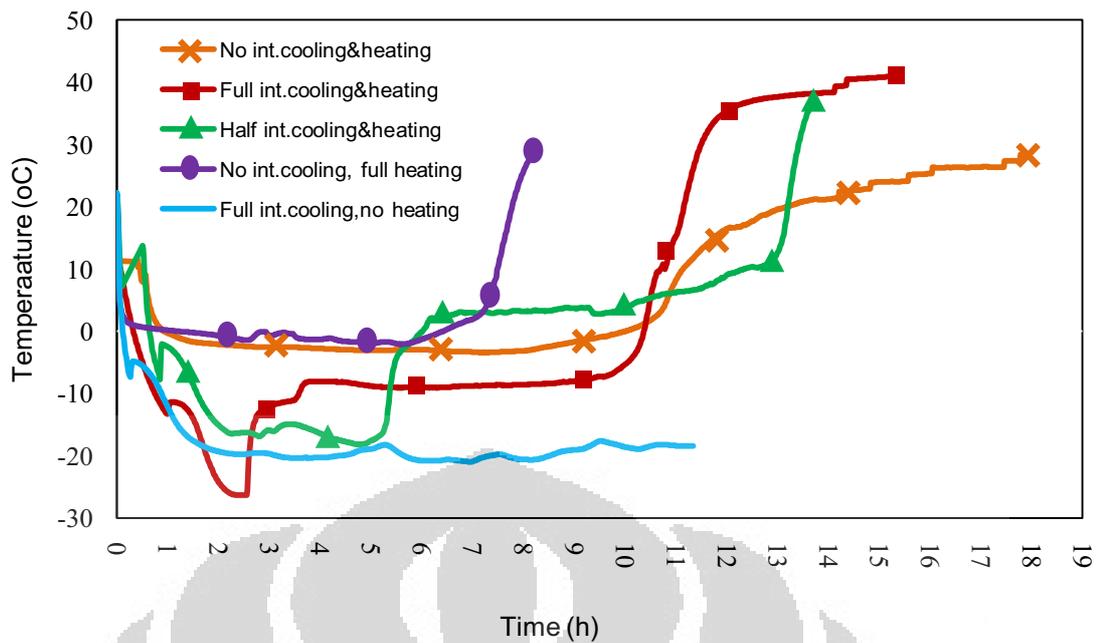
Grafik tekanan saturasi air berbanding tekanan vakum variasi 1 dapat dilihat pada gambar 4.10. Tekanan saturasi air lebih kecil dari tekanan vakum selama proses pengeringan sehingga tidak terjadi perpindahan massa.



Gambar 4. 10. P_{sat} vs P_{vakum} Variasi 5

4.1.3 *Temperature History* dari Material

Temperatur material dari awal hingga akhir pengujian dapat dilihat pada gambar 4.11. Jika temperatur material telah sama dengan temperatur lingkungan (ruang material), maka proses pengeringan telah berakhir.



Gambar 4. 11. *Temperature History* dari Material

Tiap- tiap pengujian memiliki waktu pengeringan yang berbeda- beda. Waktu total proses pengeringan untuk tiap variasi dapat dilihat pada tabel 4.1.

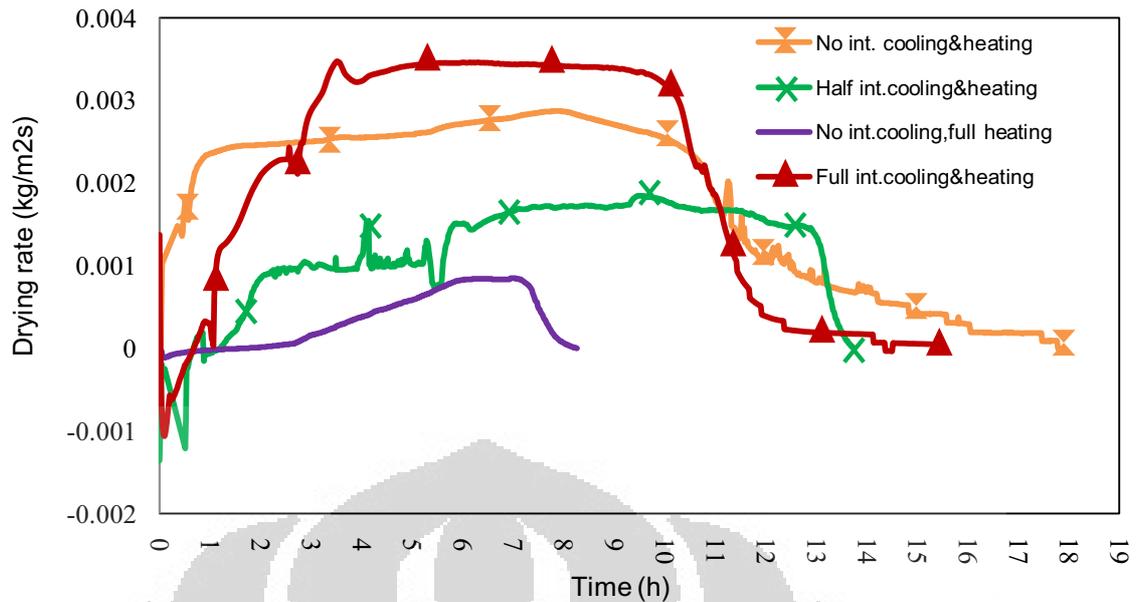
Tabel 4. 1. Waktu Pengeringan

Variasi	Waktu pengeringan (jam)
1	17.9
2	15.4
3	13.7
4	8.3
5	-

4.1.4 Laju Pengeringan Material

4.1.4.1 Laju Pengeringan Karena Konduksi

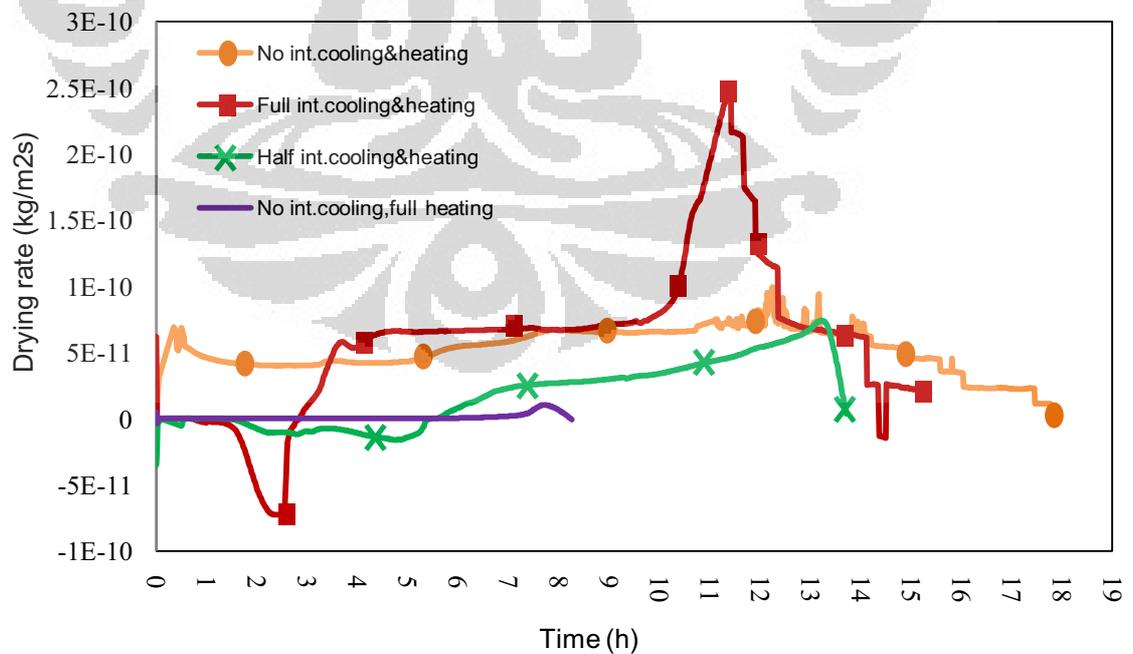
Laju pengeringan karena konduksi dihitung menggunakan rumus (2.4) dengan q dicari menggunakan rumus (2.2). Ketebalan material (L), konduktivitas thermal (λ), dan kalor laten sublimasi es (Δh) adalah 0,008 m, 2,24 $\frac{W}{mK}$, dan $2,83 \times 10^6 \frac{J}{kgK}$. Gambar 4.12 memperlihatkan laju pengeringan tiap- tiap variasi.



Gambar 4.12. Laju Pengeringan Material Karena Konduksi

4.1.4.2 Laju Pengeringan Karena Radiasi

Laju pengeringan karena konduksi dihitung menggunakan rumus (2.4) dengan q dicari menggunakan rumus (2.5). Ketebalan material (L), konstanta Boltzman (σ), dan emisivitas air (F) adalah $0,008\text{m}$, $\left(5,6484 \times 10^{-8} \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{s K}^4}\right)$, dan $0,95$. Gambar 4.13 memperlihatkan laju pengeringan tiap- tiap variasi.



Gambar 4.13. Laju Pengeringan Material Karena Radiasi

4.1.5 *Moisture Content* Akhir Material

Massa akhir dari material tiap variasi pengujian dapat dilihat pada tabel 4.2. Kandungan air pada ubur- ubur adalah 95,6 % dalam 50 g berat ubur- ubur (Uji kandungan air Pusat Penelitian Sumberdaya Hayati dan Bioteknologi IPB, Juni 2011), artinya material kering atau produk yang dihasilkan seharusnya mempunyai massa 2,2 gr.

Tabel 4. 2. Massa Material Kering yang Hilang

Variasi	Massa Awal (g)	Massa Akhir (g)	Massa yang Hilang (g)
1	50	0.780	1.42
2	50	1.730	0.47
3	50	1.660	0.54
4	50	0.550	1.65
5	50	-	-

4.2 Analisis

1. Analisis Perubahan Fase Material

Pada pengujian di beberapa variasi, dapat dilihat dari grafik *Pressure vs Temperature* bahwa material berevaporasi terlebih dahulu sebelum memasuki *solid region*. Hal ini disebabkan karena saat diturunkan tekanannya, air akan menyentuh garis evaporasi dan memasuki *gas region* untuk beberapa saat sebelum memasuki *solid region*. Hal ini merugikan karena material yang berevaporasi mengembang dan dapat terhisap pompa vakum.

Pada pengujian variasi 2 dilakukan proses *prefreezing* sebelum dilakukan proses pemvakuman. Hal ini menyebabkan material akan berubah fase menjadi padat terlebih dahulu seperti yang terlihat pada gambar 4.2. Setelah temperatur material stabil, maka dilakukan pemvakuman sehingga temperatur material turun lebih jauh lagi. Setelah temperatur tidak bisa turun lebih jauh lagi, barulah dilakukan pemanasan dengan panas buang kondenser. Hal ini menyebabkan tidak ada material yang sempat berevaporasi menjadi gas sebelum memasuki *solid region*.

Pada pengujian variasi 5 gambar 4.5 dapat dilihat bahwa material telah berada pada *solid region* namun tidak dapat menyentuh garis saturasi sehingga tidak ada

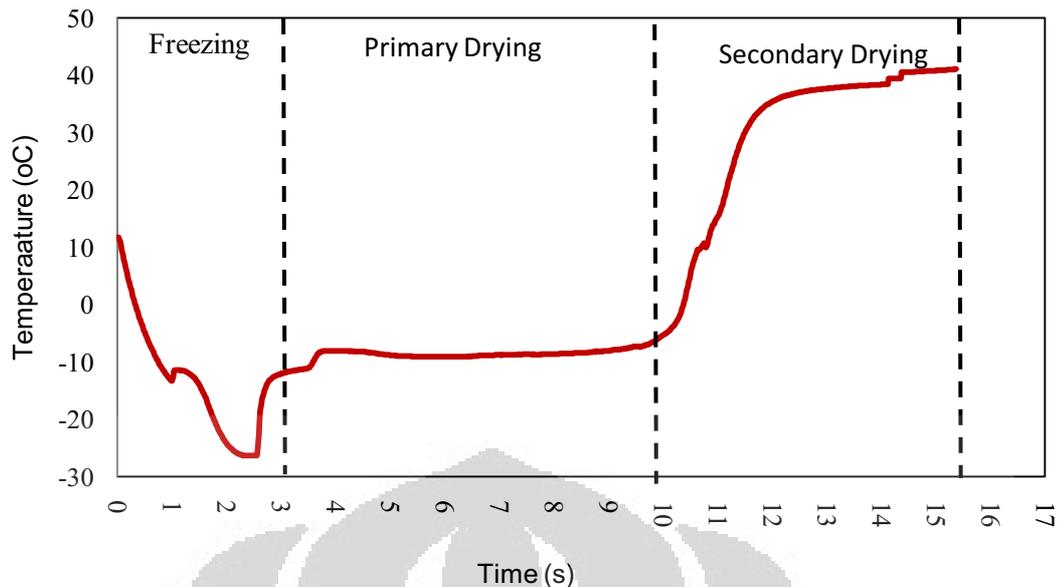
material yang bersublimasi. Hal ini dapat dijelaskan dengan analisis tekanan saturasi material.

2. Analisis Tekanan Saturasi Material

Untuk dapat terjadinya perpindahan massa, diperlukan beda tekanan antara lapisan material (tekanan saturasi air) dengan permukaan material (tekanan vakum). Pada grafik tekanan saturasi variasi 1 sampai variasi 4 dapat diketahui bahwa setelah selang waktu tertentu maka tekanan saturasi air akan lebih besar daripada tekanan vakum sehingga terjadi aliran massa dari lapisan material menuju lingkungan (pengeringan). Namun pada variasi 5 (grafik tekanan saturasi 4.10) dapat dilihat bahwa tekanan saturasi dari air di dalam lapisan material lebih rendah daripada tekanan vakum sehingga tidak terjadi perpindahan massa dari material ke lingkungan. Sebaliknya, akan terjadi perpindahan massa dari lingkungan menuju material. Namun hal ini dapat diabaikan karena pada saat pemvakuman, RH (*Relative Humidity*) di ruangan dapat dianggap nol sehingga tidak ada massa air yang mengalir menuju material. Setelah tekanan vakum menjadi lebih rendah daripada tekanan saturasi air, maka air di lapisan dalam material dapat berpindah ke lingkungan.

3. Analisis *Temperature History* Material

Temperature history pada gambar 4.11 pada umumnya memiliki bentuk kurva yang menyerupai bentuk kurva *temperature history* proses pengeringan beku vakum pada umumnya (gambar 2.3), yaitu terdapat zona *freezing*, *primary drying*, dan *secondary drying*. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.14 dengan pengujian variasi 2 sebagai pembanding. Beberapa variasi (variasi 2 dan 3) tidak memiliki batas yang jelas antara zona *freezing* dengan *primary drying*. Hal ini disebabkan karena variasi 2 dan variasi 3 dilakukan penambahan pendinginan menggunakan *internal cooling* sehingga temperatur material dapat lebih rendah daripada zona *primary drying*.



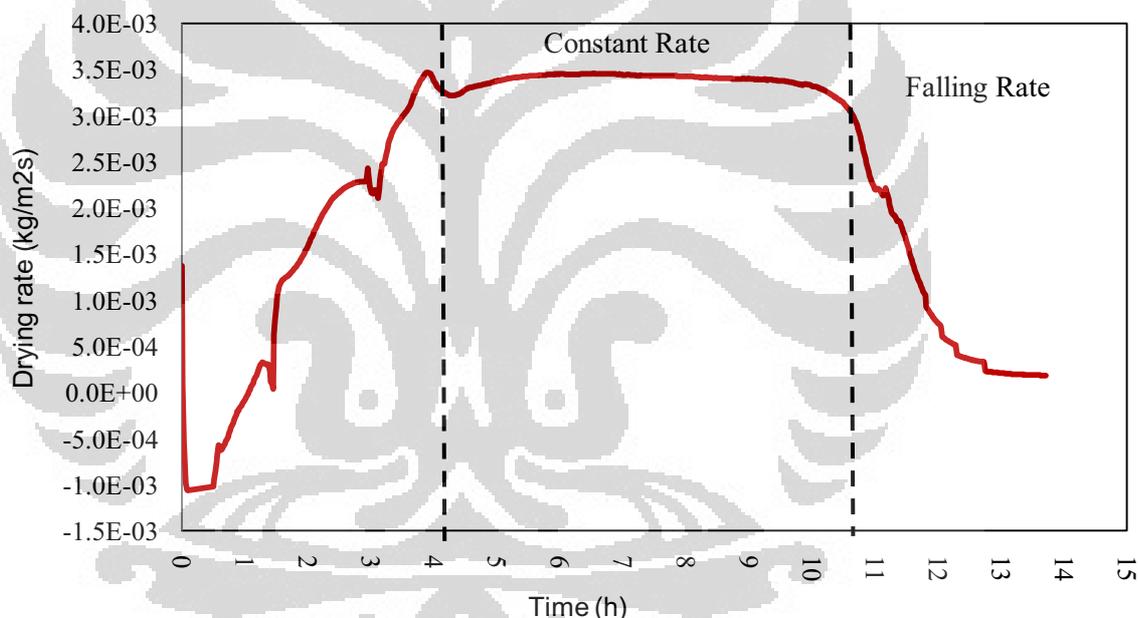
Gambar 4. 14. Pembagian zona pada grafik *temperature history*

Pada variasi 2, setelah material mencapai temperatur paling rendah pada tahap *freezing*, maka pemanasan langsung dinyalakan dan pendinginan dimatikan. Hal ini berbeda dengan variasi 3 dimana pada tahap pendinginan, temperatur material dibiarkan stabil dan pemanasan baru dinyalakan saat temperatur material akan naik dengan sendirinya. Hal ini menyebabkan zona *freezing* pada variasi 3 lebih lama daripada variasi 2. Hal ini juga dapat dilihat pada grafik tekanan saturasi variasi 2 (gambar 4.7) dan tekanan saturasi variasi 3 (gambar 4.8). Pada gambar 4.7, tekanan saturasi naik menjadi lebih tinggi daripada tekanan vakum lebih cepat daripada tekanan saturasi di gambar 4.8. Hal ini berarti sublimasi (*primary drying*) terjadi lebih dulu pada material variasi 2 daripada di material variasi 3. Temperatur akhir paling tinggi didapat pada pengujian variasi 2 ($\pm 41^{\circ}\text{C}$), kemudian variasi 3 ($\pm 37^{\circ}\text{C}$), diikuti variasi 4 ($\pm 30^{\circ}\text{C}$), dan terakhir variasi 1 ($\pm 28^{\circ}\text{C}$).

4. Analisis Laju Pengeringan Material

Laju pengeringan material konduksi pada gambar 4.12 dan 4.13 untuk semua variasi rata-rata mempunyai kurva yang menyerupai kurva proses pengeringan umum (gambar 2.1) dimana terdapat *constant rate* yaitu garis dimana laju pengeringan adalah stabil dan *falling rate* yaitu garis dimana laju pengeringan menurun. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.15 dengan pengujian variasi 2 sebagai pembanding.

Pada laju pengeringan material radiasi terdapat lonjakan nilai laju pengeringan di titik tertentu pada variasi 2, 3, dan 4. Lonjakan tersebut terjadi karena pada variasi tersebut dimanfaatkan pemanas untuk membantu proses pengeringan. Beda temperatur ruangan dengan material yang tinggi akan menyebabkan perpindahan kalor radiasi dan konduksi semakin tinggi pula. Semakin besar laju pengeringan maka semakin banyak material yang berpindah ke lingkungan. Namun tidak berarti bahwa semakin besar nilai laju pengeringan maka proses pengeringan akan semakin cepat. Pengujian dengan variasi 2 mempunyai laju pengeringan yang paling besar karena beda temperatur ruangan dengan material yang tinggi pula, disusul oleh variasi 1, 3, dan yang terakhir adalah pengujian variasi 4. Namun pengujian dengan variasi 4 justru mempunyai proses pengeringan yang paling cepat.



Gambar 4.15. Pembagian zona pada grafik laju pengeringan

5. Analisis *Moisture Content* Akhir Material dan Waktu Pengeringan

Pada tabel 4.2 dapat dilihat massa material kering lebih sedikit dari yang seharusnya. Ini dikarenakan banyaknya material kering yang hilang pada akhir proses pengeringan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal. Pertama adalah ada kemungkinan material yang akan dikeringkan hilang terhisap pompa vakum pada saat air dalam material tersebut mengalami evaporasi pada awal proses pemvakuman. Material yang berevaporasi tersebut akan mengeluarkan banyak buih dan volumenya membesar keluar dari wadah. Kedua adalah adanya

Universitas Indonesia

kemungkinan material yang telah kering tersebut melekat pada kain kasa yang digunakan untuk mencegah material meluap keluar lebih banyak pada saat proses pemvakuman. Ketiga adalah karena metode pengumpulan material kering dari wadah yang kurang bagus sehingga masih terdapat material kering yang tersisa di wadah. Selain itu dapat dilihat bahwa material kering hasil pengujian variasi 2 mempunyai massa lebih banyak daripada material kering hasil variasi lainnya. Hal ini dikarenakan pengujian variasi 2 dilakukan pre-freezing sehingga tidak terjadi evaporasi pada material.

Material yang telah kering tersebut mempunyai struktur secara visual yang hampir sama. Material yang telah kering dapat dilihat pada gambar 4.16. Sementara itu, pada pengujian dengan variasi 5 material tidak mengering karena tekanan saturasi yang terlalu rendah. Hasil pengujian variasi 5 dapat dilihat pada gambar 4.17.

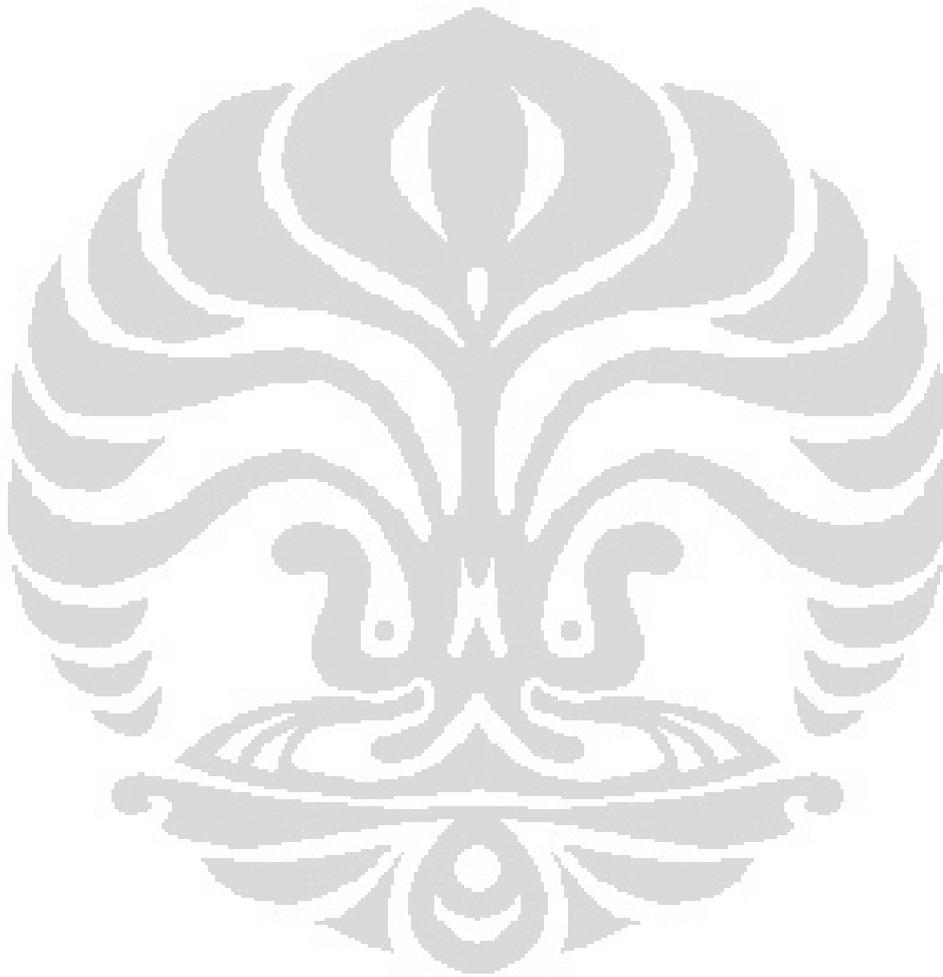


Gambar 4. 16. Material Kering Hasil Pengujian



Gambar 4. 17. Material Beku Hasil Pengujian Variasi 5

Dari kelima pengujian yang dilakukan, dapat dilihat pada tabel 4.1 bahwa pengujian dengan variasi 4 memiliki waktu pengeringan paling cepat, disusul oleh variasi 3, 2, dan yang paling lama adalah pengujian variasi 1.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

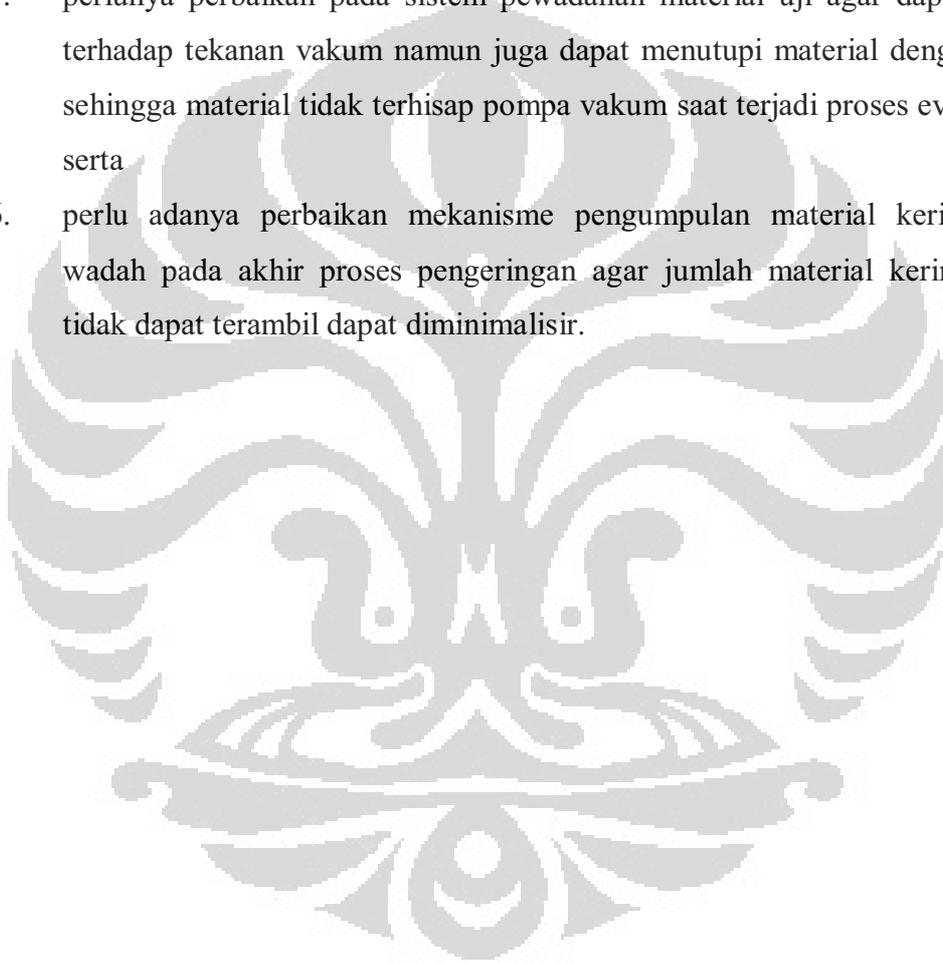
Setelah dilakukan analisis dari data yang diperoleh, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. proses pengeringan beku vakum dapat dimodelkan dalam batas kondisi konduksi dan batas kondisi radiasi;
2. *internal cooling* dimanfaatkan saat proses *pre-freezing* untuk mengatasi masalah material yang berevaporasi terlebih dahulu sebelum memasuki *solid region*;
3. laju pengeringan akibat perpindahan panas konduksi lebih berpengaruh dalam proses pengeringan beku vakum daripada laju pengeringan akibat perpindahan kalor radiasi;
4. pemanasan dengan pemanfaatan panas buang dari kondenser dapat menambah laju pengeringan material;
5. untuk dapat masuk ke proses pengeringan, tekanan saturasi material harus lebih tinggi dari tekanan vakum;
6. kurva temperatur material mempunyai tiga daerah, yaitu daerah *freezing*, daerah *primary drying*, dan daerah *secondary drying*;
7. kurva laju pengeringan material memiliki dua daerah utama, yaitu daerah *constant rate* dan daerah *falling rate*;
8. 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 kasa; dan
9. pengujian dengan waktu pengeringan paling cepat adalah pengujian variasi 4 (tanpa pendinginan, pemanas penuh).

5.2 Saran

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

1. perlunya dilakukan pengisolasian pipa tembaga di beberapa titik yang terjadi *icing*, terutama pada pipa yang menuju evaporator (*coldtrap* dan ruang material);
2. perlunya perbaikan mekanisme vakum pada alat agar dapat lebih rapat dan memudahkan saat meletakkan wadah material;
3. sebaiknya dilakukan pengkombinasian refrijeran yang digunakan agar temperatur yang diperoleh dapat lebih rendah;
4. perlu adanya mekanisme pengeringan *coldtrap* dari air sisa yang lebih baik;
5. perlunya perbaikan pada sistem pewadahan material uji agar dapat tahan terhadap tekanan vakum namun juga dapat menutupi material dengan baik sehingga material tidak terhisap pompa vakum saat terjadi proses evaporasi; serta
6. perlu adanya perbaikan mekanisme pengumpulan material kering dari wadah pada akhir proses pengeringan agar jumlah material kering yang tidak dapat diambil dapat diminimalisir.



DAFTAR REFERENSI

- 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.
- 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.
- Cooling Device. (n.d.). *Other refrigeration cycles*. 11 Juni 2011.
<http://coolingdevice.net/4.html>
- 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>
- Fernando L., Victorio. (2009). *Analisis laju pengeringan pada freeze vacuum drying*. Undergraduate thesis. Mechanical engineering, Universitas Indonesia: Depok.
- 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.
- 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.
- International Rice Research Institute. (2009). *The drying process*. 18 Juni 2011.
<http://www.knowledgebank.irri.org/rkb/index.php/drying-basics/the-drying-process>
- Liapis, Athanasios I. & Bruttini, Roberto. (2006). Freeze drying. In Arun S. Mujumdar (Ed.). *Handbook of Industrial Drying* (p. 257-281). London: Taylor & Francis Group.

- McDonald, Karl & Da-Wen Sun. (2000). Vacuum cooling technology for the food processing industry : a review. *Journal of Food Engineering* 45, p.55-56.
- Medical News Today (n.d.). *What is cancer? What causes cancer?.* 12 Mei 2011.
<http://www.medicalnewstoday.com/info/cancer-oncology/>
- Oetjen, Georg- Wilhelm & Haseley, Peter. (2004). *Freeze drying* (2nd ed.). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.
- Rahmat, Dede. (2010, May 31). *Jenis aliran panas.* 31 Mei 2011.
<http://dederahmat-ro.blogspot.com/2010/05/jenis-aliran-panas.html>
- Redford, Donni. (2007). *Pengujian sistem refrigerasi cascade menggunakan R22-R404A dengan variasi tekanan pada low- stage.* Undergraduate thesis. Mechanical Engineering, Universitas Indonesia: Depok.
- Rey, Louis. (2004). Glimpse Into the Realms of Freeze Drying : Fundamental Issues. In Louis Rey (Ed.). *Freeze Drying/ Lyophilization of Pharmaceutical and Biolitical Products* (2nd ed.) (p. 4-5). New York : Marcel Dekker Inc.
- Rui Wang, Min Zhang, & Mujumdar, Arun S. (2010). Effects of vacuum and microwave freeze drying on microstructure and quality of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 101, 133.
- SCTV (2011, April 2). *Indonesia harus waspadai kasus kanker.* 12 Mei 2011.
http://kesehatan.liputan6.com/read/318942/indonesia_harus_waspadaai_kasus_kanker
- The Engineering Toolbox. (n.d.). *Refrigerants-physical properties.* 12 Juni 2011.
http://www.engineeringtoolbox.com/refrigerants-d_902.html
- Xu Duan, Zhang M., Mujumdar, Arun S., Shaojin Wang. (2010). Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus Japonicus*). *Elsavier : Journal of Food Engineering*, 96, p. 491-497.