



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA PERUBAHAN TEMPERATUR DAN LAJU ALIRAN
MASSA REFRIJERAN SISTEM *CASCADE* PADA MESIN
PENGERINGAN BEKU VAKUM *COMPACT***

SKRIPSI

MUHAMMAD NOVEL HIDAYAT

0706267212

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

DEPOK

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA PERUBAHAN TEMPERATUR DAN LAJU ALIRAN
MASSA REFRIJERAN SISTEM *CASCADE* PADA MESIN
PENGERINGAN BEKU *VAKUM COMPACT***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

MUHAMMAD NOVEL HIDAYAT

0706267212

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Skripsi ini merupakan bagian dari skripsi yang dikerjakan bersama dengan rekan saya, saudara Rio Ricardi (0706267313) dengan judul **KARAKTERISTIK PENDINGINAN BEKU VAKUM DENGAN PEMANFAATAN PENDINGINAN INTERNAL DAN PANAS BUANG KONDENSER UNTUK PROSES SUBLIMASI**. Sehingga harap maklum jika ada beberapa bagian dari buku ini yang memiliki kesamaan.

Nama : Muhammad Novel Hidayat

NPM : 0706267212

Tanda Tangan :



Tanggal

: 27 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Muhammad Novel Hidayat
NPM : 0706267212
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisa Perubahan Temperatur dan Laju
Aliran Massa Refrijeran Sistem *Cascade*
Pada Mesin Beku Vakum *Compact*

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Muhamad Idrus Alhamid

()

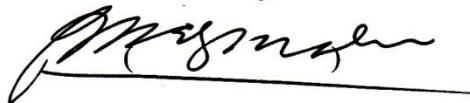
Penguji : Dr.-Ing. Nasruddin, M.Eng

()

Penguji : Dr. Ir. Budihardjo, Dipl, -Ing

()

Penguji : Ir. Rusdy Malin, M.Sc

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2011

KATA PENGANTAR

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

1. Dr. Ir. Muhamad Idrus Alhamid, atas segala waktu dan tenaga dalam memberikan bimbingan
2. Dr. –Ing, Ir. Nasruddin, M.Eng, atas segala waktu, tenaga dan kesabaran dalam membimbing dan mengarahkan
3. Pak Yulianto, atas segala bimbingannya yang luar biasa dari awal hingga akhir proses pengerjaan skripsi ini
4. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan doa dan dukungannya
5. Rio Ricardi sebagai teman satu tim yang solid
6. Rekan-rekan dan sahabat yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi

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

Depok, 27 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Muhammad Novel Hidayat
NPM : 0707267212
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 :

**ANALISA PERUBAHAN TEMPERATUR DAN LAJU ALIRAN MASSA
REFRIJERAN SISTEM *CASCADE* PADA MESIN PENDINGINAN BEKU
VAKUM *COMPACT***

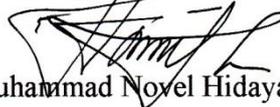
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada tanggal : 27 Juni 2011

Yang menyatakan



(Muhammad Novel Hidayat)

ABSTRACT

Name : Muhammad Novel Hidayat

Field of Study : Mechanical Engineering

Title : Analyze of Temperature Change and Flow Rate Refrigerant
Cascade System on Freeze Vacuum Drying Compact Machine

For reach of low refrigeration temperature is needed high difference pressure. High difference pressure cause increase compressor work. It is reduce efficiency of refrigeration system so need to use cascade refrigeration system. In freeze vacuum drying, is needed low refrigeration temperatur on evaporator which in function as cold trap. Freeze vacuum drying need energy for drying process by sublimation is 2870kJ/kg.s, by using heat loss condenser as heater can reduce drying time. Because of that, it is need to analyze of temperature change and flow rate refrijerant in this method to find out system efficiency and decrease energy consumption when drying process.

Key word : Cascade, low temperature, freeze vacuum drying, system efficiency.

ABSTRAK

Nama : Muhammad Novel Hidayat

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Analisa Perubahan Temperatur dan Laju Aliran Massa Refrijeran
Sistem *Cascade* Pada Mesin Beku Vakum *Compact*

Untuk mendapatkan temperatur pendinginan yang rendah diperlukan perbedaan tekanan yang tinggi. Perbedaan tekanan yang sangat tinggi mengakibatkan kerja kompresor semakin berat. Hal ini mengakibatkan turunnya efisiensi dari sistem refrijerasi sehingga perlu menggunakan sistem refrijerasi *cascade*. Pada pengeringan beku vakum diperlukan temperatur pendingin yang rendah pada evaporator yang berfungsi sebagai *cold trap*. Pengeringan beku vakum memerlukan energi untuk proses pengeringan dengan sublimasi sebesar 2870kJ/kg.s, dengan memanfaatkan panas buang kondenser sebagai pemanas dapat mengurangi waktu pengeringan. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisa perubahan temperatur dan massa aliran refrijeran pada metode ini agar dapat mengetahui efisiensi sistem dan mengurangi energi yang dikonsumsi selama proses pengeringan berlangsung.

Kata Kunci : Cascade, temperatur pendinginan rendah, pengeringan beku vakum, efisiensi sistem

DAFTAR ISI

	Hal
Judul	i
Halaman Pernyataan Orisinalitas	ii
Halaman Pengesahan	iii
Kata Pengantar	iv
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah untuk Kepentingan Akademis	v
Absract	vi
Abstrak	vii
Daftar Isi.....	viii
Daftar Simbol.....	xi
Daftar Gambar.....	xii
Daftar Tabel	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penulisan	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 DASAR TEORI	6
2.1 Sistem Refrijerasi	6
2.2 Refrijeran	8
2.3 Siklus Refrijerasi <i>Cascade</i>	9
2.4 Pengukuran Aliran Refrijeran	12
2.4.1 Orifis	12
2.4.2 Manometer Tabung U Diferensial	14

2.5 Pengeringan Beku Vakum.....	15
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	17
3.1 Garis Besar Pengujian	17
3.1.1 Parameter - parameter yang Ditentukan.....	18
3.1.2 <i>LabVIEW</i>	18
3.2 Komponen Mesin Pengering Beku Vakum Compact	19
3.2.1 Pompa Vakum	19
3.2.2 Ruang Material	21
3.2.3 Kompresor	22
3.2.4 <i>Plate Heat Exchanger</i>	22
3.2.5 <i>Needle Valve</i>	23
3.2.6 Kondenser	23
3.2.7 Evaporator	24
3.2.8 <i>Stop Valve</i>	25
3.2.9 <i>Check Valve</i>	25
3.2.10 Tempat Material	26
3.3 Alat Ukur.....	26
3.3.1 <i>Thermocouple</i>	27
3.3.2 <i>Pressure Gauge</i>	27
3.3.3 <i>Pressure Transmitter</i>	28
3.3.4 Orifis	29
3.3.5 Timbangan Digital	29
3.3.6 <i>National Instrument</i>	30
3.4 Diagram Alir Percobaan.....	32
3.5 Skematik Alat	33
3.6 Persiapan Pengujian	34
3.6.1 Pengisian Refrijeran	34
3.6.2 Persiapan Benda Uji	35
3.7 Pengujian	36
3.7.1 Lokasi Pengujian	36
3.7.2 Variasi Pengujian	36
3.7.3 Prosedur Pengambilan Data	39

BAB 4 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA	41
4.1 Pengolahan Data.....	42
4.1.1 Perubahan Temperatur	42
4.1.2 Laju Aliran Massa Refrijeran.....	45
4.1.3 Diagram p-h dan COP	49
4.2 Analisa	53
4.2.1 Analisa Grafik Perubahan Temperatur	53
4.2.2 Analisa Garfik Laju Aliran Massa	57
4.2.3 Analisa Diagram p-h dan COP.....	58
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	63

DAFTAR SIMBOL

\dot{m}	Laju aliran massa (kg/s)
h	Entalpi (kJ/kg)
COP	Coefisien of Performance
Q_E	Kalor yang diambil dari evaporator (W)
W_{LS}	Daya kompresor low stage cascade (W)
W_{HS}	Daya kompresor high stage cascade (W)
$W_{net,in}$	Total daya kompresor cascade (W)
Q	Debit aliran (m^3/s)
A	Luas penampang (m^2)
V	Laju aliran (m^2/s)
γ	Berat jenis (N/m^3)
p	Tekanan (Pa)
S	Entropi (kJ/kg K)
T	Temperatur ($^{\circ}C$)
η_{isent}	Efisiensi isentropik
η_m	Efisiensi mekanikal
RC	Rasio kompresi kompresor

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen Utama sistem Refrijerasi Kompresi Uap.....	7
Gambar 2.2 Sistem Refrijerasi <i>Cascade</i> Dua Tingkat	10
Gambar 2.3 Orifis.....	13
Gambar 2.4 Manometer Tabung U Diferensial.....	14
Gambar 2.5 Diagram fase air	15
Gambar 3.1 Mesin Pengering Beku Vakum <i>Compact</i>	17
Gambar 3.2 Tampilan Lab VIEW	19
Gambar 3.3 Pompa Vakum.....	20
Gambar 3.4 Pompa Vakum.....	21
Gambar 3.5 Ruang Material.....	21
Gambar 3.6 Kompresor	22
Gambar 3.7 <i>Plat Heat Exchanger</i>	23
Gambar 3.8 <i>Needle Valve</i>	23
Gambar 3.9 Kondenser dan <i>Fan</i>	24
Gambar 3.10 Evaporator	24
Gambar 3.11 <i>Stop Valve</i>	25
Gambar 3.12 <i>Check Valve</i>	25
Gambar 3.13 Tempat material.....	26
Gambar 3.14 <i>Thermocuopel</i> tipe K.....	27

Gambar 3.15 <i>Pressure Gauge</i>	28
Gambar 3.16 <i>Pressure Transmitter</i>	28
Gambar 3.17 Orifis	29
Gambar 3.18 Timbangan Digital	30
Gambar 3.19 Timbangan Digital	30
Gambar 3.20 National Instrument.....	31
Gambar 3.21 Diagram Alir Percobaan.....	32
Gambar 3.22 Skematik Alat Pengering Beku Vakum <i>Compact</i>	33
Gambar 3.23 Ubur – ubur yang Telah Diblender	35
Gambar 3.24 Skematik Alat Pengoperasian Keadaan Normal	37
Gambar 3.25 Skematik Alat Pengoperasian Keadaan Pendingin Internal.....	38
Gambar 3.26 Skematik Alat Pengoperasian Keadaan Pemanas	39
Gambar 4.1 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 1	43
Gambar 4.2 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 2	43
Gambar 4.3 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 3	44
Gambar 4.4 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 4	45
Gambar 4.4 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 5	45
Gambar 4.6 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 1.....	46
Gambar 4.7 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 2.....	47
Gambar 4.8 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 3.....	47
Gambar 4.9 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 4.....	48
Gambar 4.10 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 5.....	49

Gambar 4.11 Diagram p-h Variasi 1	49
Gambar 4.12 Diagram p-h Variasi 2	50
Gambar 4.13 Diagram p-h Variasi 3	51
Gambar 4.14 Diagram p-h Variasi 4	51
Gambar 4.15 Diagram p-h Variasi 5	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persamaan Energi Untuk Setiap Komponen	11
Tabel 2.2 Perhitungan <i>Thermodynamic State Point</i> Sistem <i>Cascade</i> dengan REFPROB	12
Tabel 3.1 Posisi <i>Thermocouple</i> dan <i>Pressure Gauge</i>	34
Tabel 3.2 Variasi Data Pengujian.....	37
Tabel 4.1 Nilai COP Setiap Variasi Pengeringan	52

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa teknologi alat pengkondisian udara atau yang biasa disebut refrijerasi berkembang sangat pesat. Sistem refrijerasi dapat digunakan hampir dalam semua aspek kehidupan. Contohnya, pemanfaatan sistem refrijerasi yaitu untuk mengatur temperatur pada suatu gedung atau ruangan perkantoran, atau dapat digunakan dalam industri sebagai salah satu penunjang proses produksi atau untuk menjaga kualitas produknya.

Dalam beberapa bidang industri seperti, pengawetan makanan, perminyakan, pengolahan bahan kimia, farmasi, dibutuhkan temperatur pendinginan yang rendah berkisar dari -30°C hingga -50°C . Bahkan dalam kegiatan biomedis dibutuhkan temperatur yang lebih rendah lagi hingga -80°C . Penggunaan sistem refrijerasi siklus tunggal hanya mampu mencapai pendinginan efektif sekitar -40°C , dan efisiensinya memburuk di bawah -35°C karena turunnya tekanan evaporasi. Sehingga, untuk dapat menjangkau temperatur yang lebih rendah, digunakan sistem refrijerasi dengan menggunakan lebih dari satu kompresor seperti yang terdapat pada sistem refrijerasi bertingkat, atau kombinasi dua atau lebih sistem refrijerasi tunggal yang biasa disebut sistem refrijerasi *cascade*. Sistem refrijerasi *cascade* terdiri atas satu sistem sebagai *high stage* (HS) dan sistem lainnya lainnya sebagai *low stage* (LS). Dua sistem refrijerasi ini dihubungkan alat penukar kalor yang menghubungkan evaporator sistem *high stage* dan kondenser sistem *low stage*. Pada alat penukar kalor, panas yang dilepaskan kondenser di sistem *low stage* diserap evaporator dari sistem *high stage*.

Salah satu aplikasi yang membutuhkan temperatur pendinginan yang rendah adalah mesin pengering beku. Mesin pengering beku vakum dapat digunakan untuk proses ekstraksi. Ekstraksi adalah sebuah proses termal yang dilakukan untuk memindahkan sejumlah air dalam material ke lingkungan. Proses ekstraksi

menggunakan mesin pengering beku dapat mencegah zat - zat yang terkandung dalam material ikut ter evaporasi.

Mesin pengeringan beku vakum adalah sebuah metode pengeringan yang dapat mempertahankan nutrisi atau kandungan gizi, warna, rasa dan struktur biologi. Namun, mesin pengeringan beku mempunyai kendala dalam hal konsumsi energinya, hal ini dikarenakan tiga proses yang terjadi pada pengeringan beku vakum yaitu proses pembekuan, proses pengeringan atau sublimasi, proses penangkapan uap sebelum masuk pompa vakum. Energi untuk proses pembekuan yang berkaitan dengan penggunaan pompa vakum sebesar 69.758 kJ/kg.s atau sekitar 19.7 kW/h, energi untuk proses sublimasi sebesar 2870kJ/kg.s atau sekitar 2.5 kW/h, dan sisanya adalah penggunaan energi untuk cold trap sebagai penangkap uap yang menggunakan sistem refrijerasi.

Pada freeze vacuum drying ini inovasi yang dilakukan adalah dengan mengkombinasikan pompa vakum dan sistem refrijerasi untuk menurunkan tekanan dan temperatur material di dalam ruangan pengering. Pada saat proses pembekuan, maka diruangan pengeringan akan diturunkan temperaturnya oleh sistem refrijerasi dimana hal ini juga akan menurunkan tekanan ruangan sesuai dengan hukum gas ideal $PV = RT$, temperatur (T) mempengaruhi tekanan sebuah ruangan (P) pada kondisi volum dan konstanta gas konstan. Hal ini akan mempercepat proses pembekuan dan akan menurunkan penggunaan energi. Selain itu, inovasi juga dilakukan pada proses sublimasi / pengeringan yaitu dengan memanfaatkan panas buang kondensor yang seharusnya dibuang kelingkuangan dari sistem refrijerasi dimanfaatkan sebagai media pemanas untuk mempercepat waktu pengeringan. Dengan sistem inovasi tersebut maka konsumsi penggunaan energi pada mesin pengeringan beku dapat ditekan.

1.2 Perumusan Masalah

Perlu adanya pembuktian dan analisa tentang karakteristik perubahan temperatur dan laju aliran massa yang terjadi pada proses pengeringan beku vakum (*freeze vacuum drying*) akibat adanya perubahan beban pada *cold trap* sebagai efek dari pengeringan.

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisa perubahan temperatur pada sistem sistem refrijerasi dalam proses mengeringkan ubur – ubur.
2. Menganalisa laju aliran massa yang terjadi selama proses pengeringan ubur – ubur berlangsung.
3. Menganalisa efisiensi sistem refrigrasi selama proses pengeringan ubur – ubur berlangsung.

1.4 Batasan Masalah

Pembahasan mengenai analisis sistem refrijerasi mesin pengering beku vakum dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membahas tentang perubahan temperatur pada evaporator, *plate heat exchanger*, dan kondenser mesin pengering beku vakum dari segi data hasil pengujian.
2. Membahas tentang laju aliran refrijerant yang mengalir pada *plate heat exchanger* selama proses pengeringan dari segi data hasil pengujian.
3. Membahas tentang efisiensi sistem refrigrasi setelah sistem refrijerasi dalam keadaan *steady*.

1.5 Metode Penulisan

Metode yang dilakukan dalam penulisan tugas akhir ini adalah dengan melakukan studi literatur, perancangan alat dan melakukan percobaan.

1. Studi literatur

Literatur yang digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini adalah buku, jurnal, disertasi dan melalui *internet*. Literatur-literatur tersebut menjadi acuan dalam proses perancangan dan pengujian alat serta dasar dalam melakukan analisa dan perhitungan data yang akan dilakukan.

2. Desain sistem baru

Langkah yang dilakukan berupa rancang bangun mesin pengering beku vakum untuk proses pengeringan ubur - ubur yang efisien. Langkah yang dilakukan adalah merancang *vacuum chamber* sebagai tempat proses pengeringan, *evaporator* untuk menyerap uap air, sistem pendingin dan rangkaian *thermocouple*, *pressure gauge* serta *pressure transmitter*.

3. Pengujian alat

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data berupa tekanan, temperatur dan hubungannya dengan eksergi mesin beku vakum. Hasil pendataan yang didapat kemudian dianalisa sedemikian rupa sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang dibuat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang dan tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

BAB 2 LANDASAN TEORI

Pada bab ini disampaikan teori-teori yang menjelaskan tentang proses pengeringan beku vakum, evaporator, sistem pendingin dan pengukuran laju aliran refrijerant yang menjadi dasar dalam perancangan dan pengujian alat, serta dasar dalam melakukan analisa dan perhitungan data.

BAB 3 METODELOGI PENELITIAN

Bab Menjelaskan mengenai rangkain alat, skema alat, prosedur pengujian, hasil pengujian, dan bagan alur pengujian.

BAB 4 DATA DAN ANALISA

Bab ini membahas mengenai mengolah dan menganalisa data yang telah diperoleh pada saat percobaan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini mengutarakan kesimpulan dan saran yang didapat setelah melakukan percobaan.

LAMPIRAN

Berisikan data pengujian dan pengolahan, tabel dan grafik pendukung.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Sistem Refrijerasi

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

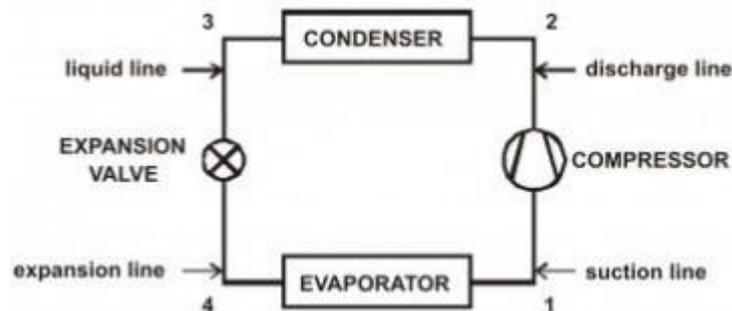
Untuk mempertahankan temperatur pada suatu ruangan, penyerapan kalor oleh suatu sistem refrijerasi harus dilakukan secara terus menerus kemudian dilepaskan keluar sistem. Hal ini dapat dilakukan dengan melalui beberapa proses yang disebut dengan siklus refrijerasi. Karena proses penyerapan dan pemindahan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

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

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

pelepasan kalor, temperatur dari refrijeran menurun dan menyebabkan perubahan fase dari uap menjadi cair kembali.

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



Gambar 2.1 Komponen Utama Sistem Refrijerasi Kompresi Uap

Sumber : <http://teachintegration.wordpress.com>

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

1. Evaporator

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

2. Kompresor

Kompresor merupakan salah satu komponen penting dalam sistem refrijerasi. Fungsi dari kompresor adalah untuk menaikkan tekanan dan temperatur refrijeran dari tekanan dan temperatur rendah menjadi tekanan dan

temperatur tinggi, refrijeran dalam fase uap dikompresikan pada alat ini. Dengan adanya kompresi ini, maka terjadi perbedaan tekanan antara sisi keluar (*discharge*) dengan sisi masuk (*suction*) yang menyebabkan refrijeran dapat mengalir dalam sistem refrijerasi. Tingkat suhu yang harus dicapai tergantung pada jenis refrijeran dan suhu lingkungannya.

3. Kondenser

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

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

4. *Expansion Device*

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

- a. Untuk menakar refrijeran cair dari saluran liquid line ke evaporator pada jumlah yang tepat sesuai kapasitas evaporator
- b. Untuk menjaga perbedaan tekanan antara tekanan kondensasi dan tekanan evaporasi tetap konstan, agar refrijeran cair yang diuapkan

di evaporator selalu berada pada tekanan rendah sesuai yang diinginkan dan sekaligus menjaga tekanan tinggi di sisi kondenser.

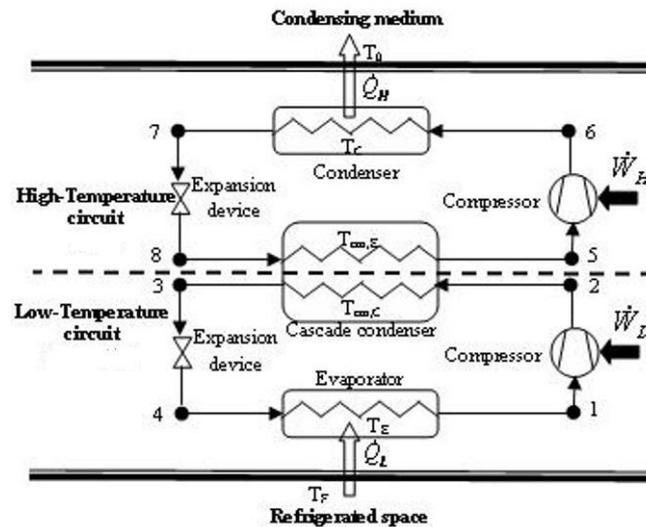
2.2 Refrijeran

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

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

2.3 Siklus Refrijerasi *Cascade*

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



Gambar 2.2 Sistem Refrijerasi *Cascade* Dua Tingkat

Sumber : M. Idrus Alhamid, Darwin R. B. Syaka, and Nasruddin. (2010). *Exergy and Energy Analysis of a Cascade System Using R744+R170 for Low Temperature Applications*, International Journal of Mechanical & Mechatronic Engineering IJMME – IJENS Vol: 10 No: 06

Pada gambar 2.2. di atas, dua siklus refrijerasi 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/LS*).

Pada prinsipnya, efek refrijerasi yang dihasilkan oleh evaporator HS dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dilepas oleh kondenser LS sehingga dapat dihasilkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator LS.

Rasio mass flow rate untuk setiap siklus adalah

$$\dot{m}_H / \dot{m}_L = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8}$$

$$\eta_{\text{isent}} = 1 - 0.04.RC$$

COP untuk siklus *cascade* adalah

$$COP_H = \frac{\dot{Q}_{Cas,E}}{\dot{W}_H}$$

$$COP_L = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_L}$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_H + \dot{W}_L}$$

Tabel 2.1 Persamaan Energi untuk Setiap Komponen

Component	Mass	Energy
High-temperature circuit		
Compressor	$\dot{m}_6 = \dot{m}_5$	$\dot{W}_H = \frac{\dot{m}_5(h_{6s} - h_5)}{\eta_{m,H}}$
Condenser	$\dot{m}_7 = \dot{m}_6$	$\dot{Q}_C = \dot{m}_7(h_7 - h_6)$
Expansion device	$\dot{m}_8 = \dot{m}_7$	$h_8 = h_7$
Cascade condenser	$\dot{m}_5 = \dot{m}_8, \dot{m}_3 = \dot{m}_2$	$\dot{Q}_{cas} = \dot{m}_5(h_5 - h_8) = \dot{m}_3(h_3 - h_2)$
Low-temperature circuit		
Compressor	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$	$\dot{W}_L = \frac{\dot{m}_1(h_{2s} - h_1)}{\eta_{m,L}}$
Expansion device	$\dot{m}_4 = \dot{m}_3$	$h_4 = h_3$
evaporator	$\dot{m}_1 = \dot{m}_4$	$\dot{Q}_E = \dot{m}_1(h_1 - h_4)$

Sumber : M. Idrus Alhamid, Darwin R. B. Syaka, and Nasruddin. (2010). *Exergy and Energy Analysis of a Cascade System Using R744+R170 for Low Temperature Applications*, International Journal of Mechanical & Mechatronic Engineering IJMME – IJENS Vol: 10 No: 06 ”telah diolah kembali”

Tabel 2.2 Perhitungan *Thermodynamic State Points* Sistem *Cascade* dengan REFPROP

Evaporator outlet	Compressor outlet	Condenser outlet	Expansion device outlet
High-temperature circuit			
$P_5 = f(T_{cas,E}, x=1)$	$P_6 = P_7$	$P_7 = f(T_C, x=0)$	$P_8 = P_5$
$T_5 = T_{cas,E}$	$T_6 = f(P_6, S_5)$	$T_7 = T_C$	$T_8 = T_{cas,E}$
$h_5 = f(T_5, P_5)$	$h_{6s} = f(P_6, S_5)$	$h_7 = f(T_7, P_7)$	$h_8 = h_7$
$S_5 = f(T_5, P_5)$	$h_6 = (h_{6s} - h_5)/\eta_{isent} + h_5$	$S_7 = f(T_7, P_7)$	$S_8 = f(P_5, h_8)$
Low-temperature circuit			
$P_1 = f(T_E, x=1)$	$P_2 = P_3$	$P_3 = f(T_{cas,C}, x=0)$	$P_4 = P_4$
$T_1 = T_E$	$T_2 = f(P_2, S_1)$	$T_3 = T_5 - DT = T_{cas,C}$	$T_4 = T_E$
$h_1 = f(T_1, P_1)$	$h_{2s} = f(P_2, S_1)$	$h_3 = f(T_3, P_3)$	$h_4 = h_3$
$S_1 = f(T_1, P_1)$	$h_2 = (h_{2s} - h_1)/\eta_{isent} + h_1$	$S_3 = f(T_3, P_3)$	$S_4 = f(P_1, h_4)$

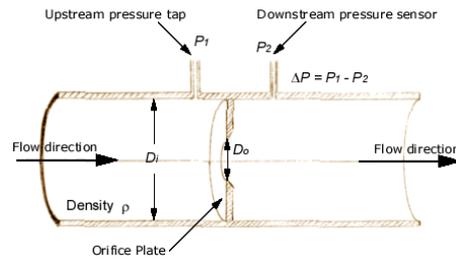
Sumber : M. Idrus Alhamid, Darwin R. B. Syaka, and Nasruddin. (2010). *Exergy and Energy Analysis of a Cascade System Using R744+R170 for Low Temperature Applications*, International Journal of Mechanical & Mechatronic Engineering IJMME – IJENS Vol: 10 No: 06

2.4 Pengukuran Aliran Refrijeran

Untuk mengukur jumlah refrijerant yang mengalir dalam sistem *cascade* digunakan alat tambahan berupa orifis yang ditambah dengan manometer tabung U diferensial.

2.4.1 Orifis

Orifis merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan dengan prinsip peningkatan kecepatan menyebabkan penurunan tekanan.



Gambar 2.3 Orifis

Sumber : <http://www.efunda.com>

Jika mengasumsikan profil kecepatan uniform pada potongan 1 dan potongan 2 persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

dimana A_2 adalah luas aliran kecil ($A_2 < A_1$) pada potongan 2. Kombinasi dari persamaan ini menghasilkan laju aliran teoritis sebagai berikut

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}}$$

nilai Q yang didapat dari persamaan diatas adalah nilai ideal, perlu diketahui nilai koefisien buang (discharge coefficient) untuk mengetahui nilai Q_{nyata} . Nilai C didapat dari

$$\frac{Q_{nyata}}{Q_{ideal}} = C$$

Perhitungan laju aliran orifis dapat dilakukan dengan menggunakan konstanta empirik yang didefinisikan sebagai berikut

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

$$K = \text{koefisien aliran} = CM$$

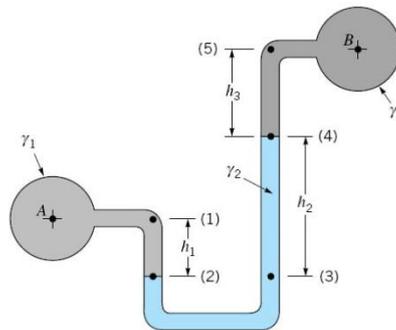
$$\beta = \text{rasio diameter} = \frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$$

untuk mendapatkan nilai Q_{nyata} pada orifis untuk aliran tak mampu mampat digunakan persamaan

$$Q_{nyata} = KA_2 \sqrt{\frac{2g_c}{\rho} \sqrt{p_1 - p_2}}$$

2.4.2 Manometer Tabung U Diferensial

Untuk mengetahui beda tekanan antara titik 1 dan titik 2 digunakan manometer tabung U diferensial. Manometer tabung U diferensial banyak digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan antara dua bejana atau dua titik dalam sebuah sistem.



Gambar 2.4 Manometer Tabung U Diferensial

Sumber: Bruce R. Munsonm, Donald F. Young, & Theodore H. Okiishi. “*Mekanika Fluida*”. 2003

Bab 2 hal 65

Karena kedua titik terletak pada ketinggian yang sama, maka

$$p_A + \gamma_1 h_1 - \gamma_2 h_2 - \gamma_3 h_3 = p_B$$

dan persamaan untuk mengukur beda tekanan manometer tabung U diferensial adalah

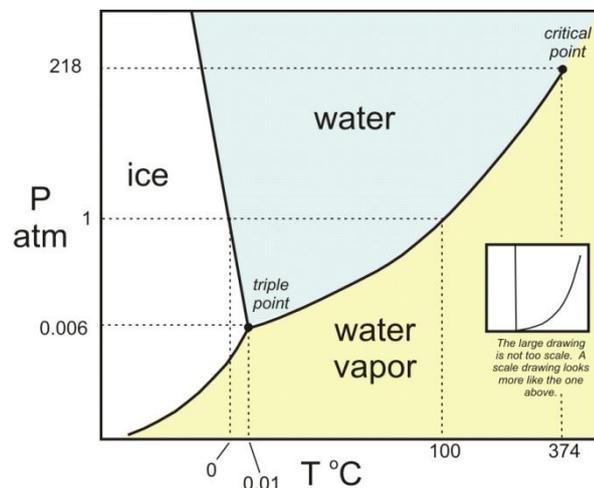
$$p_A - p_B = \gamma_2 h_2 + \gamma_3 h_3 - \gamma_1 h_1$$

karena pada orifis $h_1 = h_2 + h_3$ dan $\gamma_1 = \gamma_3$ maka persamaan beda tekanan untuk manometer tabung U diferensial menjadi

$$p_A - p_B = h_2(\gamma_2 - \gamma_1)$$

2.5 Pengerinan Beku Vakum

Pengerinan beku vakum adalah sebuah metode pengeringan yang proses pengeringannya dilakukan dibawah titik *triple point*. Pengerinan beku vakum dapat mempertahankan nutrisi atau kandungan gizi, warna, rasa dan struktur. Proses pembekuan vakum diawali dengan penggunaan pompa vakum untuk menurunkan tekanan di dalam ruang pengering, dimana sesuai dengan sifat air bahwa dengan menurunkan tekanan maka akan menyebabkan turunnya temperatur air sampai membeku yang digambarkan pada gambar 2.5 diagram fase air. Kemudian setelah material membeku, akan mencapai saturasi dan berubah fase, hal ini yang dinamakan sublimasi atau berubah fase dari fase solid ke gas dimana terjadi pada tekanan yang konstan. Dari diagram fase air jelas terlihat bahwa jika pada tekanan konstan maka dengan bertambah temperatur akan mempercepat perubahan fase. Proses-proses pengeringan vakum tersebut harus didukung dengan adanya *cold trap* (perangkap uap) untuk menampung uap air selama proses pengeringan agar tidak masuk ke dalam pompa vakum, karena jika uap air tersebut masuk pompa vakum akan menimbulkan kerusakan pada pompa vakum.



Gambar 2.5 Diagram Fase Air

Sumber : <http://serc.carleton.edu>

Adapun kelebihan proses pengeringan beku adalah sebagai berikut:

- Dengan proses pada temperatur rendah dapat mengurangi degradasi kandungan mineral pada bahan yang mempunyai sensitifitas panas tinggi.
- Dapat dilakukan penakaran yang akurat pada produk yang akan dikeringkan.
- Kandungan air dari produk akhir dapat dikendalikan selama proses berlangsung.
- Mempunyai penampilan yang bagus pada produk kering .
- Produk kering mempunyai *specific area* yang besar sehingga dapat mudah dilarutkan kembali dengan air.

Adapun kekurangan proses pengeringan beku adalah sebagai berikut:

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

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Garis Besar Pengujian

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



Gambar 3.1 Mesin Pengering Beku Vakum *Compact*

3.1.1 Parameter – parameter yang Ditentukan

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

⊙ Tekanan

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

⊙ Temperatur

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

Software instrumentasi yang digunakan pada saat pengukuran :

3.1.2 LabVIEW

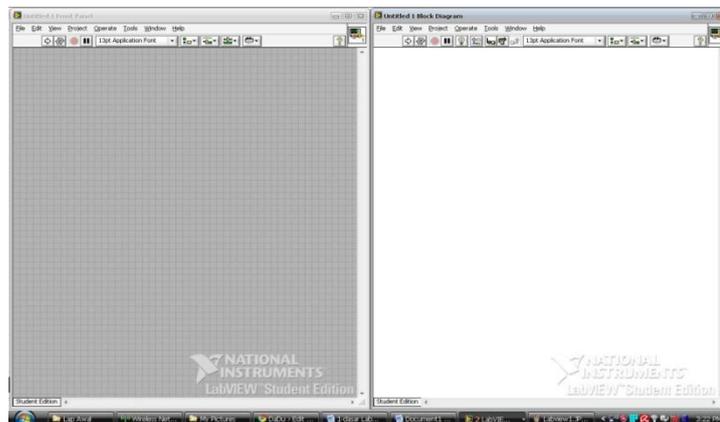
LabVIEW (singkatan dari *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) adalah perangkat lunak komputer untuk pemrosesan dan visualisasi data dalam bidang akuisisi data, kendali instrumentasi serta automasi industri yang pertama kali dikembangkan oleh perusahaan *National Instruments* pada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

Program *LabVIEW* disebut dengan *Virtual Instrumen* karena beberapa tampilan dan operasi pada program *LabVIEW* menyerupai suatu instrumen seperti *osiloskop* dan *multimeter*. Setiap *VI* menggunakan fungsi-fungsi yang

memanipulasi input dari user interface atau sumber lain dan menampilkan informasi tersebut atau memindahkan informasi tersebut ke *file*/komputer lain.

LabVIEW terdiri dari tiga komponen, yaitu :

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



Gambar 3.2 Tampilan *LabVIEW*

3.2 Komponen Mesin Pengering Beku Vakum Compact

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

3.2.1 Pompa Vakum

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



Gambar 3.3 Pompa Vakum

Type : *Direct oil rotary vacuum pump*

AC 220 V 50Hz

Displacement : 50 Hz – 1200 L/min

60 Hz – 1440 L/min

Ultimate Vacuum : 6.7×10^{-2} Pa

Motor Power : 2.2 kW

Oil Capacity : 2.8 L

Pump Weight : 138 kg.

Selain pompa vakum dengan spesifikasi diatas juga digunakan pompa vakum lain dengan spesifikasi:



Gambar 3.4 Pompa Vakum

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

3.2.2 Ruang Material

Ruang material merupakan salah satu bagian utama dari alat *freeze vacuum drying* dimana digunakan untuk tempat pengujian. Tabung ini ditutup dengan akrilik setebal 3 cm. Tutup tabung dirancang untuk dapat digunakan sebagai tempat meletakkan alat ukur seperti *pressure transmitter* dan termokopel. Ruang material juga digunakan untuk tempat menaruh produk uji (*specimen*).



Gambar 3.5 Ruang Material

3.2.3 Kompresor

Pada mesin pengering beku vakum *compact* digunakan dua kompresor yang memiliki spesifikasi yang sama.

Merk : Tecumseh

Tipe : Hermetik

Daya : ½ PK



Gambar 3. 6 Kompresor

3.2.4 Plate Heat Exchanger (PHE)

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



Gambar 3.7 Plate Heat Exchanger

3.2.5 Needle Valve

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

Merk / Tipe : Hy-Lock

Tekanan max. : 6000 psi



Gambar 3. 8 Needle Valve

3.2.6 Kondenser

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

discharge kompresor LS.

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



Gambar 3. 9 Kondenser dan *Fan*

3.2.7 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.



Gambar 3. 10 Evaporator

3.2.8 *Stop Valve*

Komponen ini digunakan untuk membuka dan menutup aliran refrijeran.



Gambar 3. 11 *Stop Valve*

3.2.9 *Check Valve*

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



Gambar 3.12 *Check Valve*

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

Needle valve berfungsi untuk mengatur aliran refrijeran yang mengalir dalam sistem refrigrasi dan berfungsi untuk menurunkan tekanan refrijeran.

Stop valve berfungsi untuk membuka dan menutup aliran refrijeran secara manual.

Check valve berfungsi menjamin arah aliran refrijeran hanya terjadi satu arah dan mencegah terjadinya lairan balik refrijeran.

3.2.10 Tempat Material

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



Gambar 3. 13 Tempat Material

3.3 Alat Ukur

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

3.3.1 *Thermocouple*

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

Tipe : K
 Range kerja : -200°C – 1350°C



Gambar 3. 14 *Thermocouple* Tipe K

3.3.2 *Pressure Gauge*

Pressure gauge adalah alat untuk mengukur tekanan refrijeran dalam sistem refrijerasi. *Pressure gauge* bekerja secara analog dan hasil pembacaannya dapat langsung dilihat. *Pressure gauge* yang digunakan untuk mengukur tekanan refri geran terdiri dari dua macam yaitu *pressure gauge* yang digunakan untuk mengukur low pressure berwarna biru dan yang digunakan untuk mengukur high pressure berwarna merah

Tipe : *Freon pressure gauge*
 Range kerja : Biru = hingga 120 psi
 Merah = hingga 300 psi



Gambar 3. 15 *Pressure Gauge*

3.3.3 *Pressure Transmitter*

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

Merk/ Tipe : Druck PTX 1400
 Range kerja : hingga 600 bar



Gambar 3. 16 *Pressure Transmitter*

3.3.4 Orifis

Orifis adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengukur laju aliran volum atau massa fluida di dalam saluran yang tertutup (pipa) berdasarkan prinsip beda tekanan. Untuk mengukur beda tekanan digunakan manometer tabung U diferensial.



Gambar 3. 17 Orifis

3.3.5 Timbangan Digital

Timbangan digital yang digunakan ada dua macam, yaitu untuk mengukur massa refrigeran yang masuk ke dalam sistem refrigerasi dan timbangan digital yang digunakan untuk mengukur massa spesimen sebelum dan sesudah pengeringan. Timbangan digital yang digunakan untuk mengukur massa refrigeran adalah timbangan digital merk quatro tipe Macs series



Gambar 3.18 Timbangan digital

Timbangan digital yang digunakan untuk mengukur massa spesimen adalah timbangan digital merk AND tipe FX-4000 dengan ketelitian 2 angka dibelakang koma dengan satuan gram.



Gambar 3.19 Timbangan Digital

3.3.6 *National Instrument*

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

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

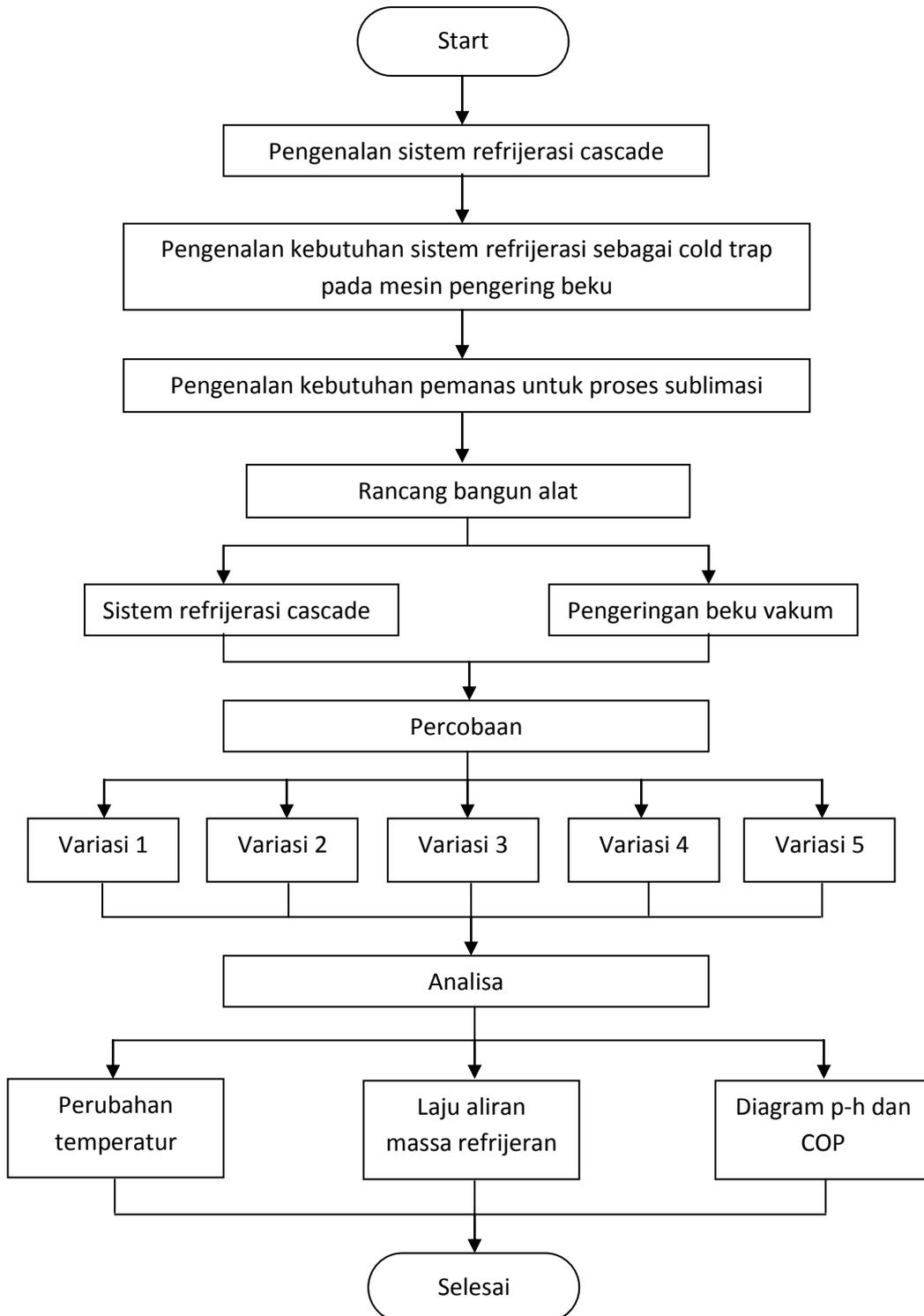
- Termokopel → *National Instrument* (NI) 9211 TC \pm 0 mV
- *Pressure Transmitter* → *National Instrument* (NI) 9203 AI \pm 20 mA
- *RH Meter* → *National Instrument* (NI) 9203 AI \pm 20 mA
- *Input* 9 – 30 V ; 15 W *max.*



Gambar 3.20 *National Instrument*

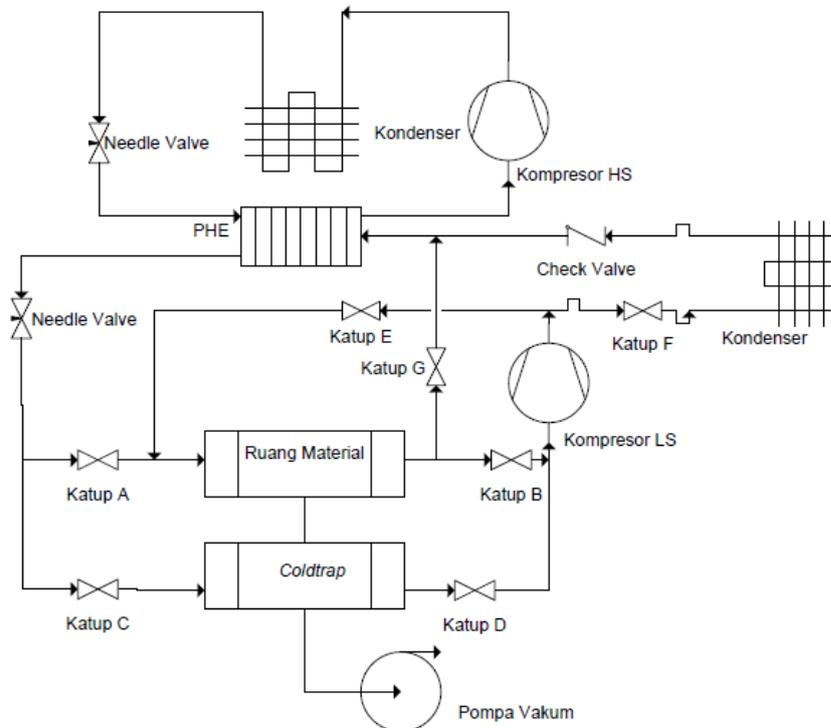
3.4 Diagram Alir Percobaan

Diagram alir percobaan ini dapat dilihat di bawah ini :



Gambar 3.21 Diagram Alir Percobaan

3.5 Skema Alat



Gambar 3. 22 Skema Alat Pengering Beku Vakum *Compact*

Gambar 3.22 memperlihatkan skema dari mesin pengering beku vakum yang digunakan pada percobaan ini. Seperti yang telah disebutkan, evaporator dari LS dimanfaatkan sebagai ruangan material dan *cold trap* kemudian disambungkan dengan sebuah pompa vakum. Pada ruangan material dipasang satu *pressure transmitter* untuk mengetahui tekanan ruang material dan tiga *thermocouple* untuk mengetahui suhu ruang dan dua untuk mengetahui suhu material. Pada *coldtrap* dipasang satu *thermocouple* untuk mengetahui suhu *coldtrap*. Selain itu *thermocouple* dan *pressure gauge* juga di titik- titik tertentu pada sistem refrijerasi

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

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

Pada tahap pendinginan vakum, 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, 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. *Check valve* berguna untuk memastikan aliran dari katup D tidak berbalik menuju kompresor lagi.

3.6 Persiapan Pengujian

3.6.1 Pengisian Refrijeran

Refrijeran yang digunakan pada alat ini adalah R22 untuk HS dan HCR22 (propan) untuk LS. 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 system, pompa vakum, dan tabung refrijeran menggunakan *testing manifold*. Kemudian meletakkan tabung refrijeran diletakkan di atas timbangan digital.
2. Menyalakan pompa vakum hingga sistem dan selang *testing manifold* menjadi vakum
3. Menutup kedua katup yang terdapat *testing manifold* dan kemudian mematikan pompa
4. Membuka katup pada yang mengarah pada sistem refrijerasi, refrijeran akan mengalir menuju sistem karena adanya perbedaan tekanan
5. Menggunakan katup yang menghubungkan *testing manifold* dengan sistem refrijerasi untuk mengatur jumlah refrijeran yang masuk ke sistem refrijerasi

3.6.2 Persiapan Benda Uji

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



Gambar 3. 23 Ubur- ubur yang Telah Diblender

3.7 Pengujian

3.7.1 Lokasi Pengujian

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

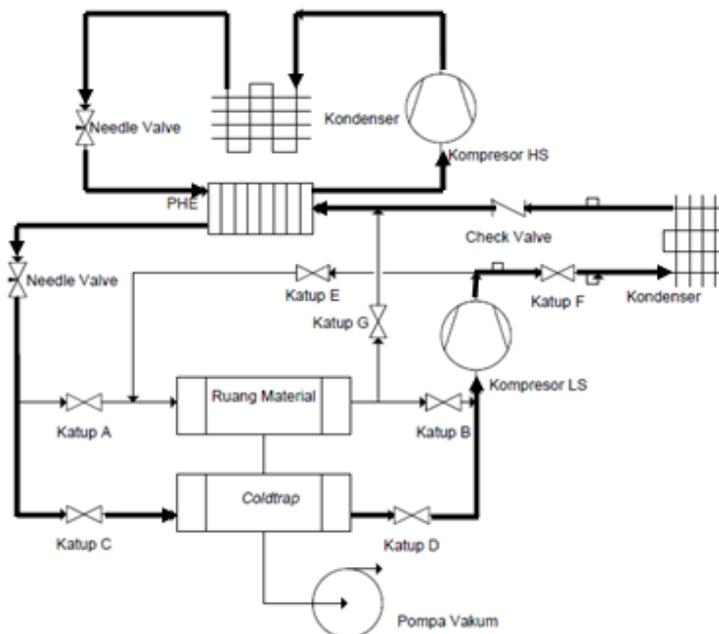
3.7.2 Variasi Pengujian

Dalam penelitian ini akan divariasikan dua hal, yaitu suhu pendinginan internal dan suhu pemanas dari panas buang condenser. Pendinginan internal digunakan saat proses vacuum cooling, sementara pemanas dari panas buang kondenser digunakan saat proses pengeringan. Untuk mendapatkan variasi nilai suhu, maka yang diatur adalah bukaan katup. Untuk mengatur suhu pendingin, katup yang diatur adalah katup A, sedangkan untuk mengatur suhu pemanas, katup yang diatur adalah katup E.

Tabel 3.2 Variasi Data Pengujian

No	Variasi	Keterangan
1	Pendingin internal	Tidak
	Pemanas	Tidak
2	Pendingin internal	Ya
	Pemanas	Ya
3	Pendingin internal	Ya (Setengah Buka-an Katup)
	Pemanas	Ya (Setengah Buka-an Katup)
4	Pendingin internal	Tidak
	Pemanas	Ya
5	Pendingin internal	Ya
	Pemanas	Tidak

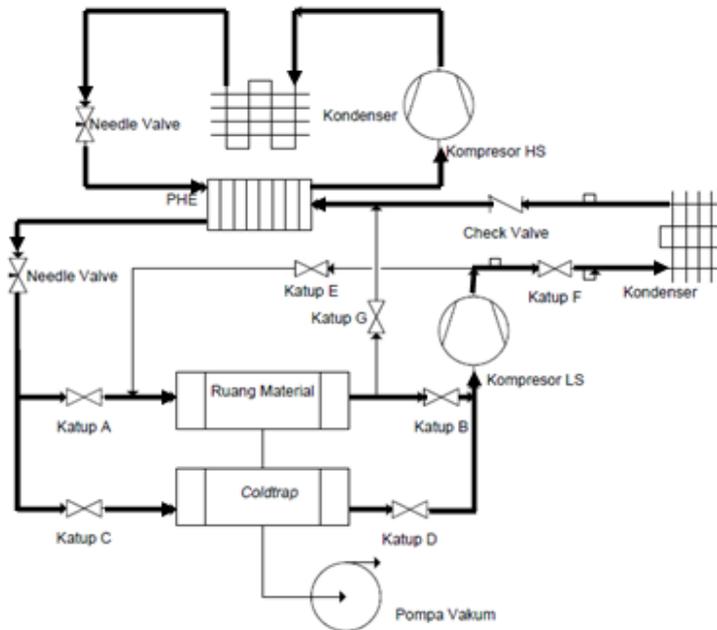
Keadaan Normal



Gambar 2.24 Skematik Alat Pengoperasian Keadaan Normal

Pada pengoperasian alat pengering beku keadaan normal, katup yang terbuka adalah katup C, katup D, dan Katup F. Aliran refrijeran yang terjadi pada sistem LS dapat terlihat pada gambar 2.24

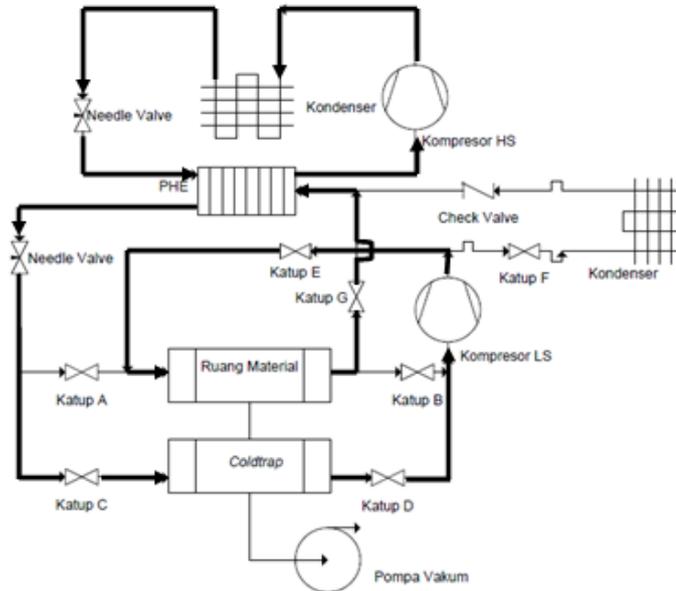
Keadaan Pendingin Internal



Gambar 2.25 Skematik Alat Pengoperasian Keadaan Pendingin Internal

Pada pengoperasian alat pengering beku keadaan pendingin internal, katup yang terbuka adalah katup A, katup B, katup C, katup D, dan katup F sedangkan katup E dan katup G tertutup. Pada pengoperasian alat pengering beku keadaan setengah pendingin internal, katup yang terbuka adalah katup C, katup D, dan katup F. Katup A dan katup B dalam keadaan bukaan katup setengah dan katup E dan katup G dalam keadaan tertutup. Aliran refrijeran yang terjadi pada sistem pengering beku untuk keadaan pendingin internal dan setengah pendingin internal dapat dilihat pada gambar 2.25.

Keadaan Pemanas



Gambar 2.26 Skematik Alat Pengoperasian Keadaan Pemanas

Pada pengoperasian alat pengering beku keadaan pemanas, katup yang terbuka adalah katup C, katup D, katup E, dan katup G sedangkan katup A dan katup B tertutup. Untuk pengoperasian mesin pengering beku keadaan setengah pemanas, katup yang terbuka adalah katup C dan katup D. Untuk katup E dan katup G dalam keadaan setengah terbuka dan katup A, katup B, dan katup F dalam keadaan tertutup. Aliran refrijeran yang terjadi pada sistem pengering beku untuk keadaan pemanas dan setengah pemanas dapat dilihat pada gambar 2.26.

3.7.3 Prosedur Pengambilan Data

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

1. Menyiapkan benda uji
2. Menyalakan software LabView
3. Menghubungkan alat- alat ukur digital seperti *thermocouple* dan *pressure transmitter* ke DAQ National Instrument
4. Meletakkan benda uji ke dalam ruang material dan kemudian ditutup
5. Menyalakan sistem HS hingga evaporatornya mencapai suhu minimum

6. Menyalakan sistem LS
7. Mengatur needle valve kedua sistem hingga didapat suhu evaporator LS yang paling rendah
8. Menyalakan pompa vakum
9. Mencatat nilai tekanan yang terbaca di setiap *pressure gauge* dan perbedaan ketinggian raksa pada manometer tabung U diferensial setiap 5 menit
10. Percobaan selesai ketika suhu material sudah sama dengan suhu lingkungan (ruang material)
11. Mematikan pompa vakum dan sistem refrijerasi.

BAB 4

PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

Pengolahan data dan analisa ini diperoleh dari pengujian yang telah dilakukan untuk mengetahui tektur temperatur, laju aliran massa refrijeran pada sistem yang terjadi selama proses pengeringan.

Setelah melaksanakan serangkaian pengkajian dan pengujian, penulis melakukan pengolahan data sistem refrijerasi cascade dua tingkat dengan berdasarkan pada asumsi dan penyederhanaan sebagai berikut:

- Kompresor berkerja secara isentropik dan efisiensi motor dan mekanikal kompresor sebesar 0,93
- Nilai spesifik entalpi keluar kondenser sama dengan nilai spesifik entalpi masuk evaporator
- Penurunan tekanan dan *heat losses/gain* pada perpipaan dapat diabaikan
- Tidak terjadi penurunan tekanan dari masuk evaporastor ke *suctions compressor*.

Nilai temperatur dan tekanan diperoleh dengan alat ukur termokopel dan *prssure gauge*. Aliran massa refrijerant diperoleh dari persamaan:

$$\dot{m} = \rho \times Q$$

ρ adalah massa jenis refrijeran dan Q adalah debit aliran refrijeran, nilai Q diperoleh dari persamaan:

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}}$$

untuk nilai \dot{m} HS diperoleh dengan persamaan

$$\dot{m}_H / \dot{m}_L = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8}$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_H + \dot{W}_L}$$

dengan nilai Q_E , W_H , dan W_L didapatkan dari persamaan

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_1(h_1 - h_4)$$

$$\dot{W}_H = \frac{\dot{m}_5(h_{6s} - h_5)}{\eta_{m,H}}$$

$$\dot{W}_L = \frac{\dot{m}_1(h_{2s} - h_1)}{\eta_{m,L}}$$

sehingga diperoleh grafik hasil pengolahan data pada masing – masing variasi

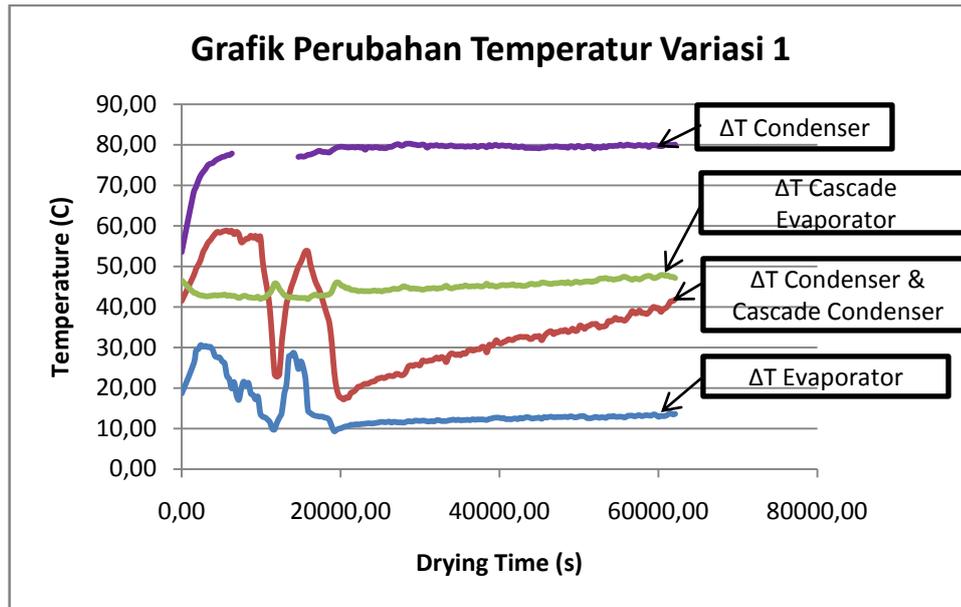
4.1 Pengolahan Data

4.1.1 Perubahan Temperatur

Pada proses pengeringan beku vakum, spesimen pada awalnya berupa cairan kemudian dilakukan proses pembekuan. Setelah spesimen menjadi es, proses selanjutnya adalah proses sublimasi. Setelah proses sublimasi selesai diharapkan material kering yang terbentuk berupa serbuk

Variasi 1 (Tanpa Pendingin Internal, Tanpa Pemanas)

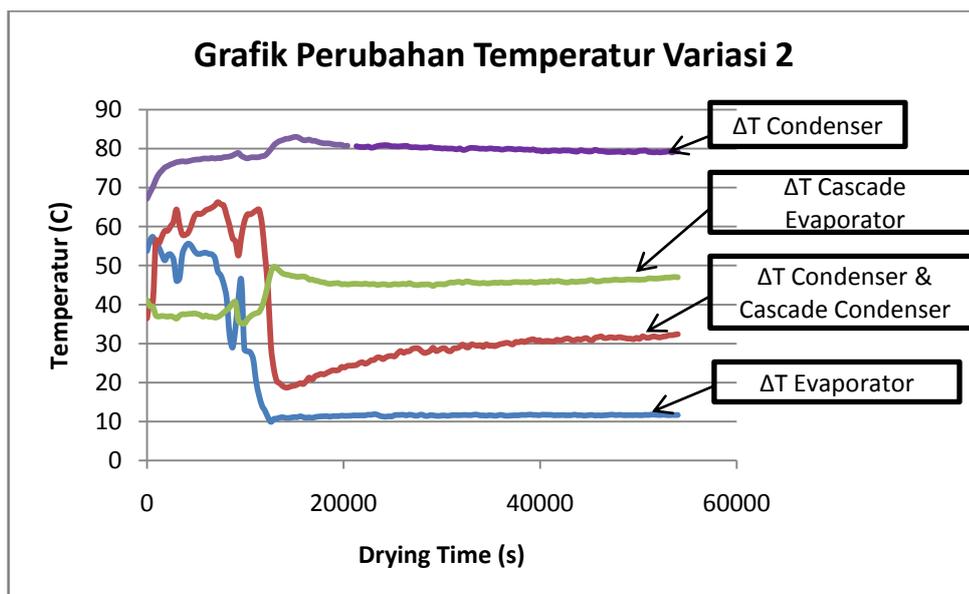
Pada variasi 1, proses pengeringan dilakukan tanpa pendingin internal dan pemanas. Proses pembekuan dan penyubliman terjadi akibat proses pemvakuman



Gambar 4.1 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 1

Variasi 2 (Pendinginan Internal Bukaan Katup Penuh, Pemanas Bukaan Katup Penuh)

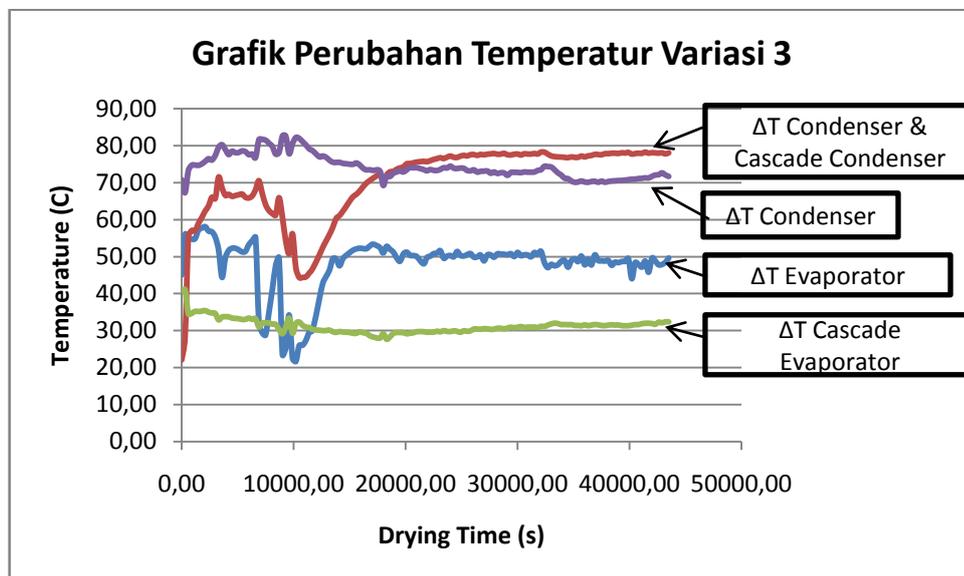
Pada variasi 2, proses pembekuan spesimen dilakukan dengan percabangan evaporator. Setelah temperatur material mencapai suhu terendah, dilakukan proses pemvakuman. Proses penyubliman terjadi akibat pemanfaatan panas buang kondesner LS dan proses pemvakuman.



Gambar 4.2 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 2

Variasi 3 (Pendinginan Internal bukaan katup setengah dan pemanas bukaan katup setengah)

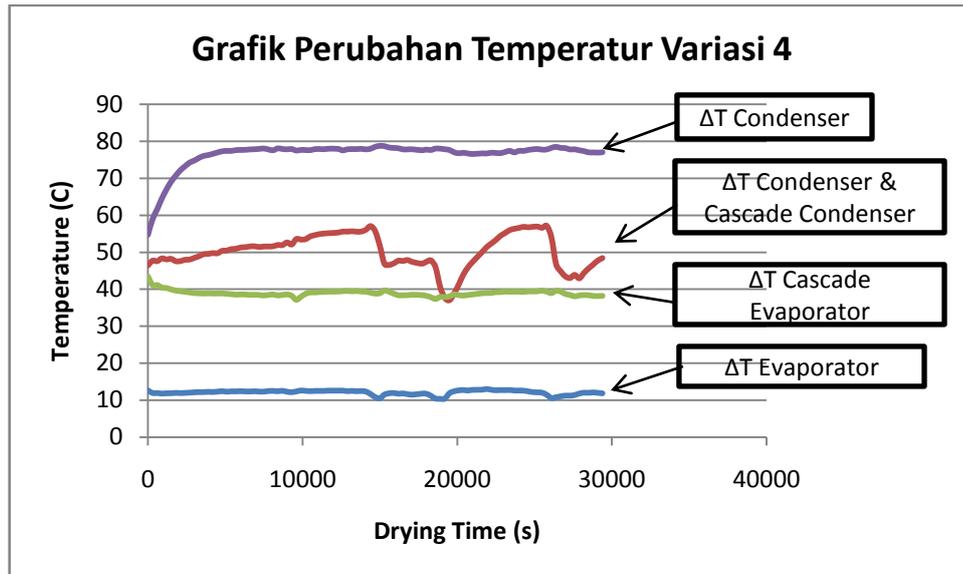
Pada proses pengeringan variasi 3, proses pembekuan spesimen dilakukan dengan percabangan evaporator dan pemvakuman. Proses penyubliman terjadi akibat pemanfaatan panas buang kondesner LS dan proses pemvakuman.



Gambar 4.3 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 3

Variasi 4 (Tanpa Pendingin Internal, Pemanas Bukaan Katup Penuh)

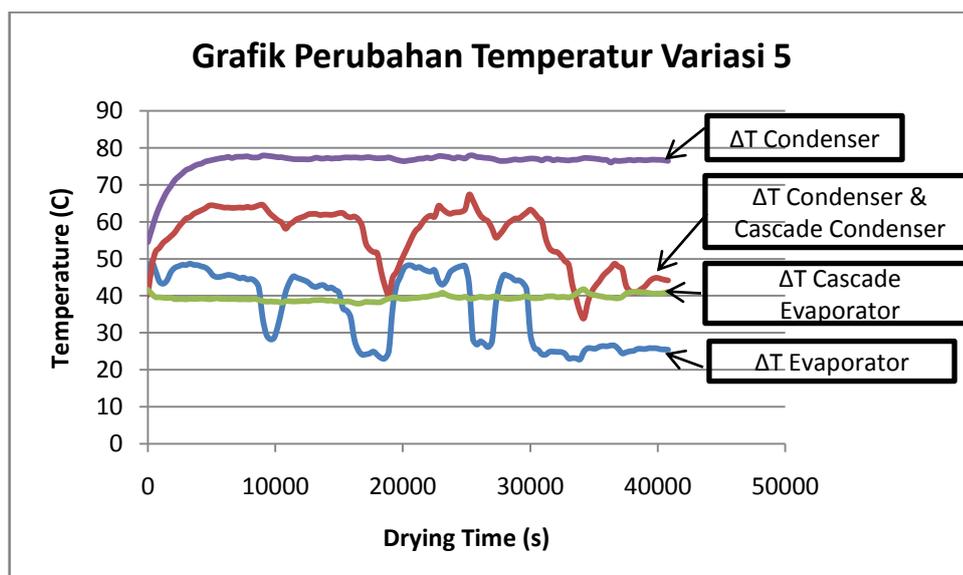
Pada variasi 4, dilakukan pemanasan spesimen dan pemvakuman sejak awal proses pengeringan dengan memanfaatkan panas buang kondesner LS



Gambar 4.4 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 4

Variasi 5 (Pendingin Internal Bukan Katup Penuh, Tanpa Pemanas)

Pada variasi 5, selama proses pengeringan dilakukan pendinginan internal dengan memanfaatkan percabangan evaporator LS.



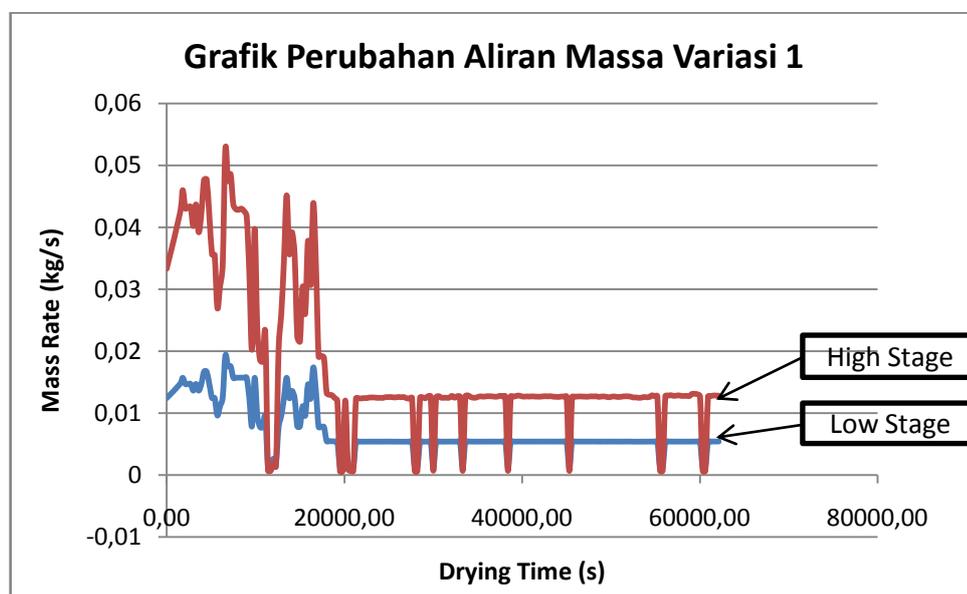
Gambar 4.5 Grafik Perubahan Temperatur Variasi 5

4.1.2 Laju Aliran Massa Refrijeran

Selama proses pengeringan terjadi perubahan laju aliran refrijeran pada sistem LS dan sistem HS akibat adanya perubahan beban pada evaporator.

Variasi 1

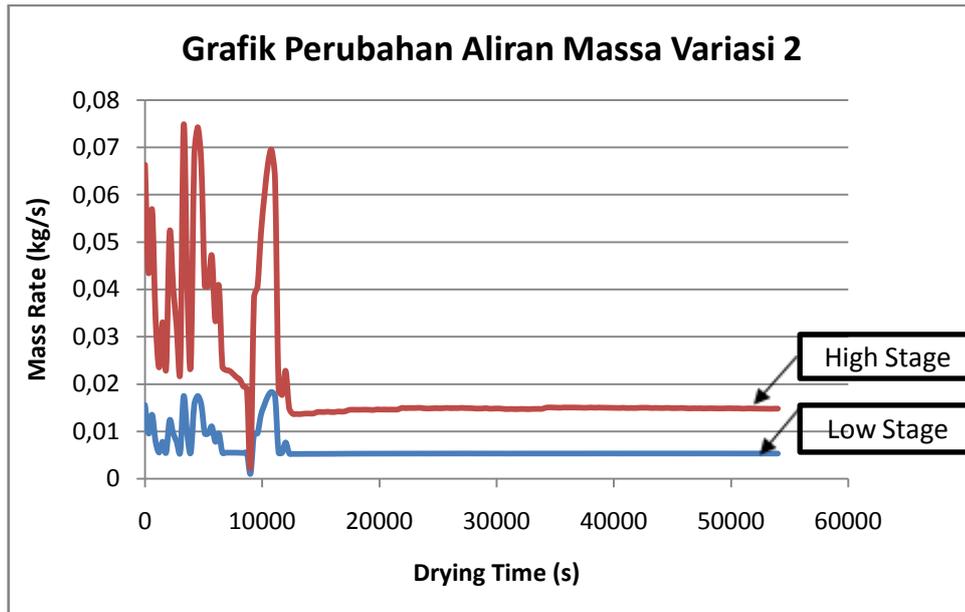
Grafik laju perbandingan aliran massa refrijeran proses pengeringan variasi 1 pada sistem HS dan LS dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.6 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 1

Variasi 2

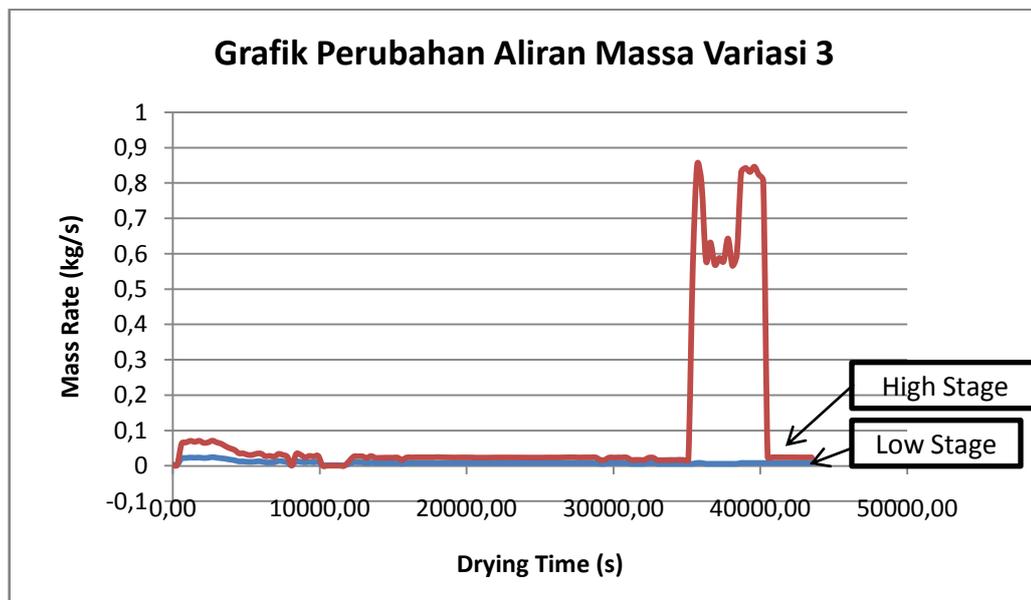
Grafik laju perbandingan aliran massa refrijeran proses pengeringan variasi 2 pada sistem HS dan LS dapat dilihat pada gambar 4.7



Gambar 4.7 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 2

Variasi 3

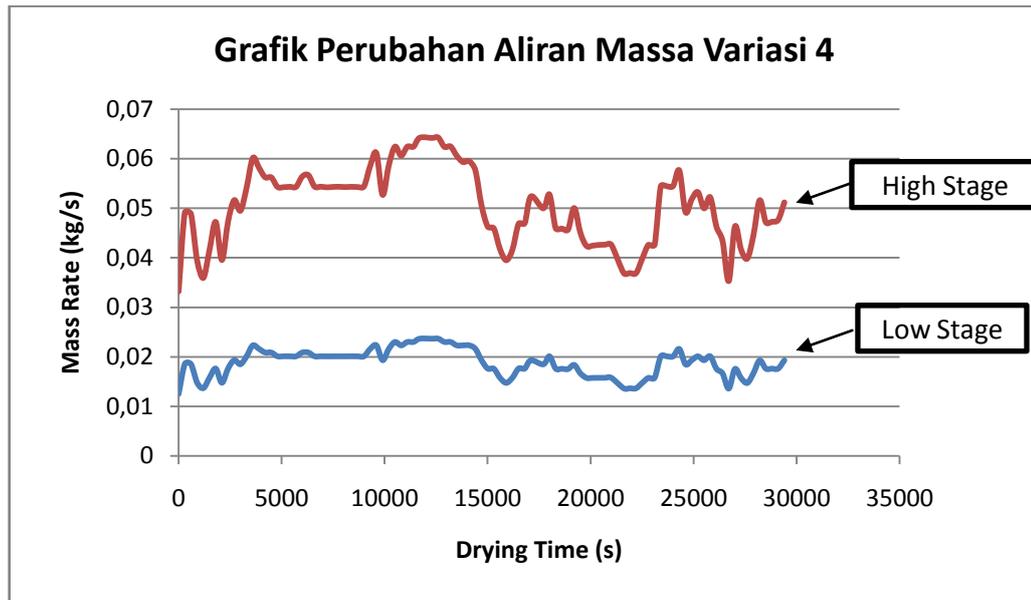
Grafik laju perbandingan aliran massa refrijrean proses pengeringan variasi 3 pada sistem HS dan LS dapat dilihat pada gambar 4.8



Gambar 4.8 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 3

Variasi 4

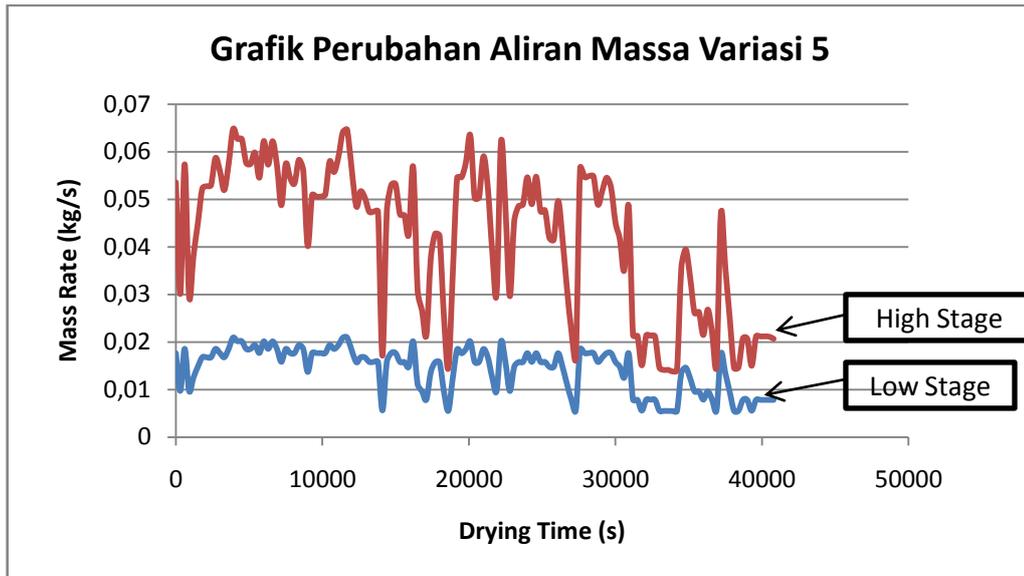
Grafik laju perbandingan aliran massa refrijrean proses pengeringan variasi 4 pada sistem HS dan LS dapat dilihat pada gambar 4.9



Gambar 4.9 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 4

Variasi 5

Grafik laju perbandingan aliran massa refrijrean proses pengeringan variasi 5 pada sistem HS dan LS dapat dilihat pada gambar 4.10

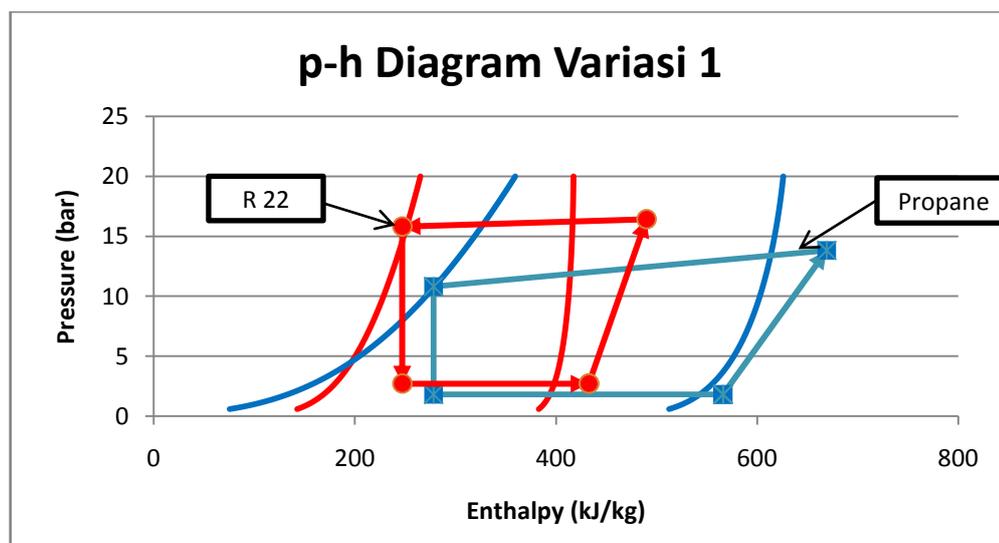


Gambar 4.10 Grafik Perubahan Aliran Massa Variasi 5

4.1.3 Diagram p-h dan COP

Variasi 1

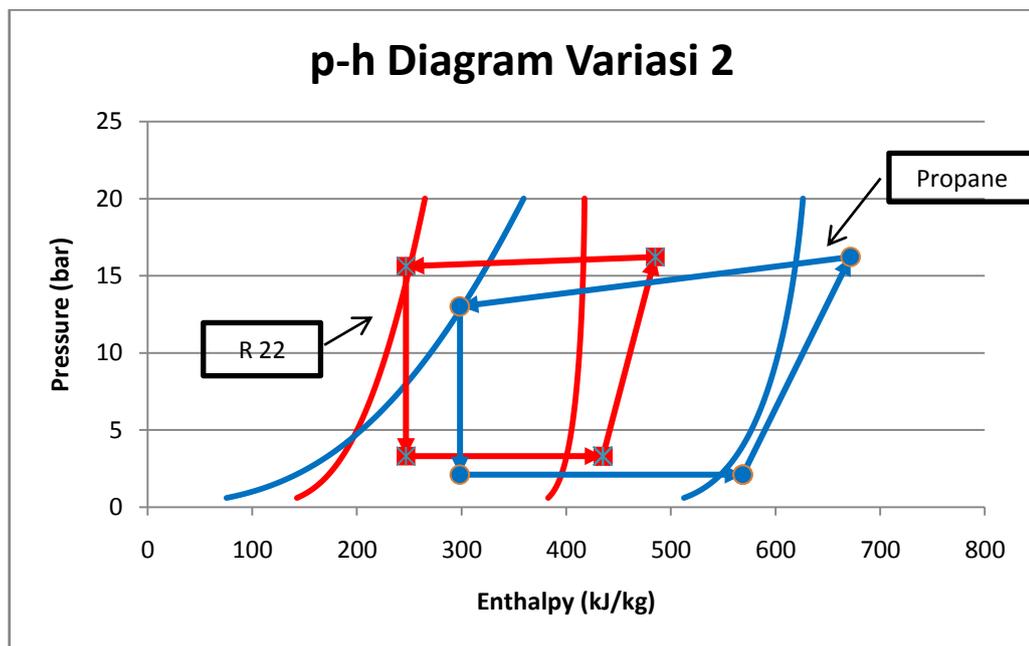
Diagram p-h sistem refrijerasi variasi 1 dalam keadaan *steady* ditunjukkan pada gambar 4.11



Grafik 4.11 Diagram p-h Variasi 1

Variasi 2

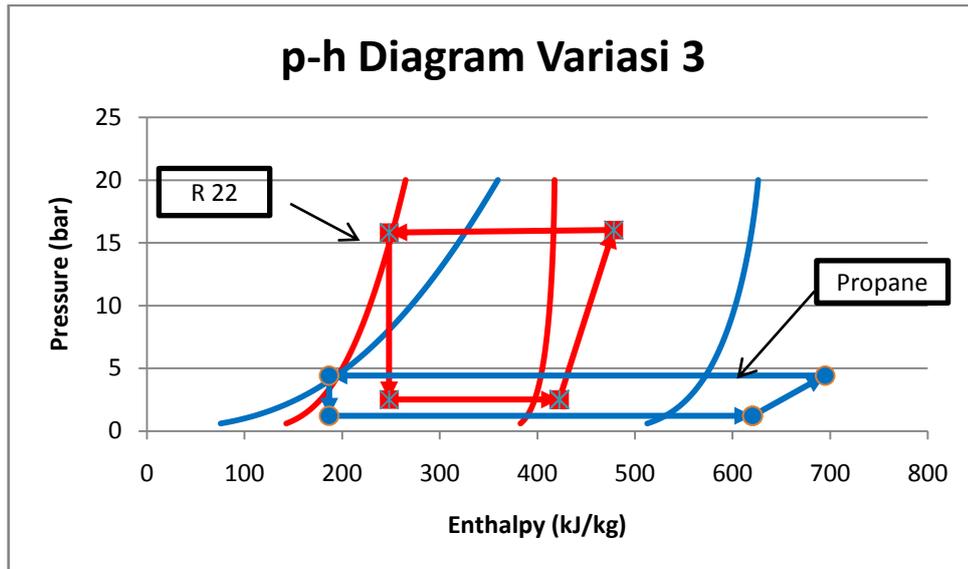
Diagram p-h sistem refrijerasi variasi 2 setelah keadaan *steady* ditunjukkan pada gambar 4.12



Gambar 4.12 Diagram p-h Variasi 2

Variasi 3

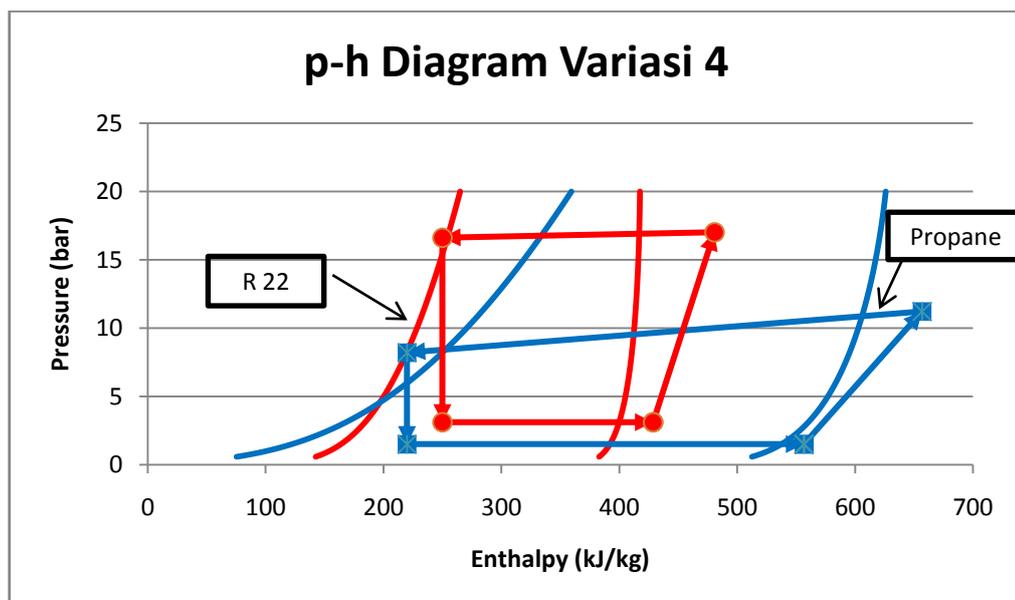
Diagram p-h sistem refrijerasi variasi 3 dalam keadaan *steady* ditunjukkan pada gambar 4.13



Gambar 4.13 Diagram p-h Variasi 3

Variasi 4

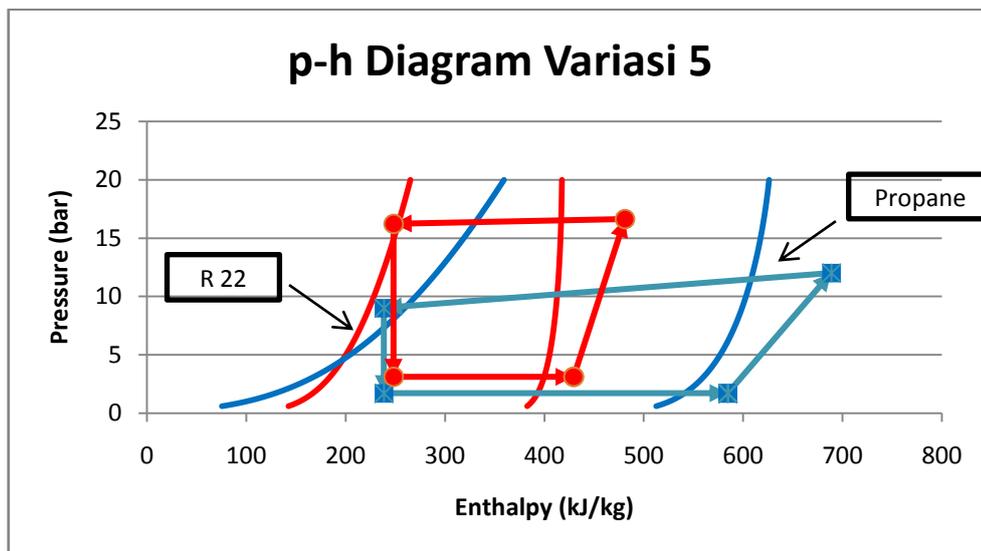
Diagram p-h sistem refrijerasi variasi 4 dalam keadaan *steady* ditunjukkan pada gambar 4.14



Gambar 4.12 Diagram p-h Variasi 4

Variasi 5

Diagram p-h sistem refrijerasi variasi 5 dalam keadaan *steady* ditunjukkan pada gambar 4.15



Gambar 4.15 Diagram p-h Variasi 5

Nilai COP sistem refrijerasi cascade untuk setiap variasi dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Nilai COP Setiap Variasi Pengeringan

	Q evap	W LS	W HS	W total	COP
variasi 1	1,55	0,59	0,78	1,37	1,13
variasi 2	1,44	0,59	0,79	1,38	1,04
variasi 3	3,47	0,64	1,44	2,08	1,67
variasi 4	5,94	1,89	2,56	4,45	1,30
variasi 5	2,70	0,87	1,17	2,04	1,32

4.2 Analisa

4.2.1 Analisa Grafik Perubahan Temperatur

Variasi 1

Perubahan temperatur terjadi akibat adanya perubahan beban yang diterima oleh evaporator yang berfungsi sebagai cold trap pada sistem pengeringan beku vakum. Pada grafik perubahan temperatur variasi 1, ΔT evaporator meningkat karena terjadi penguapan air pada spesimen akibat pemvakuman. Penguapan pada saat pemvakuman menyebabkan terdapat uap air yang harus dibekukan oleh coldtrap sehingga beban evaporator meningkat dan menyebabkan ΔT evaporator meningkat. Meningkat ΔT evaporator maka akan diikuti oleh meningkatnya ΔT kondenser dan *cascade* kondenser dan ΔT *cascade* evaporator akan turun. ΔT kondenser meningkat karena adanya peningkatan daya kompresor. Setelah spesimen mengalami pembekuan akibat pemvakuman maka beban pada evaporator akan turun sehingga ΔT evaporator akan turun. Menurunnya ΔT evaporator akan menyebabkan menurunnya ΔT kondenser dan *cascade* kondenser dan ΔT *cascade* evaporator akan meningkat. ΔT kondenser cenderung stabil selama proses pembekuan karena kapasitas kondenser yang lebih besar daripada perubahan beban yang terjadi.

Setelah spesimen membeku tahap selanjutnya adalah sublimasi. Pada tahap sublimasi, ΔT evaporator akan meningkat karena adanya uap air yang masuk ke evaporator. Dengan meningkatnya ΔT evaporator selama proses akan menyebabkan naiknya ΔT kondenser dan *cascade* kondenser. Naiknya ΔT kondenser dan *cascade* kondenser menyebabkan ΔT *cascade* evaporator turun karena panas yang diserap oleh *cascade* evaporator bertambah. Ketika jumlah uap air yang menyublim berkurang maka ΔT evaporator akan menurun. Menurunnya ΔT evaporator akan menyebabkan turunnya ΔT kondenser dan *cascade* kondenser menyebabkan ΔT *cascade* evaporator naik kemudian menjadi stabil. ΔT kondenser cenderung stabil selama proses sublimasi karena kapasitas kondenser yang lebih besar daripada perubahan beban yang terjadi. Setelah mencapai titik terendah ΔT kondenser dan *cascade* kondenser akan terus naik karena kerja

kompresor yang semakin besar dilihat dari semakin tingginya temperatur keluaran kompresor.

Variasi 2

Perubahan temperatur terjadi akibat adanya perubahan beban yang diterima oleh evaporator yang berfungsi sebagai cold trap pada sistem pengeringan beku vakum. Pada variasi 2 terjadi dua proses yaitu pembekuan spesimen dan sublimasi. Proses pembekuan spesimen digunakan percabangan evaporator untuk membekukan spesimen sehingga aliran refrijeran yang mengalir melewati evaporator berkurang dan menyebabkan ΔT evaporator meningkat. Dengan meningkatnya ΔT evaporator maka ΔT kondenser dan *cascade* kondenser ikut meningkat. ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser ikut meningkat tetapi tidak terlalu tinggi. Setelah spesimen membeku seluruhnya ΔT evaporator akan turun, turunnya ΔT evaporator akan menyebabkan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser ikut turun sedangkan ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser cenderung stabil karena perubahan temperatur pada sistem LS masih dalam kapasitas *cascade* evaporator dan kondenser. Setelah temperatur spesimen tidak dapat lebih rendah lagi dimulailah proses pemvakuman sehingga temperatur spesimen dapat lebih rendah. Hal ini mengakibatkan ΔT evaporator dan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser meningkat tetapi ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser cenderung stabil karena perubahan temperatur pada sistem LS masih dalam kapasitas *cascade* evaporator dan kondenser.

Pada proses sublimasi menggunakan panas buang kondenser, ΔT evaporator akan meningkat sedangkan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser menurun karena seluruh panas buang kondenser digunakan sebagai pemanas ruang pengering. ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser mengalami kenaikan karena panas yang dibuang oleh *cascade* kondenser berkurang. Karena jumlah air yang menyublim pada proses pengeringan semakin berkurang maka ΔT evaporator menurun dan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser akan meningkat kembali. Karena panas buang *cascade* kondenser meningkat maka ΔT *cascade* evaporator semakin turun dan menyebabkan turunnya ΔT kondenser.

Variasi 3

Perubahan temperatur terjadi akibat adanya perubahan beban yang diterima oleh evaporator yang berfungsi sebagai cold trap pada sistem pengeringan beku vakum. Pada variasi 3 terjadi proses pembekuan spesimen dan sublimasi. Proses pembekuan memanfaatkan percabangan evaporator dan pemvakuman. Ketika proses pembekuan terjadi penguapan akibat penurunan tekanan. Ketika pembekuan spesimen, aliran refrijeran yang mengalir melewati evaporator berkurang dan menyebabkan ΔT evaporator meningkat, dengan meningkatnya ΔT evaporator maka ΔT kondenser dan *cascade* kondenser ikut meningkat. ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser ikut meningkat tetapi tidak terlalu tinggi. Saat terjadi penguapan pada proses pembekuan, ΔT evaporator dan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser ikut meningkat. sedangkan, ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser stabil. Ketika material telah membeku ΔT evaporator dan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser menurun, tetapi ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser stabil karena perubahan temperatur pada sistem LS masih dalam kapasitas *cascade* evaporator dan kondenser.

Pada proses penyubliman menggunakan panas buang kondenser, ΔT evaporator meningkat akibat adanya uap air hasil proses sublimasi masuk ke cold trap, sedangkan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser menurun karena panas buang kondenser digunakan sebagai pemanas ruang pengering tetapi karena katup hanya dibuka setengah maka ΔT *cascade* kondenser tidak turun terlalu rendah. ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser mengalami kenaikan karena panas yang dibuang oleh *cascade* kondenser berkurang. Karena jumlah uap air yang melewati evaporator pada proses penyubliman semakin berkurang maka ΔT evaporator menurun, sedangkan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser akan meningkat kembali. Karena ΔT *cascade* kondenser kembali meningkat maka ΔT *cascade* evaporator semakin tinggi dan menyebabkan naiknya ΔT kondenser.

Variasi 4

Perubahan temperatur terjadi akibat adanya perubahan beban yang diterima oleh evaporator yang berfungsi sebagai cold trap pada sistem pengeringan beku

vakum. Pada variasi 4, pengeringan terjadi karena pemanasan dan penguapan spesimen yang diawali dengan menaikkan temperatur spesimen hingga terjadi penguapan. Pemanasan dan penguapan yang terjadi sejak awal menyebabkan ΔT evaporator yang relatif konstan. ΔT kondenser dan *cascade* kondenser naik karena digunakan untuk memanaskan dan menguapkan uap air spesimen. ketika kandungan air dalam spesimen berkurang selama proses pengeringan dan cenderung turun karena jumlah uap yang dikeringkan berkurang menyebabkan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser turun. ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser stabil selama proses pengeringan karena perubahan temperatur pada sistem LS masih dalam kapasitas *cascade* evaporator dan kondenser.

Variasi 5

Perubahan temperatur terjadi akibat adanya perubahan beban yang diterima oleh evaporator yang berfungsi sebagai cold trap pada sistem pengeringan beku vakum. Pada variasi 5, beban pada evaporator terjadi akibat proses pembekuan spesimen. Ketika proses pembekuan terjadi penguapan sehingga menyebabkan ΔT evaporator naik dan diikuti kenaikan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser. kemudian setelah mengalami penguapan ΔT evaporator turun dan diikuti kenaikan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser. ΔT evaporator dan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser meningkat ketika terjadi pembekuan spesimen. Kemudian beban pada evaporator akan berkurang karena spesimen telah membeku dan tidak terjadi proses pengeringan baik dengan penguapan atau sublimasi sehingga ΔT evaporator dan ΔT kondenser dan *cascade* kondenser turun. ΔT *cascade* evaporator dan ΔT kondenser stabil selama proses pengeringan karena perubahan temperatur pada sistem LS masih dalam kapasitas *cascade* evaporator dan kondenser.

4.2.2 Analisa Grafik Laju Aliran Massa

Variasi 1

Ketika beban yang diterima oleh evaporator tinggi akibat adanya uap air akibat penguapan pada saat pembekuan yang melewati evaporator, laju aliran massa refrigeran pada sistem LS dan HS semakin bertambah untuk mengimbangi jumlah beban pada evaporator. Ketika beban evaporator berkurang karena berkurangnya jumlah uap air yang melewati evaporator, laju aliran refrigeran yang melewati sistem LS dan HS semakin berkurang. Laju aliran massa refrigeran pada sistem LS dan HS akan meningkat kembali ketika air pada spesimen mengalami sublimasi dan Laju aliran massa refrigeran pada sistem LS dan HS menurun ketika jumlah air yang tersublimasi berkurang. Jumlah aliran massa HS lebih tinggi karena properti R22 yang lebih banyak memindahkan panas dibandingkan propana dan jumlah massa R22 yang lebih banyak daripada propana.

Variasi 2

Laju aliran massa sistem LS dan HS pada awal proses pengeringan tinggi karena terjadinya proses pembekuan spesimen dan semakin cenderung berkurang karena jumlah spesimen telah membeku. Kemudian Laju aliran massa pada sistem LS dan HS naik lagi karena memasuki proses sublimasi dan turun karena jumlah air yang tersublimasi semakin berkurang. Jumlah aliran massa HS lebih tinggi karena properti R22 yang lebih banyak memindahkan panas dibandingkan propana dan jumlah massa R22 yang lebih banyak daripada propana.

Variasi 3

Laju aliran massa sistem LS dan HS pada proses pembekuan tinggi karena terjadinya penguapan dan pembekuan spesimen akibat pendingin internal dan pemvakuman. Kemudian laju aliran massa sistem LS dan HS semakin berkurang karena spesimen telah membeku. Kemudian laju aliran massa sistem LS dan HS naik lagi karena adanya proses sublimasi dan turun karena jumlah air yang tersublimasi semakin berkurang. Laju aliran refrigeran sistem HS ketika waktu pengeringan detik ke – 35000 meningkat karena refrigeran yang keluar kondenser

lebih berfase gas. Jumlah aliran massa HS lebih tinggi karena propertis R22 yang lebih banyak memindahkan panas dibandingkan propana dan jumlah massa R22 yang lebih banyak daripada propana.

Variasi 4

Laju aliran massa refrijeran pada sistem LS dan HS tinggi pada awal proses pengeringan karena adanya beban yang disebabkan terjadinya penguapan uap air selama proses pengeringan. Laju aliran massa refrijeran semakin sedikit karena berkurangnya jumlah air yang menguap karena kandungan air dalam spesimen yang semakin berkurang. Jumlah aliran massa HS lebih tinggi karena propertis R22 yang lebih banyak memindahkan panas dibandingkan propana dan jumlah massa R22 yang lebih banyak daripada propana.

Variasi 5

Laju aliran massa sistem LS dan HS pada awal proses pengeringan tinggi karena terjadinya proses pembekuan spesimen dan semakin cenderung berkurang karena jumlah spesimen yang berbentuk cair semakin sedikit dan suhu ruangan evaporator yang semakin rendah tanpa terjadi penguapan atau penyubliman air dalam spesimen. Jumlah aliran massa HS lebih tinggi karena propertis R22 yang lebih banyak memindahkan panas dibandingkan propana dan jumlah massa R22 yang lebih banyak daripada propana.

4.2.3 Analisa Diagram p-h dan COP

Variasi 1

Diagram p-h pada variasi 1 menunjukkan daya input kompresor LS lebih rendah daripada daya input kompresor HS, yang disebabkan rasio kompresi kompresor HS yang lebih besar. Kapasitas evaporator rendah karena masih terdapat beban yang tersisa dari pengeringan dan adanya perbedaan temperatur antara ruang pengering dan *cold trap* yang besar. Kapasitas evaporator yang dihasilkan hampir sama dengan daya input total kompresor sehingga menyebabkan COP sistem refrijerasi rendah yaitu 1,13.

Variasi 2

Diagram p-h pada variasi 2 menunjukkan daya input kompresor LS lebih rendah daripada daya input kompresor HS, yang disebabkan rasio kompresi kompresor HS yang lebih besar. Kapasitas evaporator rendah karena masih terdapat beban yang tersisa dari pengeringan dan adanya perbedaan temperatur antara ruang pengering dan *cold trap* yang besar. Kapasitas evaporator yang dihasilkan hampir sama dengan daya input total kompresor sehingga menyebabkan COP sistem refrijerasi rendah yaitu 1,04.

Variasi 3

Diagram p-h pada variasi 3 menunjukkan daya input kompresor LS lebih rendah daripada daya input kompresor LH. Hal ini yang disebabkan rasio kompresi kompresor HS yang lebih besar. Kapasitas evaporator tinggi karena masih terdapat beban yang tersisa dari pengeringan tetapi, perbedaan temperatur antara ruang pengering dan *cold trap* yang kecil. Kapasitas evaporator yang dihasilkan hampir sama dengan daya input total kompresor sehingga menyebabkan COP sistem refrijerasi rendah yaitu 1,67.

Variasi 4

Diagram p-h pada variasi 4 menunjukkan daya input kompresor LS lebih rendah daripada daya input kompresor LH. Hal ini yang disebabkan rasio kompresi kompresor HS yang lebih besar. Kapasitas evaporator tinggi karena masih beban yang tersisa dari pengeringan sedikit. Kapasitas evaporator yang dihasilkan hampir sama dengan daya input total kompresor sehingga menyebabkan COP sistem refrijerasi rendah yaitu 1,3.

Variasi 5

Diagram p-h pada variasi 5 menunjukkan daya input kompresor LS lebih rendah yaitu daripada daya input kompresor LH. Hal ini yang disebabkan rasio kompresi kompresor HS yang lebih besar. Kapasitas evaporator tinggi karena masih terdapat perbedaan temperatur antara ruang pengering dan *cold trap* yang

besar. Kapasitas evaporator yang dihasilkan hampir sama dengan daya input total kompresor sehingga menyebabkan COP sistem refrijerasi rendah yaitu 1,32.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Setelah melaksanakan percobaan di dapat beberapa kesimpulan

1. Perubahan temperatur pada sistem refrigersi terjadi akibat proses penguapan, pembekuan, dan penyubliman
2. Perubahan temperatur terjadi karena adanya perubahan beban pada evaporator
3. Ketika beban evaporator meningkat, laju aliran massa sistem refrijerasi akan meningkat
4. Kenaikan laju aliran massa pada sistem LS akan meningkatkan laju aliran massa pada sistem HS
5. Laju aliran massa HS lebih tinggi dibandingkan laju aliran massa LS karena massa R22 pada HS lebih banyak dibandingkan dengan massa propana di LS
6. Tekanan *suction* dan *discharge* kompresor LS dan HS hampir sama karena tipe refrijeran yang digunakan pada sistem LS dan sistem HS memiliki propertis yang mirip
7. COP sistem refrijerasi *cascade* rendah karena kapasitas evaporator dan daya input total kompresor hampir sama

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 perbaikan mekanisme pengumpulan material kering dari wadah pada akhir proses pengeringan agar jumlah material kering yang tidak dapat diambil dapat diminimalisir.
5. Perlu digunakannya *pressure transmitter* untuk mengukur tekanan sistem refrijerasi yang lebih akurat
6. Perlu dilakukan pemakaian tipe refrijeran pada sistem LS dan sistem HS yang memiliki properties yang berbeda agar meningkatkan efisiensi sistem refrijerasi *cascade*.

DAFTAR PUSTAKA

- Arun S Mujumdar. (2008). *Industrial Drying Principles, Equipments and New Development*. ISBN-10 : 81-907371-3-9
- ASHRAE Handbook. (2009). *Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineer, Inc.
- ASHRAE Handbook. (2003). *HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineer, Inc.
- ASHRAE Handbook. (2002). *Refrigeration*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineer, Inc.
- Bruce R. Munsonm, Donald F. Young, & Theodore H. Okiishi. (2003). *Mekanika Fluida*. Penerbit Erlangga: Jakarta.
- D. John Faulkner. (2000). *Highlights of Marine Natural Products Chemistry*. (1972–1999). *Nat. Prod. Rep.* **17**: 1-6.
- Hidayah, Rohman. (2009). *Perancangan Mesin Pengering Beku Vakum untuk Pengering Aloe Vera dengan Pemanasan Condenser*. Undergraduate thesis. Mechanical engineering, Universitas Indonesia: Depok.
- Ibrahim Dincer & Marc A. Rosen. (2007). *Exergy: Energy, Environment, Sustainable Development*.
- M. Idrus Alhamid, Darwin R. B. Syaka, and Nasruddin. (2010). *Exergy and Energy Analysis of a Cascade System Using R744+R170 for Low Temperature Applications*, International Journal of Mechanical & Mechatronic Engineering IJMME – IJENS Vol: 10 No: 06
- Temagangka, Indra Putra. (2011). *Pengaruh Perubahan Konsentrasi Komposisi Refrigeran Campuran CO₂/Ethane Sebagai Refrigeran Alternatif Ramah Lingkungan dalam Refrigerasi Cascade*. Undergraduate thesis. Mechanical engineering, Universitas Indonesia: Depok.

Yunus A. Çengel & Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 5th edition, Mcgraw-Hill, International Edition.