



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR EVAPORASI SIRKUIT
TEMPERATUR TINGGI PADA SISTEM REFRIGERASI
CASCADE YANG MENGGUNAKAN REFRIGERAN
CAMPURAN ETHANE DAN KARBON DIOKSIDA**

SKRIPSI

**ISWANTO PURNOMO
0906604861**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR EVAPORASI SIRKUIT
TEMPERATUR TINGGI PADA SISTEM REFRIGERASI
CASCADE YANG MENGGUNAKAN REFRIGERAN
CAMPURAN ETHANE DAN KARBON DIOKSIDA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ISWANTO PURNOMO
0906604861**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul :

Pengaruh Temperatur Evaporasi Sirkuit Temperatur Tinggi Pada Sistem Refrijerasi Cascade yang Menggunakan Refrijeran Campuran Ethane dan Karbon Dioksida

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. Penulisan tugas akhir ini dibuat bersama **Dimas Pradipta** dengan judul tugas akhir ” **Pengaruh Beban Pendinginan Terhadap Sistem Kerja Refrijerasi Cascade yang Menggunakan Refrijeran Campuran ethane dan Karbon Dioksida** ” Sehingga harap maklum jika ada beberapa bagian dari buku ini ada kesamaan dengan skripsi tersebut.

Nama : Iswanto Purnomo

NPM : 0906604861

Tanda Tangan : 

Tanggal : 16 januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Iswanto Purnomo
NPM : 0906604861
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Pengaruh Temperatur Evaporasi Sirkuit
Temperatur Tinggi pada Sistem Refrigerasi
Cascade yang Menggunakan Refrigeran Campuran
Ethane dan Karbon Dioksida

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 Al Hamid (.....)

Pembimbing : Dr-Ing.Ir. Nasruddin, MEng (.....)

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

Penguji : Lubi Rahadiyan, ST, MEng (.....)

Ditetapkan di :

Tanggal : 16 Januari 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa dalam proses pembuatan hingga selesainya skripsi ini banyak pihak yang telah membantu dan menyemangati saya dalam pembuatan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Orang tua dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberikan bantuan baik moril maupun materiil.
- 2) Dr.-Ing.Ir. Nasruddin, M.Eng dan Dr.Ir. M. Idrus Alhamid selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- 3) Bapak Ir. Darwin Rio Budi Syaka, MT dan rekan Arnas Lubis, ST yang telah banyak membimbing dan membantu dalam proses pembuatan skripsi.
- 4) Dimas Pradipta, Juniper H.P, Julian Arlisdianto. yang telah bekerja sama dengan baik selama pengerjaan skripsi ini.
- 5) Teman-teman Lab. Pendingin dan rekan-rekan seperjuangan yang membuat hari-hari selalu berwarna.
- 6) Karyawan-karyawan DTM mulai dari Bang Yasin, Mas Syarif, Acong, Bang Supri dan Mas Udiyono yang juga ikut ambil membantu saya menyelesaikan skripsi ini.
- 7) Teman-teman seperjuangan teknik mesin PPSE'09 yang telah ikut berkontribusi dalam pembuatan skripsi ini.

Depok, 16 Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Iswanto Purnomo

NPM : 0906604861

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

***PENGARUH TEMPERATUR EVAPORASI SIRKUIT TEMPERATUR
TINGGI PADA SISTEM REFRIGERASI CASCADE YANG
MENGUNAKAN REFRIGERAN CAMPURAN ETHANE DAN KARBON
DIOKSIDA***

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

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 16 Januari 2012

Yang menyatakan,


(Iswanto Purnomo)

ABSTRAK

Nama : Iswanto Purnomo
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengaruh Temperatur Evaporasi Sirkuit Temperatur Tinggi pada Sistem Refrigerasi Cascade yang Menggunakan Refrigeran Campuran Ethane dan Karbon Dioksida

Cold storage untuk kebutuhan biomedis disyaratkan dapat mencapai -80°C dan untuk itu digunakan sistem refrigerasi cascade (Tianing et al, 2002). Sistem refrigerasi cascade masih menggunakan refrigeran CFC dan HCFC. Campuran azeotropis karbondioksida dan ethane merupakan refrigeran alternatif yang menjanjikan. Studi simulasi dan eksperimen mengindikasikan campuran karbondioksida dan ethane mampu mencapai temperatur -80°C (Darwin et.al, 2008). Namun demikian, temperatur minimum tersebut masih belum stabil. Hal ini diduga karena pengaruh temperatur evaporasi High Stage /HS yang tidak optimal dalam mengalirkan panas ke sistem Low Stage. Berdasarkan hal tersebut maka penelitian ini akan berkonsentrasi pada pengaruh temperatur evaporasi terhadap kerja sistem cascade dengan variasi pembebanan.

Kata kunci : azeotrop; cold storage; cascade; karbondioksida; ethane; mass fraction

ABSTRACT

Name : Iswanto Purnomo
Programme : Mechanical Engineering
Topic : Effect of Evaporation Temperature Circuit High
Temperatures on the Cascade Refrigeration System
Using CO₂ Refrigerant Mixture Ethane and Carbon
Dioxide

Cold storage for biomedical needs required to achieve *-80 ° C* and used for cascade refrigeration system (*Tianing et al, 2002*). Cascade refrigeration system is still using CFC and HCFC refrigerants. Azeotropic mixture of carbon dioxide and Ethane is a promising alternative refrigerants. Simulation and experimental studies indicate a mixture of carbon dioxide and Ethane capable of reaching temperatures *-80 ° C* (*Darwin et.al, 2008*). However, the minimum temperature is still not stable. This is presumably because the effect of temperature evaporation Stage High / HS that is not optimal in transferring heat to Low Stage system. Based on these two studies will concentrate on the effect of temperature on the evaporation cascade system works with a variety of loading.

Keywords : azeotrop; cold storage; cascade; carbon dioxide; ethane

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT ..	vii
DAFTAR ISI.	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Refrijerasi dan Sistem Refrijerasi	7
2.2 Sistem Refrijerasi	8
2.3 Sistem Refrijerasi Cascade	11
2.4 Alat Penukar Kalor	12
2.5 Refrijeran.....	15
BAB 3 METODA PENELITIAN	
3.1 Alat dan Koponen Pengujian	22
3.2 Tes Kebocoran	39
3.3 Vaccum System.....	40
3.4 Charging System	40
3.5 Metode Pengambilan Data	42
BAB 4 ANALISA DATA	
4.1 Properties Refrijeran pada Sirkuit Temperatur Rendah (LS).....	44
4.2 Analisa Grafik	45
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.2 Kesimpulan	51
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Siklus Kompresi Uap	7
Gambar 2.2 Komponen Utama Sistem Refrijerasi Uap	8
Gambar 2.3 Jenis-jenis <i>Expansion Vvalve</i>	12
Gambar 2.4 Sistem Refrijerasi Cascade Dua Tingkat.....	13
Gambar 2.5 Alat Penukar Kalor <i>Shell and Tube Heat Exchanger</i>	14
Gambar 2.6 Alat Penukar Kalor <i>Plate Heat Exchanger</i>	14
Gambar 2.7 Diagram Fase Tekanan-Temperatur CO ₂	18
Gambar 2.8 Diagram Fase T-x Campuran Zeotropes	20
Gambar 2.9 Diagram Fase T-x Campuran Azeotropes.....	20
Gambar 3.1 Skematik Diagram Pada Sistem Refrijerasi <i>Cascade</i>	22
Gambar 3.2 Wiring Diagram Pada Sistem Refrijerasi Cascade.....	23
Gambar 3.3 Condensing Unit <i>High Stage</i>	24
Gambar 3.4 Condensing Unit <i>Low Stage</i>	24
Gambar 3.5 Kondensor Pada Condensing Unit	25
Gambar 3.6 <i>Cascade Heat Exchanger</i>	26
Gambar 3.7 Alat Ekspansi	27
Gambar 3.8 <i>Filter Dryer</i>	27
Gambar 3.9 <i>Akumulator</i>	28
Gambar 3.10 <i>Oil Separator</i>	29
Gambar 3.11 Pipa Tembaga.....	30
Gambar 3.12 <i>Shut Off Valve</i>	30
Gambar 3.13 <i>Evaporator Low Stage</i>	31
Gambar 3.14 <i>Pressure Gauge</i>	32
Gambar 3.15 <i>Pressure Transmitter</i>	32
Gambar 3.16 Termokopel	33

Gambar 3.17 Coriolis	34
Gambar 3.18 Panel Listrik	35
Gambar 3.19 Unit Komputer.....	36
Gambar 3.20 Tampilan I dan <i>Block Diagram Labview</i>	36
Gambar 3.21 <i>National Instrument</i>	37
Gambar 3.22 <i>Power Supply</i>	38
Gambar 3.23 Tabung Refrijeran R290.....	39
Gambar 3.24 Tabung Refrijeran R 744 dan R 170	39
Gambar 3.25 Pompa Vakum.....	40
Gambar 3.26 Timbangan Digital	41
Gambar 3.27 Skema Diagram Metodologi Penelitian Perbandingan Tekanan Ekspansi <i>High Stage</i> Pada <i>Low Stage</i> Pada Sistem Refrijerasi Cascade.....	42
Gambar 4.1 Diagram T-s sistem Refrijerasi Cascade	45
Gambar 4.2 Diagram p-h sistem Refrijerasi Cascade	45
Gambar 4.3 Grafik Temperatur Evaporasi HS Terhadap Laju Aliran Massa.....	47
Gambar 4.4 Grafik Temperatur Evaporasi terhadap Temperatur Out PHE.....	48
Gambar 4.5 Grafik Temperatur Evaporasi Terhadap COP	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Pilihan Refrijeran Pengganti Alternatif Untuk CFC.....	17
Tabel 3-1 Spesifikasi Kompresor pada Condensing Unit	24
Tabel 3-2 Spesifikasi Kondensor pada Condensing Unit	25
Tabel 3-3 Spesifikasi Heat Exchanger	26
Tabel 3-4 Spesifikasi Alat Ekspansi	27
Tabel 3-5 Spesifikasi Filter Dryer.....	28
Tabel 3-6 Spesifikasi Akumulator	29
Tabel 3-7 Spesifikasi Oil Separator	29
Tabel 3- 8 Spesifikasi Evaporator	31
Tabel 3-9 Spesifikasi Pressure Gauge.....	32
Tabel 3-10 Spesifikasi Pressure Transmitter.....	33
Tabel 3-11 Spesifikasi Termokopel	34
Tabel 3-12 Spesifikasi Coriolis.....	34
Tabel 3-13 Spesifikasi Panel Listrik	35
Tabel 3-14 Spesifikasi Komputer.....	36
Tabel 3-15 Spesifikasi National Instrument.....	38
Tabel 3-16 Spesifikasi Power Supply	38
Tabel 4-1 Critical Properties Refrijeran Campuran R744/R170.....	45
Tabel 4-1 Properties dari Karbon dioksida dan Ethane	45

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini kemajuan teknologi berkembang sangat pesat dalam kehidupan manusia. Salah satu teknologi tersebut adalah alat pengkondisian udara atau yang biasa disebut dengan sistem refrigerasi. Pada hakekatnya refrigerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi dan memindahkan kalor tersebut ke suatu medium tertentu yang bertemperatur lebih rendah sehingga didapatkan tercapainya suatu temperatur dan dipertahankannya temperatur tersebut dibawah temperatur lingkungan.

Pada awalnya refrigerasi sudah digunakan manusia sejak zaman dahulu kala, yaitu dengan menggunakan gumpalan es yang disimpan pada musim dingin dan digunakan pada musim panas.

Seiring dengan kemajuan teknologi, sistem refrigerasi terus mengalami perkembangan. Hingga kini pemanfaatan dari refrigerasi dapat dinikmati hampir dalam semua aspek kehidupan. Contohnya, pemanfaatan efek refrigerasi pada suatu gedung atau ruangan perkantoran dalam memberikan kenyamanan kepada penghuninya ataupun dalam suatu industri untuk menjaga kualitas proses dan produksinya.

Dalam beberapa bidang industri seperti, pengawetan makanan, perminyakan, pengolahan bahan kimia, dibutuhkan temperatur ruangan yang sangat rendah berkisar dari -30°C hingga -50°C . Bahkan dalam kegiatan biomedis dibutuhkan temperatur yang lebih rendah lagi hingga -80°C .

Untuk mendapatkan kondisi tersebut dapat kita gunakan sistem refrigerasi satu tingkat yang menggunakan satu kompresor, sistem bertekanan banyak menggunakan lebih dari satu kompresor seperti yang terdapat pada sistem refrigerasi bertingkat (*multistage*) atau kombinasi dua atau lebih sistem refrigerasi

tunggal (*cascade*) dimana satu sistem sebagai *high-stage* (HS) dan lainnya sebagai *low-stage* (LS).

Dalam kegiatan dan penelitian biomedis yang menuntut dibutuhkannya *cold storage* bertemperatur sangat rendah, disyaratkan mencapai temperatur -80°C , sebagai tempat penyimpanan spesimen biomedis dalam jangka waktu lama. Penggunaan sistem refrigerasi 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 bertekanan banyak yang menggunakan lebih dari satu kompresor seperti yang terdapat pada sistem refrigerasi bertingkat (*multi stage*) atau kombinasi dua atau lebih sistem refrigerasi tunggal (*cascade*).

Sistem refrigerasi *cascade* minimal terdiri dari dua sistem refrigerasi yang bekerja secara mandiri. Dua sistem refrigerasi ini dihubungkan penukar kalor *cascade* di mana kalor yang dilepaskan kondenser di sistem temperatur rendah (*low-stage temperature/LS*) diserap evaporator dari sistem temperatur tinggi (*high-stage temperature/HS*).

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

Selama ini CFC (*chlorofluorocarbon*) dan HCFC (*hydrochlorofluorocarbon*) digunakan secara luas sebagai refrigeran. Hal ini dikarenakan CFC mempunyai banyak keuntungan pada berbagai segi, seperti memiliki properti thermal dan fisik yang baik sebagai refrigeran, tidak mudah terbakar, tidak beracun, sesuai untuk sebagian besar komponen sistem refrigerasi dan ekonomis. Tetapi ternyata disisi lain, CFC belakangan diketahui bertanggung jawab terhadap penipisan lapisan ozon yaitu dengan dilepaskannya atom klorin ke atmosfer (Nasruddin et al., 2006). Sehingga diperlukan dengan segera refrigeran alternatif sebagai pengganti yang ramah lingkungan.

Untuk mengalirkan kalor dari *high stage* ke *low stage* diperlukan alat penukar panas. Alat penukan panas yang digunakan adalah *Plate Heat Exchanger*.

Universitas Indonesia

Perubahan temperatur evaporasi *high stage* akan mempengaruhi COP dari sistem cascade. Sehingga perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui temperatur evaporasi optimal dengan nilai COP yang tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Pada sistem refrigerasi cascade evaporator merupakan salah satu alat penukar panas yang memiliki pengaruh besar terhadap kapasitas pendinginan dan COP sistem. Peningkatan kinerja mesin refrigerasi cascade salah satu diantaranya ditentukan oleh efektifitas alat penukar kalor. Dimana alat penukar kalor merupakan bagian terpenting yang digunakan untuk mengalirkan panas yang akan diserap oleh sistem *low stage* dan juga untuk mengetahui seberapa besar pengaruh temperatur evaporasi terhadap kerja sistem.

1.3 Tujuan Penelitian

Penulisan skripsi ini memiliki tujuan :

- Mengetahui pengaruh temperatur evaporasi sirkuit temperatur tinggi terhadap kerja sistem.

1.4 Batasan Masalah

Hal yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah kecenderungan perubahan tekanan out kapiler HS yang mempengaruhi temperatur evaporator dan nilai COP dari sistem refrigerasi *cascade*, dengan asumsi dan batasan sebagai berikut :

1. Refrigerasi yang digunakan adalah propane pada *high stage* (HS) sebesar 1200 gram dan campuran carbondioksida (CO_2) sebesar 60 gram dan ethane (C_2H_6) sebesar 140 gram pada *low stage* (LS).
2. Katup ekspansi pada *high stage* menggunakan *needle valve*.
3. Katup ekspansi di *low stage* menggunakan pipa kapiler diameter 0.064 inch dengan panjang yang divariasikan 1 (satu), 3 (tiga), dan 6 (enam) meter.
4. Variasi beban yang digunakan pada kabin evaporator low stage adalah 20, 40, dan 60 Watt.

5. Jenis kompresor *high stage* dan *low stage* yang digunakan adalah jenis kompresor untuk refrigeran R-22.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses pengumpulan informasi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku, jurnal yang berasal dari dosen maupun perpustakaan.

2. Membuat Sistem Refrigerasi *Cascade*

Pembuatan ini meliputi rancang bangun sistem pemipaan dan alat ukur tekanan dan temperatur serta pemasangan *Condensing unit* (kompresor, kondenser, *liquid receiver*), akumulator, alat penukar kalor (*Plate Heat Exchanger*) dan evaporator pada bagian *High-Stage* dan *Low-Stage*, tabung coriolis dan *filter dryer*.

3. Pengadaan Alat

Proses ini meliputi persiapan dan pembelian terhadap alat-alat yang dibutuhkan untuk melakukan pengujian diantaranya tabung coriolis dengan merk Yokogawa W1010, pipa, kawat las, termokopel, *pressure transmitter*, *pressure gauge*, termokopel, perekat armalflek, panel listrik, *condensing unit*, kabel-kabel, amperemeter, voltmeter, satu set komputer, seperangkat *Data Acquisition System* (DAQ) merk *NationalInstrument* (NI) 9211 dan 9203, timbangan digital, mesin vakum, dan refrigeran R290/R744

4. Kalibrasi Alat Uji

Kalibrasi adalah membandingkan alat ukur yang akan kita gunakan dengan alat ukur standar, sebelum pengujian dilakukan dilakukan kalibrasi terhadap alat ukur tekanan dan temperatur agar data yang dihasilkan lebih akurat.

5. Pengecekan sistem

Setelah semua alat terpasang pada sistem proses selanjutnya adalah pengecekan yang meliputi tes kebocoran, vakum, dan pengetesan kelistrikan.

6. Pengujian sistem

Pengujian dilakukan dengan memantau data dari alat ukur seperti *pressure gauge*, *pressure transmitter*, *National Instrument*, powermeter, amperemeter, dan voltmeter. Proses pengujian ini meliputi pengambilan data pada alat ukur.

7. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

Data yang didapatkan dari pengujian kemudian diolah dan dianalisa. Dari analisa tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian.

1.6 Sistematika Penulisan

Agar laporan tugas akhir ini memiliki struktur yang baik dan tujuan penulisan dapat tercapai dengan baik, maka penulisan tugas akhir ini akan mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi tentang latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori meliputi: dasar teori tentang sistem refrigerasi dan dasar pemilihan refrigeran. Dasar teori yang ada di kutip dari beberapa buku dan referensi lain yang mendukung dalam penulisan ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang deskripsi alat pengujian yang digunakan, metode persiapan dan metode pengambilan data yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bagian ini berisikan data-data dan analisa dan hasil yang diperoleh dari proses pengambilan data dan pengujian.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil percobaan dan beberapa saran yang diberikan untuk perbaikan pada percobaan yang akan datang.



BAB 2

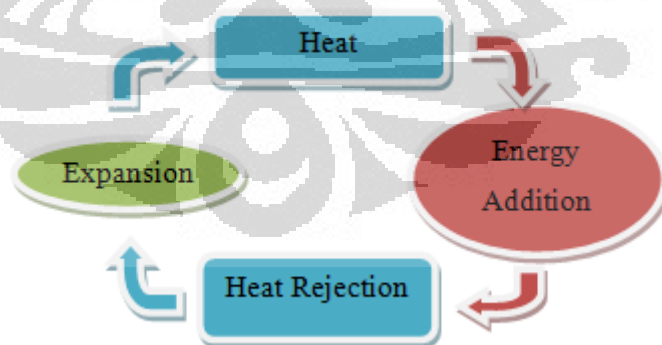
DASAR TEORI

2.1 Refrijerasi dan Sistem Refrijerasi

Pada dasarnya refrijerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi dan memindahkan kalor tersebut ke suatu medium tertentu yang bertemperatur lebih rendah sehingga didapatkan tercapainya suatu temperatur dan dipertahankannya temperatur tersebut dibawah temperatur lingkungan. Penyerapan serta pemindahan kalor ini menggunakan kemampuan *heat transfer* dari suatu medium yang disebut refrijeran.

Untuk mempertahankan temperatur pada suatu ruangan, penyerapan kalor oleh suatu sistem refrijerasi harus dilakukan secara terus menerus atau *continue* dan 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 dan dapat beroperasi secara *continue*.

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



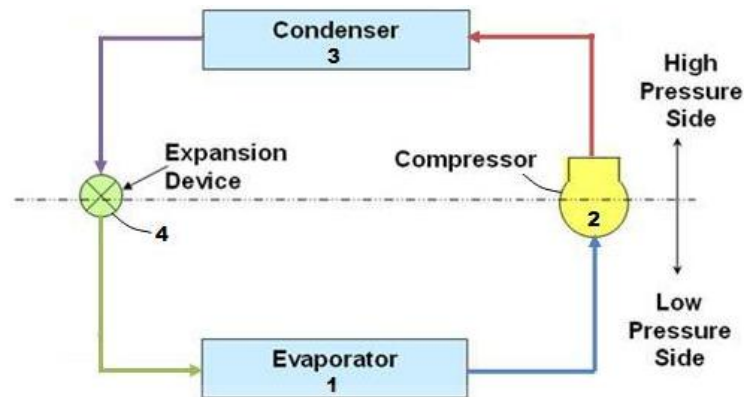
Gambar 2. 1 Siklus Kompresi Uap

- *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, refrigeran juga tetap menerima kalor sehingga temperaturnya juga akan meningkat. Jadi pada proses ini refrigeran berubah fase dari cair dengan temperatur rendah menjadi uap dengan temperatur tinggi.

- *Energy Addition* : Penambahan energi terhadap refrijeran, agar dapat menuju proses berikutnya. Refrigeran 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 refrigerasi. Selama proses pelepasan kalor, temperatur dari refrigeran 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 fase cair dengan temperatur rendah. Dalam kondisi ini refrigeran siap untuk menyerap kalor dan memulai siklus kembali.

2.2 Sistem Refrijerasi



Gambar 2. 2 Komponen Utama Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Sumber: www.energyefficiencyasia.org

Komponen utama dalam sistem refrijerasi kompresi uap sederhana siklus tunggal seperti yang digambarkan pada gambar II.2.diatas adalah:

1. Evaporator : Evaporator adalah jenis dari penukar kalor (*heatexchanger*) sebagai media pemindahan kalor melalui permukaan evaporator agar refrigeran cair menguap dan menyerap panas dari suatu ruangan. Refrigeran yang berada dalam fase campuran cair jenuh dan uap menyerap kalor sehingga berubah menjadi uap. *Heattransfer* 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 refrigeran 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.

Universitas Indonesia

3. Kondenser : Kondenser adalah suatu alat penukar kalor dimana refrigeran melepas atau membuang kalor ke media pendingin seperti udara atau air. Refrigeran didalam kondenser berada pada keadaan uap super panas melepas kalor sehingga berubah fase menjadi cair. Untuk membuang kalor yang terkandung dalam refrigeran yang berada didalam kondenser diperlukan cooling medium. Sebuah kondenser harus mampu membuang kalor tersebut ke *coolingmedium* yang digunakan oleh kondensernya. Sesuai dengan jenis *coolingmedium* yang digunakan maka kondenser dapat dibedakan menjadi 3 (tiga), yaitu:
- a. *air cooled condenser*, menggunakan media udara sebagai pendinginnya.
 - b. *Water cooled condenser*, menggunakan media air sebagai pendinginnya.
 - c. *Evaporative condenser*, menggunakan media campuran air dan udara sebagai pendinginnya.
4. *Expansion Device* : Refrigeran pada fase cair dari kondenser yang akan diuapkan di evaporator dikontrol oleh alat ekspansi. Refrigeran 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 *expansiondevice* adalah :
- a. Untuk menakar refrigeran 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 refrigeran cair yang diuapkan di evaporator selalu berada pada tekanan rendah sesuai yang diinginkan dan sekaligus menjaga tekanan tinggi di sisi kondenser.

Universitas Indonesia

Ada 6 (enam) macam alat ekspansi, yaitu :

1. *Manual Expansion Valve*

Beban pendinginan yang diinginkan diatur melalui katup ekspansi yang diatur secara manual.

2. *Capillary Tubes* (Pipa kapiler)

Pipa kapiler adalah pipa panjang dengan diameter kecil dan konstan, berfungsi untuk menurunkan tekanan.

3. *Automatic Expansion Valve* (AEV)

Disebut juga katup ekspansi tekanan konstan, dimana katup digerakkan oleh tekanan didalam evaporator, supaya menjaga tekanan didalam evaporator konstan.

4. *Thermostatic Expansion Valve* (TEV)

Jumlah aliran refrijeran diatur secara otomatis yang menyesuaikan dengan beban pendinginannya. Dengan sensor temperatur yang dipasang setelah evaporator maka jumlah aliran refrijeran dapat diatur secara otomatis.

5. *Float Type Expansion Valve* :

a) *High side float valve*

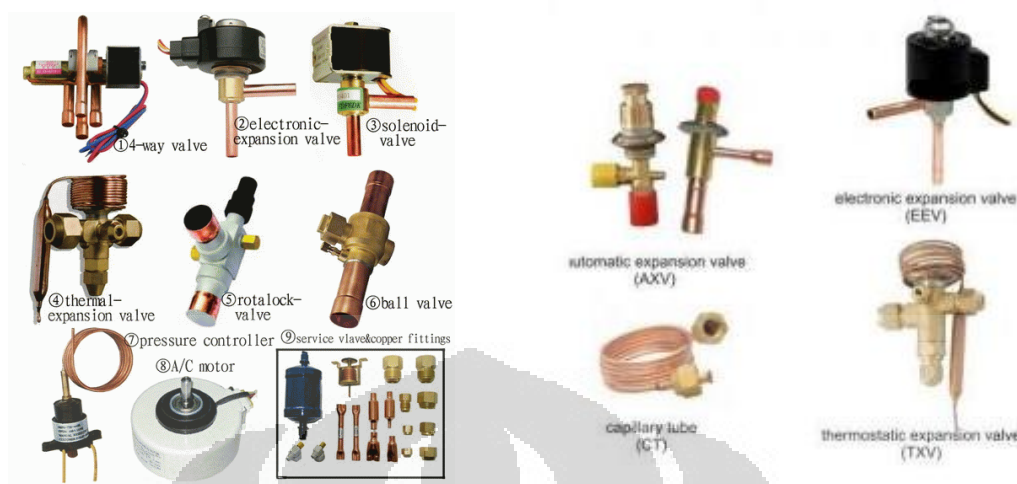
Pelampung diletakkan pada bagian sisi tekanan tinggi dari sistem, yaitu pada saluran cairan (*liquid line*).

b) *Low side float valve*

Pelampung diletakkan pada bagian sisi tekanan rendah dari sistem, yaitu didalam tabung evaporator.

6. *Electronic Expansion Valve*

Jumlah aliran refrijeran diatur secara otomatis menyesuaikan beban pendinginannya dengan menggunakan arus listrik dan sensor yang dipasang setelah evaporator.

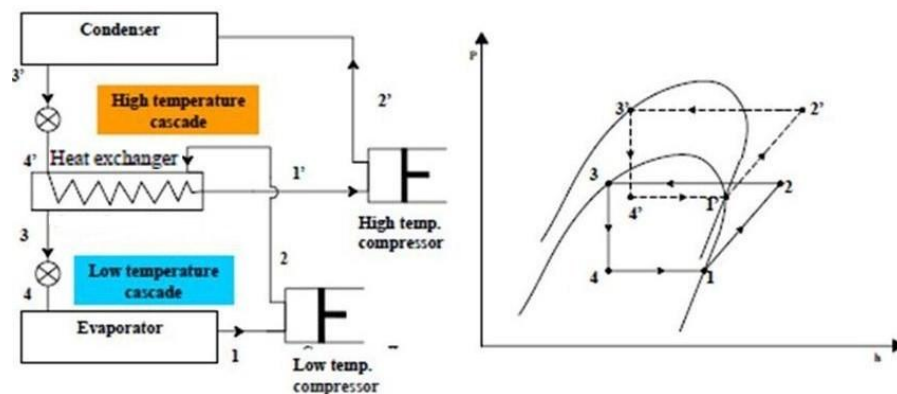


Gambar 2. 3 Jenis-jenis expansion valve

2.3 Sistem Refrijerasi Cascade

Pada beberapa bidang industri dan kegiatan biomedis dibutuhkan temperatur pendinginan yang sangat rendah. Penelitian jaringan sel kanker payudara misalnya, agar tidak rusak maka harus disimpan dalam *freezer* -80°C (Tianing, 2002). Untuk mencapai temperatur pendinginan yang sangat rendah tersebut maka dibutuhkan pula perbedaan tekanan yang sangat tinggi, yang berarti kerja kompresor yang semakin berat. Perbedaan tekanan yang sangat tinggi yang dimiliki kompresor mengakibatkan efisiensi dari sistem refrijerasi tersebut menjadi rendah. Sehingga diperlukan sistem refrijerasi yang mempunyai dua atau lebih siklus refrijerasi.

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. 4 Sistem Refrigerasi Cascade Dua Tingkat

(Sumber: Refrigerant & Air Conditioning, EE IIT, Kharagpur, India)

Pada gambar 2.4 di atas, dua siklus refrigerasi kompresi uap dihubungkan dengan suatu *heat exchanger*. *Heat exchanger* tersebut berfungsi sebagai evaporator pada siklus yang pertama (*High Temperature 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.

2.4 Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor adalah alat yang dibuat untuk memindahkan kalor dari satu fluida ke fluida yang lain. Pada umum fluida tersebut di pisahkan oleh dinding sehingga keduanya tidak dapat tercampur. Alat penukar kalor secara luas digunakan pada mesin refrigerasi, pembangkit listrik (*Power Plants*), industri kimia, industri perminyakan dan masih banyak lagi peralatan yang menggunakannya ([Wikipedia.org/heat exchanger.htm](http://Wikipedia.org/heat%20exchanger.htm), 2-3- 2009).

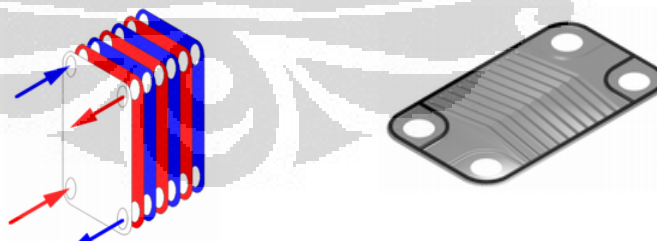
Perbandingan kinerja mesin refrijerasi siklus tunggal dan cascade dilakukan oleh Hoşöz (2004) didapatkan bahwa kinerja (diukur dalam COP/*coefecient of performance*) mesin refrigerasi cascade ternyata lebih rendah dibandingkan siklus tunggal karena kerugian kalor di alat penukar kalor. Analisa termodinamika pengaruh alat penukar kalor terhadap kinerja optimum mesin refrijerasi cascade karbon dioksida dan ammonia yang dilakukan oleh Gettu et.al (2008) diperoleh

hasil bahwa COP maksimum diperoleh pada temperatur alat penukar kalor tertentu dengan beda temperatur seminimal mungkin. Untuk meningkatkan efisiensi, alat penukar kalor dirancang untuk memaksimalkan luas permukaan dinding antara dua fluida, sementara itu hambatan aliran fluida yang melintasi alat penukar kalor yang menyebabkan turunnya tekanan (*pressure drop*) harus ditekan seminimal mungkin. Pada perkembangannya ada dua jenis alat penukar kalor yang sering digunakan di industri yakni alat penukar kalor *shell and tube* dan *plate* (Wikipedia.org/heat_exchanger.htm, 2-3- 2009).

Alat penukar kalor *shell and tube* (*shell and tube heat exchanger*) yang paling sederhana terdiri dari sebuah pipa yang diletakkan kosentris (sesumbu) didalam pipa lainnya yang merupakan cangkang untuk susunan ini seperti yang terlihat pada gambar 3 (Kreith, 1994).alat penukar kalor *shell and tube* merupakan alat penukar kalor yang paling umum digunakan di industri. Walaupun dimensinya cukup besar, alat penukar kalor jenis ini dikenal handal dan sangat sesuai untuk operasi pada tekanan tinggi (Saunders, 1988).



Gambar 2.5 Alat penukar panas *shell and tube heat exchanger*



Gambar 2.6 Alat penukar panas *plate heat exchanger* diagram konseptual *plate heat exchanger* dan plat tunggal dari *plate heat exchanger*

Alat penukar kalor plat (*Plate heat exchanger*) terdiri dari serangkaian plat-plat tipis yang mempunyai saluran-saluran aliran zat cair sehingga memiliki luas

permukaan yang sangat besar untuk perpindahan kalor seperti yang terlihat pada gambar 4. *Plate heat exchanger* dapat lebih efektif dalam segi ukuran (dimensi lebih kecil) dibanding alat penukar kalor *shell and tube*. Kemajuan teknologi gasket membuat penggunaan alat penukar kalor jenis ini terus meningkat (Wikipedia.org/heat_exchanger.htm, 2-3- 2009).

Pada alat penukar kalor proses perpindahan kalor yang terjadi adalah kondensasi (pengembunan) pada salah satu fluida dan pada fluida yang lain terjadi evaporasi (penguapan) sehingga perbedaan temperatur antara kedua fluida senantiasa konstan. Namun, koefisien perpindahan kalor rata-rata laten (dengan perubahan fasa) jauh lebih rumit dibandingkan sensible (tanpa perubahan fasa) karena berkaitan dengan variabel-variabel seperti geometri mesin, viskositas, kerapatan dan konduktivitas thermal (Kreith, 1994). Pada mesin refrigerasi cascade penggunaan alat penukar kalor, baik alat penukar kalor *shell and tube* (Niu, 2008 dan Nasruddin, 2009) maupun alat penukar kalor *plate* (Fernandez-seara, 2007) telah diaplikasikan. Studi simulasi menentukan temperatur optimal alat penukar kalor oleh Lee (2006) hanya terbatas untuk mesin refrijerasi cascade dengan refrijeran ammonia dan karbondioksida. Namun, pengaruh jenis ke dua jenis alat penukar kalor tersebut terhadap kinerja mesin apabila digunakan pada sebuah mesin refrigerasi cascade masih sangat sedikit yang melakukannya.

2.5 Refrijeran

Dalam suatu sistem refrigerasi, dibutuhkan media yang digunakan untuk menyerap, memindahkan dan 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, sebagian dari persyaratan tersebut tidak secara langsung berhubungan dengan kemampuannya pada perpindahan kalor. Stabilitas kimia pada beberapa kondisi tertentu saat digunakan merupakan karakteristik yang paling penting. Beberapa sifat yang berhubungan dengan keamanan refrijeran seperti tidak mudah terbakar (*non-flammable*) dan tidak beracun saat digunakan merupakan sifat yang juga

Universitas Indonesia

dibutuhkan. Harga, ketersediaan, efisiensi, dan kecocokan dengan pelumas kompresor dan bahan-bahan dari komponen-komponen sistem refrijerasi juga harus diperhatikan. Pengaruh refrijeran terhadap lingkungan apabila refrijeran tersebut bocor dari suatu sistem harus pula dipertimbangkan.

Selama ini CFC (*chloro-fluoro-carbon*) dan HCFC (*hydro-chloro-fluoro-carbon*) digunakan secara luas sebagai refrijeran. Hal ini dikarenakan CFC mempunyai banyak keuntungan pada berbagai segi, seperti memiliki properti thermal dan fisik yang baik sebagai refrijeran, tidak mudah terbakar, tidak beracun, sesuai untuk sebagian besar komponen sistem refrijerasi dan ekonomis. Tetapi ternyata disisi lain, CFC belakangan diketahui bertanggung jawab terhadap penipisan lapisan ozon yaitu dengan dilepaskannya atom klorin ke atmosfer (Nasruddin et al., 2006). Sehingga diperlukan dengan segera refrijeran alternatif sebagai pengganti yang ramah lingkungan.

Pada sistem refrijerasi cascade, di sirkuit temperatur tinggi digunakan refrijeran yang umum digunakan yakni ammonia (R717), Propane (R290), Propylene (R1270), Isobutan (R600a) atau R404A (Gettu, 2008). Untuk temperatur kerja 15°C s/d -25°C , Isobutane (R600a) merupakan pilihan refrijeran yang menghasilkan kinerja tertinggi bila digunakan di sirkuit temperatur tinggi (Nasruddin, 2009). Sedangkan untuk temperatur rendah -40°C s/d -70°C , dipilih refrijeran tekanan tinggi dengan densitas uap tinggi (ASHRAE Handbook, 2006). Tetapi hanya sedikit refrijeran yang memenuhi syarat ini. Selama ini umumnya R13 dan R503a yang dipakai namun, refrijeran ini merupakan refrijeran CFC, yang menurut Protokol Montreal pada 2010 tidak dapat dipergunakan lagi.

Semenjak disepakatinya protokol Montreal dan Kyoto, terdapat dua kriteria yang harus dipenuhi suatu jenis refrijeran agar dapat digunakan secara aman dan komersial. Dua kriteria tersebut adalah ODP (*Ozone Depletion Potential*) merupakan nilai yang menunjukkan potensi suatu jenis refrijeran terhadap kerusakan ozon dan GWP (*Global Warming Potential*) merupakan nilai yang menunjukkan potensi suatu jenis refrijeran terhadap pemanasan global.

Tabel 2.1 Pilihan refrijeran pengganti alternatif untuk CFC

Refrigerant	Composition	Normal Boiling Point (NBP) (°C)*	Ozone Depletion Potential (ODP) (R11=1)	Global Warming Potential (GWP) (CO ₂ =1)	Retrofit or New
Example Candidate Replacements for CFC-11					
CFC-11		23.8	1.0	3800	
HCFC-123		27.9	0.020	90	Both
HCFC-141b		32.2	0.110	630	New
HFC-245fa		15.3	0	900	New
n-pentane		36.19	0	0	Both
Example Candidate Replacements for CFC-114					
CFC-114		3.78	0.8	9300	
HCFC-124		-13.2	0.022	480	Both
HFC-134		4.67	0	1300	New
R600		-0.45	0	0	Both
Example Candidate Replacements for CFC-12					
CFC-12		-29.79	1	8100	
HFC-134a		-26.1	0	1300	New
R401A	R22/152a/124 (53/13/34)	-33.0/6.3	0.037	1100	Both
R409A	R22/124/142b (60/25/15)	-34.3/8.5	0.048	1400	Both
propane-ethane	R290/170 (43/57)	-31.9/7.9	0	3	Both
Example Candidate Replacements for HCFC-22					
HCFC-22		-40.75	0.055	1700	
R407C	R32/125/134a (23/25/52)	-44.0/7.2	0	1600	Both
R410A	R32/125	-52.7/-0.1	0	1900	New
	R23/32/134a	-43.0/10.2	0	1600	New
propane-ethane	R290/170 (95/5)	-49.3/7.9	0	3	Both
Example Candidate Replacements for R502					
R502	CFC115/HCFC22 (48.8/51.2)	-45.6 azeo		5500	
R404a	R125/143a/134a (44/52/4)	-46.5/0.8	0	3700	Both
R507	R125/143a (50/50)	-46.7 azeo	0	3800	Both
	R32/125/143a (10/45/45)	-49.7/0.9	0	3500	Both
propane-ethane	R290/170 (95/5)	-49.3/7.9	0	3	Both
Other Options - Natural Refrigerants					
Air			0	0	
Water			0	?	
Ammonia			0	0	
Carbon dioxide			0	1	

* or bubble point / temperature glide for mixtures. Temperature glide = $T_{\text{dew}} - T_{\text{bubble}}$

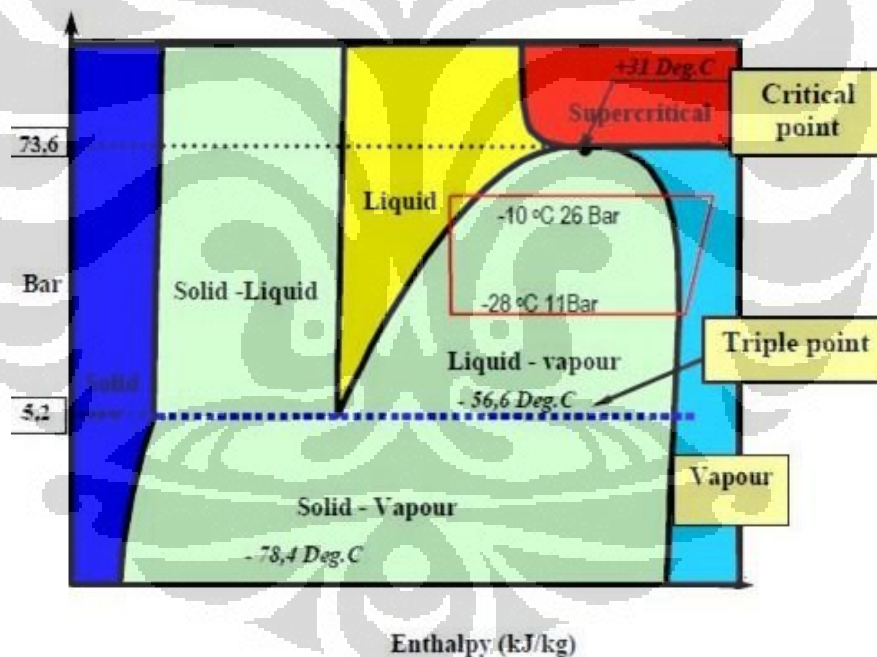
(Sumber: Refrigerant & Air Conditioning, EE IIT, Kharagpur, India)

Penggunaan refrijeran alternatif golongan HFC (*Hydro-fluoro-carbon*) seperti R23, R508B dan R508A untuk menggantikan R13 untuk jangka panjang kini sedang dipertanyakan. Hal ini berkaitan dengan kontribusi HFC terhadap efek rumah kaca (Wu, 2007). Oleh karena itu, untuk jangka panjang perlu dicari refrijeran alternatif baru bebas terhadap zat halogen yang diarahkan pada penggunaan refrijeran-refrijeran alamiah semisal karbondioksida (CO₂), amonia atau hidrokarbon.

Selain ramah terhadap lingkungan, karbondioksida dirasa masih lebih menguntungkan dibandingkan dengan amonia atau hidrokarbon. Hal ini

dikarenakan refrijeran karbondioksida tidak mudah terbakar, tidak mengandung racun, murah dan sesuai dengan pelumas dan peralatan pada sistem refrijerasi.

Namun demikian, penggunaan karbondioksida sebagai refrijeran dibatasi oleh tingginya tekanan dan tingginya temperatur *triple* (5,2 bar dan $-56,6^{\circ}\text{C}$). Karbondioksida cair terbentuk hanya pada tekanan di atas 5.1 atm (abs). Tekanan dan temperatur dalam sistem refrijerasi tidak boleh lewat dibawah tekanan dan temperatur *triple* (gambar II.4.), apabila CO_2 berada dibawah tekanan dan temperatur *triple* maka karbondioksida akan berubah secara langsung dari fase gas ke fase padat yang disebut deposisi atau dari fasa padat ke fasa gas melalui sublimasi (terbentuk *dry ice*) dan hal ini tidak diinginkan. Hal inilah yang menghalangi penggunaan karbondioksida untuk bagian temperatur rendah pada sistem refrijerasi cascade. Solusi untuk mengatasi kekurangan ini diantaranya adalah dengan mencampurkan karbondioksida dengan refrijeran yang lain.



Gambar 2.7 Diagram Fase Tekanan-Temperatur CO_2

sumber: wikipedia.org/carbondioxide.htm

Menurut Cox (2007), performa terbaik refrigeran hidrokarbon dapat di representasikan dengan parameter-parameter sebagai berikut:

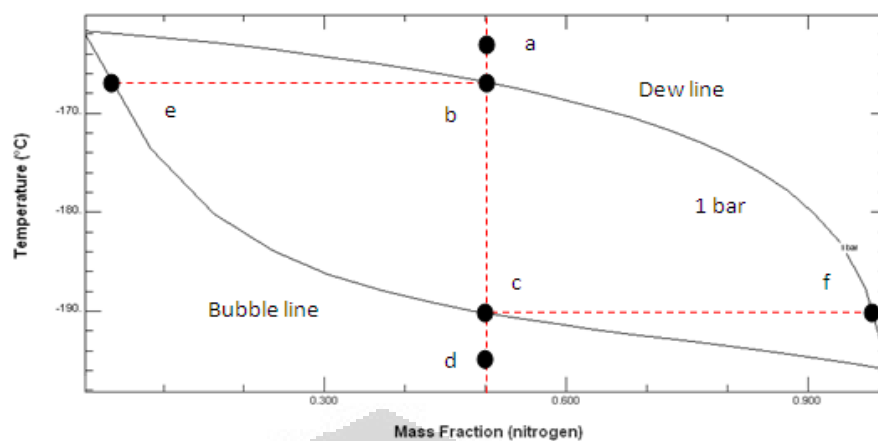
- Rasio kompresi yang rendah (dalam kaitan dengan tekanan pengisapan (*suction*) tinggi dan rendahnya tekanan *discharge* pada temperatur operasi)
- Tingginya angka pemindahan kalor yang pada alat penukar kalor (karena properti yang baik dari cairan *fluid thermal* dan transport)
- Berkurangnya kerugian tekanan pada sistem (karena rendahnya densitas dan viskositas refrijeran)

Hidrokarbon lebih baik dari refrijeran HFC dalam semua aspek selain dari *flammabilitas* (mudah terbakar). Hal inilah yang menyebabkan hidrokarbon tidak digunakan secara luas. Solusi untuk mengatasi kekurangan ini diantaranya adalah dengan mencampurkan karbondioksida dengan refrijeran yang lain seperti porpane. Sehingga resiko *flammabilitas* (mudah terbakar) dapat dikurangi seiring dengan dikurangnya penggunaan hidrokarbon.

Campuran refrijeran secara luas dapat digolongkan ke dalam dua kelompok berdasarkan perubahan suhu selama proses kondensasi atau penguapan yaitu :

1. Campuran zeotropis

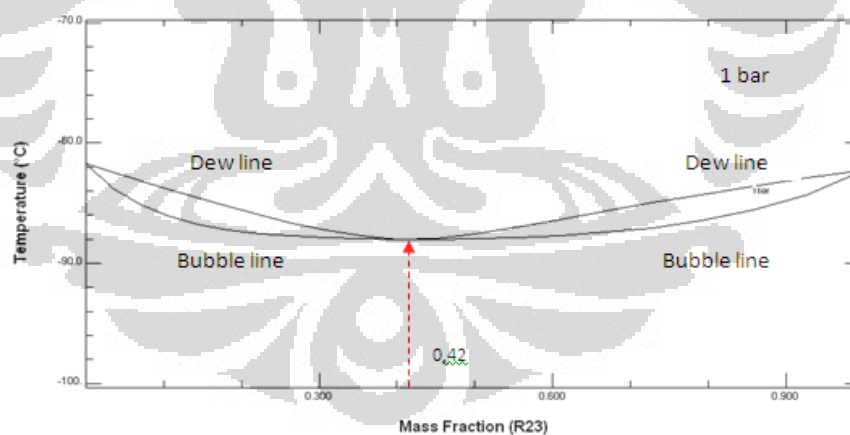
Contoh campuran zeotropes antara nitrogen dan methane. Pada saat nitrogen memiliki fraksi 0,5 , campuran dalam keadaan superheated vapor pada titik a, saturated vapor pada titik b, saturated liquid pada titik c dan subcooled liquid pada titik d. Komposisi equilibrium dari vapor dan liquid akan berbeda pada wilayah 2 fase. Contohnya saat fraksi dari vapor pada keadaan equilibrium dengan liquid pada titik c akan lebih besar dari 0,5 (titik f), saat fraksi dari liquid pada keadaan equilibrium dengan vapor pada titik b akan lebih kecil dari 0,5 (titik e). Sehingga campuran zeotropes didefinisikan sebagai campuran dimana fraksi dari coexisting phase tidak sama.



Gambar 2.8 Diagram T-x Campuran Zeotropes

2. Campuran azeotropis

Contoh campuran azeotropes antara R23 dan R13. Gambar dibawah ini menunjukkan variasi identik dari *bubble* dan *dew point temperatures* dari sebuah campuran azeotropes. Glide dari refrigeran menjadi nol saat fraksi R23 dalam campuran sebesar 0,42. Fraksi dari fase *vapor* dan *liquid* memiliki nilai yang sama pada kondisi tersebut. Campuran azeotropes biasanya digunakan untuk *constant-temperature refrigeration*.



Gambar 2.9 Diagram T-x Campuran Azeotropes

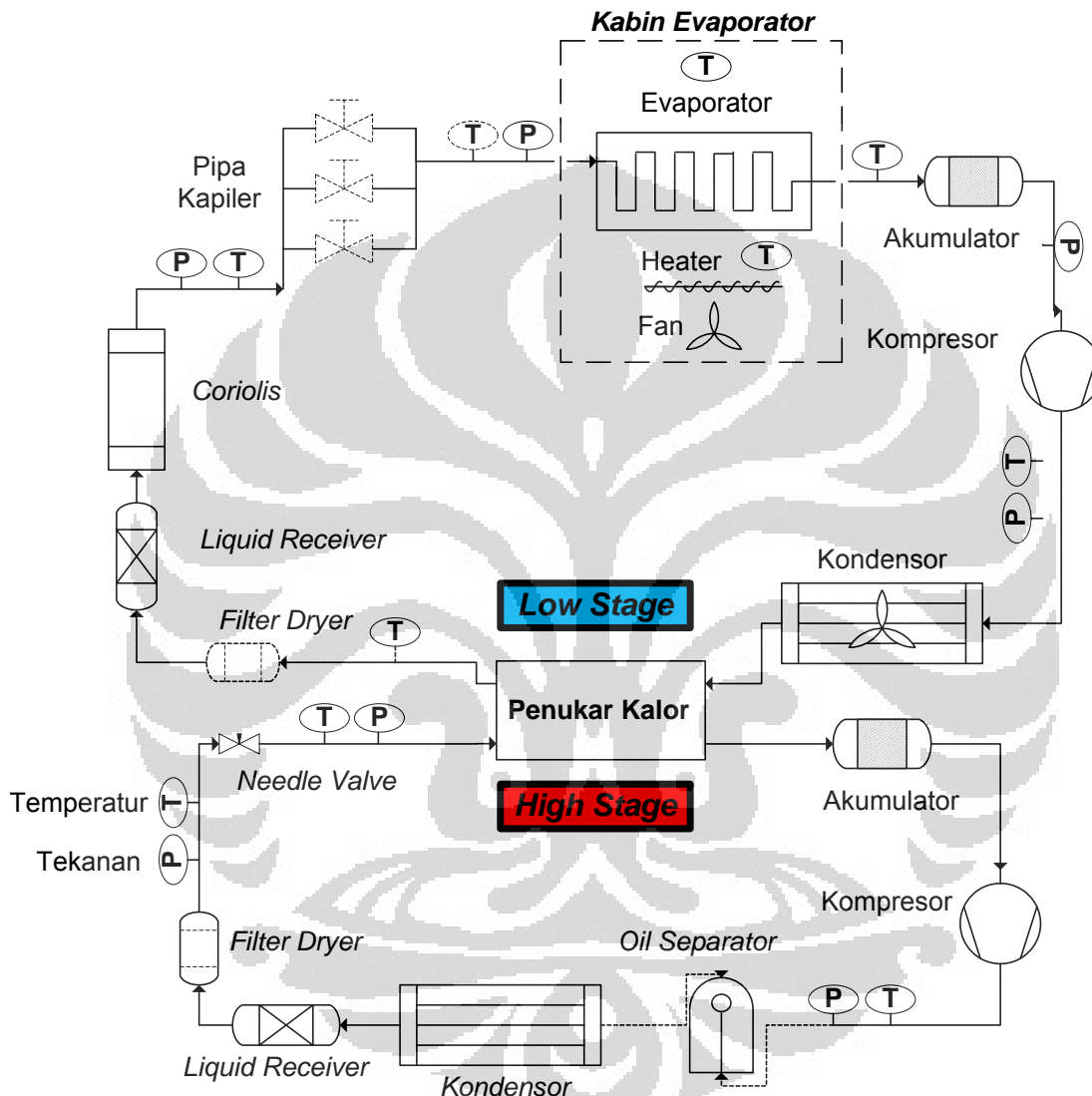
Pada sistem refrijerasi cascade yang digunakan dalam penelitian, penggunaan refrigeran alternatif ramah lingkungan, campuran azeotropis karbondioksida/ CO_2 (yang memiliki nilai $\text{ODP}=0$; $\text{GWP}=1$) dan refrijeran hidrokarbon ethane/ C_2H_6 (yang memiliki nilai $\text{ODP}=0$; $\text{GWP}=3$), adalah sebagai

salah satu upaya mengurangi kerusakan ozon dan pemanasan global. Studi pendahuluan simulasi dan eksperimen mesin pendingin cascade dua tingkat mengindikasikan campuran karbondioksida dan ethane mampu mencapai temperatur minimum hingga -80°C (Darwin et al., 2008). Namun demikian, temperatur minimum tersebut masih belum stabil. Hal ini diduga karena adanya perubahan komposisi saat refrijeran campuran karbondioksida dan ethane bersirkulasi dalam sistem refrijerasi (Darwin et al., 2010).



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

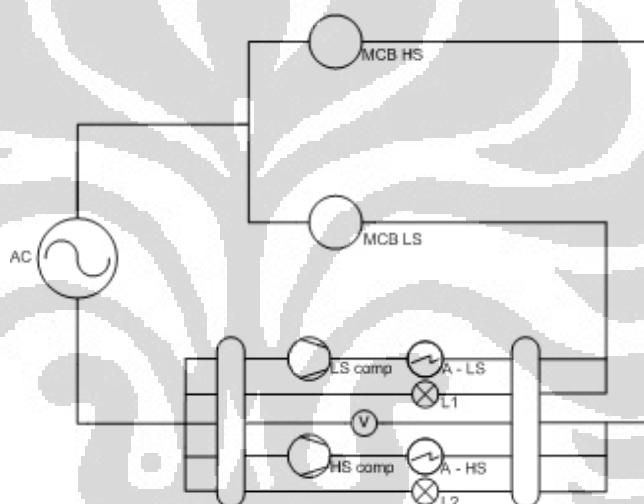
3.1 Alat dan Komponen Pengujian



Gambar 3.1 Skematik Diagram Pada Sistem Refrijerasi *Cascade*

Dalam melakukan pengujian alat yang digunakan untuk menganalisa pengaruh pembebanan pada sistem refrijerasi *cascade* menggunakan sistem refrijerasi *cascade* yang berada di laboratorium pendingin lantai 3 (tiga) Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia (DTM FTUI) .

Gambar 3.1 menunjukkan skematik dari alat pengujian dari sistem refrigerasi *cascade*. Pada *high stage* pemasangan alat ukur tekanan (*pressure transmitter*) dipasang pada 2 (dua) titik dan temperatur (*thermocouple*) masing-masing di 3 (tiga) titik dan untuk *low stage* pemasangan alat ukur tekanan (*pressure transmitter*) dipasang pada 4 (empat) titik dan temperatur (*thermocouple*) masing-masing di 7 (tujuh) titik. Seluruh alat ukur baik alat ukur tekanan atau pun temperatur berbasis komputer dengan menggunakan *software labview*, penggunaan variasi pipa kapiler sebagai alat ekspansi, variasi beban pada sistem refrigerasi *cascade*, serta pemasangan sitrans FC siemens *mass flow mass 6000* yang digunakan untuk mengukur laju ukuran massa pada *low stage*.



Gambar 3.2 *Wiring Diagram* Pada Sistem Refrigerasi *Cascade*

Wiring diagram pada sistem refrigerasi *cascade* dapat dilihat pada gambar 3-2, 3 (tiga) *mini circuit breaker* (MCB) dipasang masing-masing sebagai *power* utama, kompresor *high stage*, dan kompresor *low stage*. Dimana arus yang terbaca pada amper meter merupakan arus dari masing-masing kompresor. *Power* utama untuk menjalankan seluruh sistem tergabung, setelah *power* utama ditekan pada control panel maka tombol yang aktif selanjutnya adalah kompresor pada bagian *high stage* dan oleh karenanya jika tombol kompresor *low stage* ditekan tanpa menyalakan kompresor *high stage* dan maka kompresor *low stage* tidak akan menyala, karena aliran listrik tidak langsung terhubung pada kompresor *low stage* melainkan melalui kompresor *high stage* terlebih dahulu.

Condensing Unit

Condensing Unit merupakan bagian dari sistem refrijerasi yang didalamnya terdapat kompresor, liquid receiver, kondensor.

- Kompresor merupakan bagian terpenting dari sistem refrijerasi, yaitu berfungsi untuk memompa refrigeran yang berbentuk uap dari evaporator sehingga menimbulkan perbedaan tekanan dan mengalirkan refrigeran dalam sebuah sistem refrijerasi.
- *Liquid receiver* adalah alat yang berfungsi sebagai penampung refrijeran dari kondensor dan memastikan bahwa yang keluar adalah refrijeran berfase cair.
- Kondensor berfungsi sebagai media pemindah kalor dari refrijeran ke lingkungan untuk mencairkan uap refrigerant yang bertekanan dan bertemperatur tinggi dari kompresor.



Gambar 3.3 *Condensing unit High Stage* Gambar 3.4 *Condensing unit Low Stage*

Tabel 3-1 Spesifikasi Kompresor pada *Condensing Unit*

Spesifikasi	High Stage	Low Stage
Merk/Model :	Tecumseh / CAJ9480T	Tecumseh / CAJ9480T
Tipe :	Hermatik	Hermatik
Daya :	3/4 hp	3/4 hp
Refrigeran :	R22	R22
Voltage :	220V - 240V/ 50Hz	220V - 240V/ 50Hz

Pelumas :	Sintetis	Sintetis
Dimensi :	Panjang : 23 cm Lebar : 15 cm Tinggi : 30 cm	Panjang : 23 cm Lebar : 15 cm Tinggi : 30 cm

Tabel 3-2 Spesifikasi Kondensor pada *Condensing Unit*

Spesifikasi Kondenser	
Tipe :	<i>Shell and coils water cooled condenser</i>
Material :	Pipa tembaga, Polycarbonat
Dimensi :	Panjang : 32 cm Lebar : 9 cm Tinggi : 28 cm

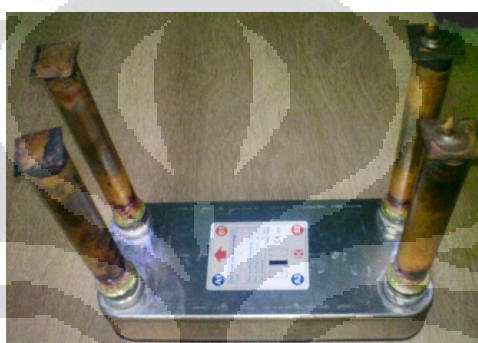
Gambar 3.5 Kondensor pada *Condensing Unit*

Cascade Heat Exchanger

Cascade heat exchanger atau alat penukar kalor merupakan komponen dari sistem refrijerasi *cascade* dalam mentransfer kalor dari *low stage* ke *high stage*, dimana pada *high stage* alat ini sebagai evaporator, sedangkan untuk pada *low stage* alat ini sebagai kondenser. Berikut spesifikasi alat penukar kalor yang digunakan pada proses pengujian sistem refrijerasi *cascade*.

Tabel 3-3 Spesifikasi *Heat Exchanger*

Spesifikasi Heat Exchanger	
Tipe	: <i>Double pipe</i>
Material	: Pipa tembaga
Dimensi	: Panjang : 32 cm Lebar : 19 cm Tinggi : 27,5 cm



Gambar 3.6 Cascade Heat Exchanger

Alat Ekspansi

Dalam pengujian yang dilakukan, alat ekspansi yang digunakan adalah *needle valve*. Penggunaan *needle valve* ini didasari karena tekanan *suction* LS dibutuhkan lebih besar dari tekanan lingkungan agar refrigeran yang akan di uji dapat masuk dalam jumlah dan tekanan yang cukup untuk pengujian konsentrasi komposisi.

Tabel 3-4 Spesifikasi Alat Ekspansi

Spesifikasi	High Stage	Low Stage
Tipe	: Swagelok	Kapiler 1,3, 6 meter
Diameter	: 3/8 inch	0,064 inch



Gambar 3.7 Alat Ekspansi

Filter Dryer

Filter dryer merupakan suatu alat yang berfungsi untuk menyaring partikel-partikel kecil seperti serpihan logam, plastik, dan debu yang dapat membahayakan bagi kerja kompresor. Selain itu alat ini juga bermanfaat untuk menangkap uap air yang dapat menghambat proses perpindahan kalor serta membahayakan kompresor, *filter dryer* yang digunakan dalam pengujian ini adalah :

Gambar 3.8 *Filter Dryer*Tabel 3-5 Spesifikasi *Filter Dryer*

Spesifikasi Filter Dryer	
Tipe :	Emerson/EK 163
Refrigeran :	CFC, HCFC dan HFC
Dimensi :	Panjang : 17,46 cm Lebar : 6,67 cm

Akumulator

Akumulator merupakan sebuah bejana yang berfungsi untuk memastikan bahwa tidak ada refrijeran yang masuk ke dalam kompresor dengan fasa cair. Karena cairan merupakan fluida tak mampu mampat, masuknya cairan kedalam kompresor dapat menyebabkan kerusakan pada kompresor. Pada sistem akumulator ditempatkan diantara alat ekspansi dan *suction line* kompresor, kapasitas akumulator diharuskan minimal 50% dari kapasitas refrijeran dalam sistem.



Gambar 3.9 Akumulator

Tabel 3-6 Spesifikasi Akumulator

Spesifikasi Akumulator	
Tipe :	Emerson/A-AS 464
Refrigeran :	CFC, HCFC dan HFC
Dimensi :	Panjang : 31,5 cm Diameter : 10,5 cm

Oil separator

Oil separator berfungsi untuk memastikan pelumas yang digunakan kompresor untuk kembali ke *crankcase* kompresor. Sebelum masuk ke kondenser, campuran pelumas dan refrijeran masuk ke *inlet oil separator* dan melalui serangkaian *buffle* yang menyebabkan partikel pelumas terkumpul kemudian jatuh ke bagian bawah *oil separator*. Pelumas yang telah dipisahkan dari refrijeran dikembalikan ke *crankcase* dengan prinsip perbedaan tekanan pada *oil separator* dan *crankcase*. Karena tekanan pada *oil separator* lebih tinggi

Universitas Indonesia

dibandingkan tekanan pada *crankcase*. *Oil separator* pada sistem terletak diantara *discharge line* kompresor dan kondenser. Pada alat uji ini digunakan 2 (dua) unit *oil separator* pada *high stage* dan *low stage*.



Gambar 3.10 *Oil Separator*

Tabel 3-7 Spesifikasi *Oil Separator*

Spesifikasi <i>Oil Separator</i>	
Tipe :	Asian First Brand
Refrigeran :	CFC, HCFC dan HFC
Dimensi :	Panjang : 26,04 cm Diameter : 10,16 cm

Pipa Tembaga

Pipa tembaga merupakan medium tempat mengalirnya refrijeran pada sistem dari satu bagian ke bagian lainnya. Pipa tembaga dipilih dengan pertimbangan bahwa material ini memiliki konduktivitas termal yang cukup tinggi sehingga memiliki perpindahan panas yang cukup baik.



Gambar 3.11 Pipa Tembaga

Pipa tembaga yang digunakan merupakan pipa tembaga pabrikan Australia. Pertimbangan dalam pemilihan pipa tersebut karena pipa Australia memiliki sifat fisik yang lebih kuat dibanding merk lain. Dalam percobaan ini digunakan 2 (dua) macam diameter pipa tembaga, yaitu diameter 3/8 inch dan 1/4 inch.

Shut Off Valve



Gambar 3.12 Shut Off Valve

Penggunaan *shut off* dalam percobaan ini diperlukan dalam *charging system* atau proses pemasukan refrijeran. Penggunaan *shut off valve* dapat memudahkan dalam proses pemasukan refrijeran. *Shut off valve* yang digunakan berukuran 1/4 inch hal ini disesuaikan dengan drat yang ada pada selang refrijeran yang digunakan. Penggunaan *shut off valve* lainnya adalah pada variasi kapiler. Hal ini bertujuan agar dalam proses pengujian tidak bongkar pasang. Bongkar pasang pada sistem mengakibatkan kehilangan banyak refrijeran. Selain itu keuntungannya dalam menggunakan *shut off valve* adalah selama pengujian

variasi pipa kapiler, kandungan refrigeran dalam sistem memiliki komposisi yang sama.

Kabin (evaporator)

Pada pengujian ini kabin yang digunakan didesain menggunakan pipa PVC dengan diameter 3 (tiga) inch yang kemudian dilapis menggunakan *polyurethane* dengan ketebalan $\pm 0,5$ inch. Di dalam kabin ini terdapat evaporator yang berfungsi untuk mendinginkan temperatur dalam kabin. Temperatur pada kabin kemudian dimonitor menggunakan termokopel yang dihubungkan pada komputer.



Gambar 3.13 Evaporator *Low Stage*

Tabel 3- 8 Spesifikasi Evaporator

Spesifikasi Evaporator	
Tipe	: <i>Shell and Coil</i>
Dimensi	: Panjang 37,5 cm Lebar 15,5 cm Tinggi 6 cm
Material	: Tembaga


Alat Ukur

Untuk mendapatkan unjuk kerja dari sistem refrigerasi *cascade* maka pada sistem dipasang beberapa alat ukur yang diperlukan. Berikut adalah spesifikasi alat ukur yang digunakan pada pengujian sistem refrigerasi *cascade*.

Pressure Gauge

Tekanan gage (*pressure gauge*) ini dipasang dengan tujuan memudahkan dalam pengetesan kebocoran dan pemvakuman sistem.

Tabel 3-9 Spesifikasi *Pressure Gauge*

Spesifikasi Pressure Gauge	
<i>Range</i> :	High pressure : 0 – 35 bar Low pressure : 0 – bar
Gambar :	 <p>Gambar 3.14 <i>Pressure Gauge</i></p>

Pressure Transmitter

Gambar 3.15 *Pressure Transmitter*Tabel 3-10 Spesifikasi *Pressure Transmitter*

Spesifikasi Pressure Transmitter	
Pabrikan :	General electric
Tipe :	Druck PTK 1400
Range :	0 – 40 bar absolute
Analog Output :	4 – 20 mA
Akurasi :	0.15 %

Untuk mengukur tekanan yang bekerja pada siklus refrigerasi *cascade*, *pressure transmitter* diletakan pada 4 (empat) titik. Untuk mengukur tekanan di tiap titik kita menggunakan *pressure transmitter* yang datanya kemudian di informasikan melalui labview. *Pressure transmitter* ditempatkan di 4 (empat) titik *high stage* dan *low stage*. Titik-titik tersebut yaitu pada *discharge line*, *sunction line*, keluaran kondenser, dan keluaran dari alat ekspansi. Kemudian data hasil pembacaan dari *pressure transmitter* diinformasikan oleh labview.

Termokopel

Untuk mengetahui temperatur yang ada pada sistem, alat ukur yang digunakan adalah termokopel tipe K dengan sensor yang masuk ke dalam refrigeran. Kemudian data yang terbaca pada sensor termokopel di konversikan oleh perangkat lunak labview untuk memudahkan dalam proses pengambilan dan penyimpanan data.



Gambar 3.16 Termokopel

Tabel 3-11 Spesifikasi Termokopel

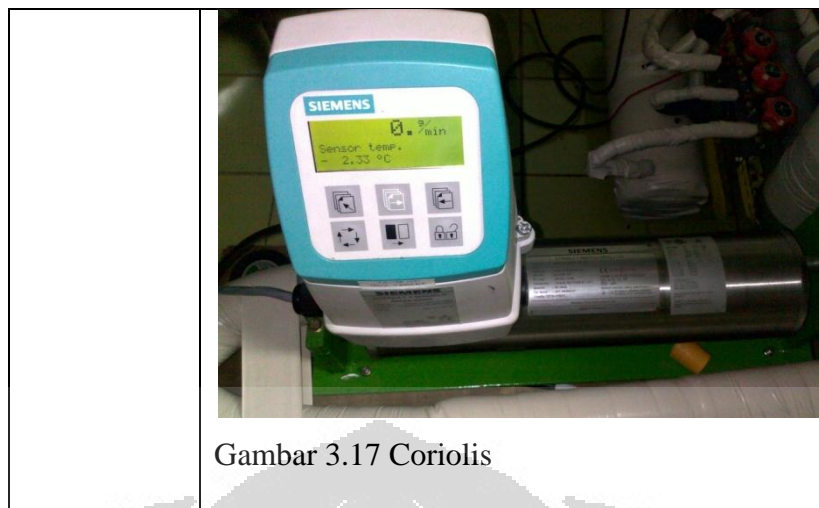
Spesifikasi Termokopel	
Tipe :	K
Range :	100 ⁰ C - 110 ⁰ C
Akurasi :	+/- 1 ⁰ C

Coriolis

Alat ini digunakan untuk mengukur laju massa dari refrijeran pada *low stage*. Karena coriolis hanya dapat dilakukan pada fluida dengan fasa gas, maka alat ini ditempatkan diantara evaporator dan *suction*.

Tabel 3-12 Spesifikasi Coriolis

Spesifikasi Coriolis	
Model :	Siemens
Volt/Freq :	230/50
Gambar :	



Gambar 3.17 Coriolis

Panel Listrik

Panel listrik berfungsi sebagai saklar on/off untuk mesin refrijerasi cascade. Dengan begitu mesin dapat beroperasi sesuai kebutuhan di pln. Pada panel terdapat display digital volt meter, display ampere meter dan volt meter, dan dimmer.

Tabel 3-2 Spesifikasi Panel Listrik

Spesifikasi National Instrument	
Model :	
Tipe :	
Dimensi :	Panjang 35 cm; Lebar 25 cm; Tinggi 15 cm
Gambar :	

Gambar 3.18 Panel Listrik

Komputer

Komputer merupakan alat penunjang dalam pengujian sistem refrigjerasi *cascade*. Komputer digunakan sebagai alat penerima sinyal dari data akusisi dan penyimpan data pengujian. Komputer yang digunakan memiliki port USB dan terinstal perangkat lunak konversi tegangan dan ampere (Labview 8.5).

Tabel 3-14 Spesifikasi Komputer

Spesifikasi Komputer	
Model :	Intel Pentium 4 Dual Core CPU E5400 2,7 GHz
Tipe :	2 GB of RAM
Jenis :	Microsoft XP service pack 2
Output :	4 port USB
Software :	Notepad, NI dan Labview 8.5

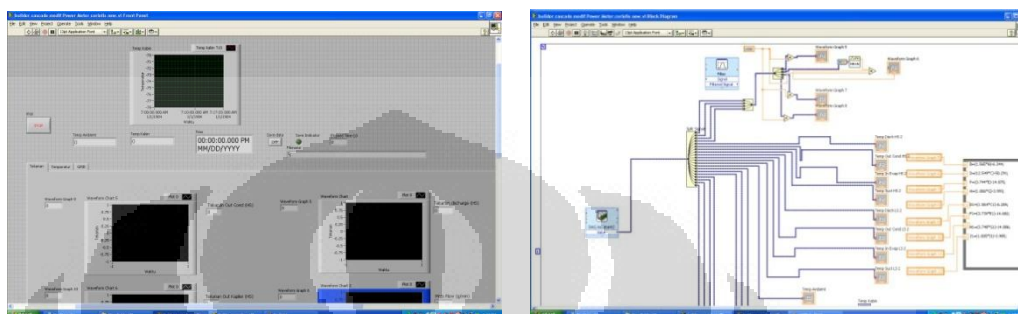


Gambar 3.19 Unit Komputer

Selain komputer, berikut adalah perangkat lain yang terhubung sebagai alat penunjang pengujian.

Perangkat Lunak Labview

Dalam memudahkan dalam pembacaan dan pengambilan data baik itu data temperatur, tekanan maupun data yang dihasilkan *power meter* maka dalam pengujian ini menggunakan *software labview*, dengan ini kita dapat melakukan pengambilan data secara otomatis.



Gambar 3.20 Tampilan *front panel* dan *block diagram* labview


Pada gambar 3.20 diatas merupakan tampilan dari perangkat lunak labview. *Front panel* merupakan menu pada labview yang berfungsi menampilkan informasi yang diterima dari data akuisisi. Informasi yang didapatkan dapat berupa grafik ataupun informasi numerik dari sistem cascade yang dibuat diagram alirnya pada *block diagram*.

Data Akuisisi

National instrument merupakan data akuisisi yang digunakan untuk melakukan pengukuran dalam sistem ini, dalam pengujian ini digunakan 4 (empat) panel dimana 1 (satu) panel dengan tipe 9211 untuk *pressure transmitter* dan 3 (tiga) panel untuk termokopel. Nantinya data dari *national instrument* ini akan di konversikan ke dalam bentuk digital dengan bantuan *software labview*, sehingga data yang kita peroleh, terukur dengan akurat.

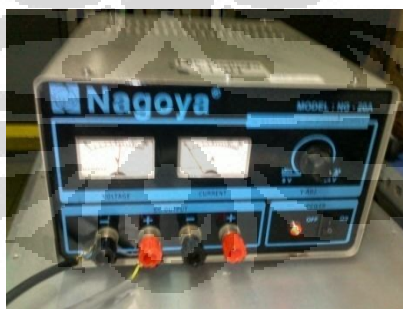
Tabel 3-3 Spesifikasi National Instrument

Spesifikasi National Instrument	
Model :	9211 dan 9203
Tipe :	4 panel

Dimensi :	Panjang 9 cm; Lebar 3 cm; Tinggi 7 cm
Gambar :	 <p>Gambar 3.21 National Instrument</p>

Power supply

Power supply digunakan untuk memberikan *supply* tegangan pada instrumen dan alat ukur. Pada *cascade*, *supply* tegangan diperlukan untuk memberikan tegangan pada data akusisi dan *pressure transmitter*. Besar tegangan *supply* untuk kedua komponen tersebut tidak boleh melebihi tegangan maksimal komponen.



Gambar 3.22 Power Supply

Power supply yang digunakan pada alat uji memiliki spesifikasi, sebagai berikut :

Tabel 3-4 Spesifikasi *Power Supply*

Spesifikasi Power Supply

Model	:	Nagoya
Tipe	:	D30 2T
Jenis	:	Digital dual output power supply
Output	:	Arus (A) dan tegangan (V)

Refrigeran

Refrigeran R290 merupakan fluida kerja yang digunakan pada sisi *high stage*. Hal ini dikarenakan pada pengujian sebelumnya R290 dinilai cukup optimal dalam sistem refrigerasi *cascade* yang digunakan. Sedangkan untuk *low stage* fluida yang digunakan adalah R744 dan R170 dengan *high purity* (99,99%).



Gambar 3.23 Tabung Refrijeran R290



Gambar 3.24 Tabung Refrijeran R744 dan R170

3.2 Tes Kebocoran Sistem

Setelah semua sistem pemipaan serta komponennya terpasang, maka terlebih dahulu dilakukan tes kebocoran dengan tujuan agar pada saat dijalankan sistem berjalan dengan baik tanpa adanya kebocoran. Kebocoran pada sistem dapat

menurunkan performa dari sistem tersebut. Adapun prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Unit dalam keadaan mati (*off*).
2. Sistem diisi dengan gas nitrogen hingga tekanan ± 15 bar.
3. Sistem pemipaan di tes kebocoran dengan menggunakan busa sabun.
4. Tandai setiap tempat yang menjadi indikasi kebocoran, untuk dapat diperbaiki.
5. Perbaiki kebocoran.
6. Tandai tekanan yang ada, kemudian tunggu hingga beberapa jam, jika tekanan tersebut berkurang maka ulangi dari langkah ke-3 hingga tekanan dipastikan tidak ada penurunan lagi.

3.3 Vacuum System

Setelah dipastikan tidak ada kebocoran dalam sistem maka proses selanjutnya adalah melakukan evakuasi sistem menggunakan pompa vakum, langkah ini dimaksud untuk memastikan sistem tidak mengandung uap air. Langkah-langkah dalam *vacuum system* adalah sebagai berikut:

1. Unit sistem dalam keadaan mati (*off*).
2. Hubungkan selang *manifold gauge* pada suction kompresor dan pompa vakum.
3. Nyalakan pompa vakum hingga pada jarum pada *pressure gauge* menunjukkan angka dibawah 0 bar (± 30 menit).
4. Tutup katup *manifold gauge* dan pompa vakum.
5. Matikan pompa vakum.



Gambar 3.25 Pompa Vakum

3.4 Charging System

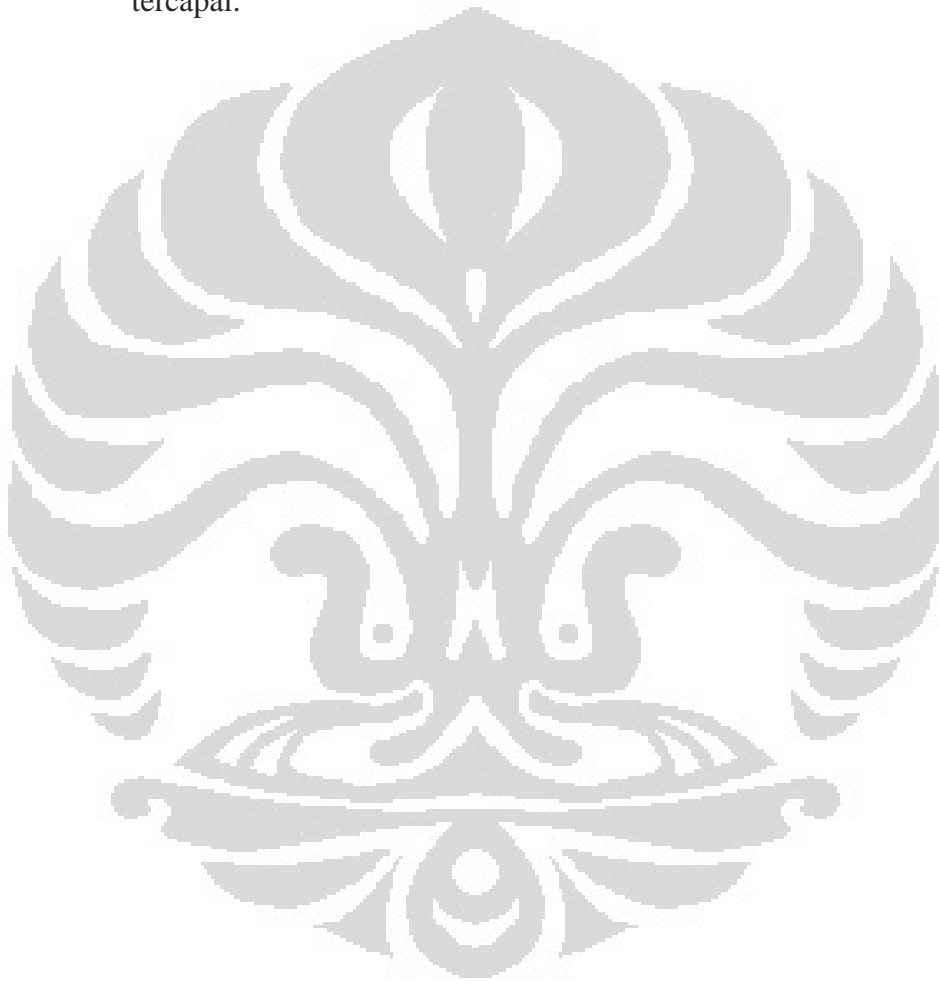
Setelah proses evakuasi sistem dengan menggunakan pompa vakum selesai maka dilanjutkan dengan pengisian refrijeran ke dalam sistem sesuai dengan kebutuhan. Prosedurnya adalah sebagai berikut :

1. Unit sistem dalam keadaan mati (*off*).
2. Hubungkan selang manifold gauge pada suction kompresor dan tabung refrijeran yang sebelumnya telah ditimbang terlebih dahulu.

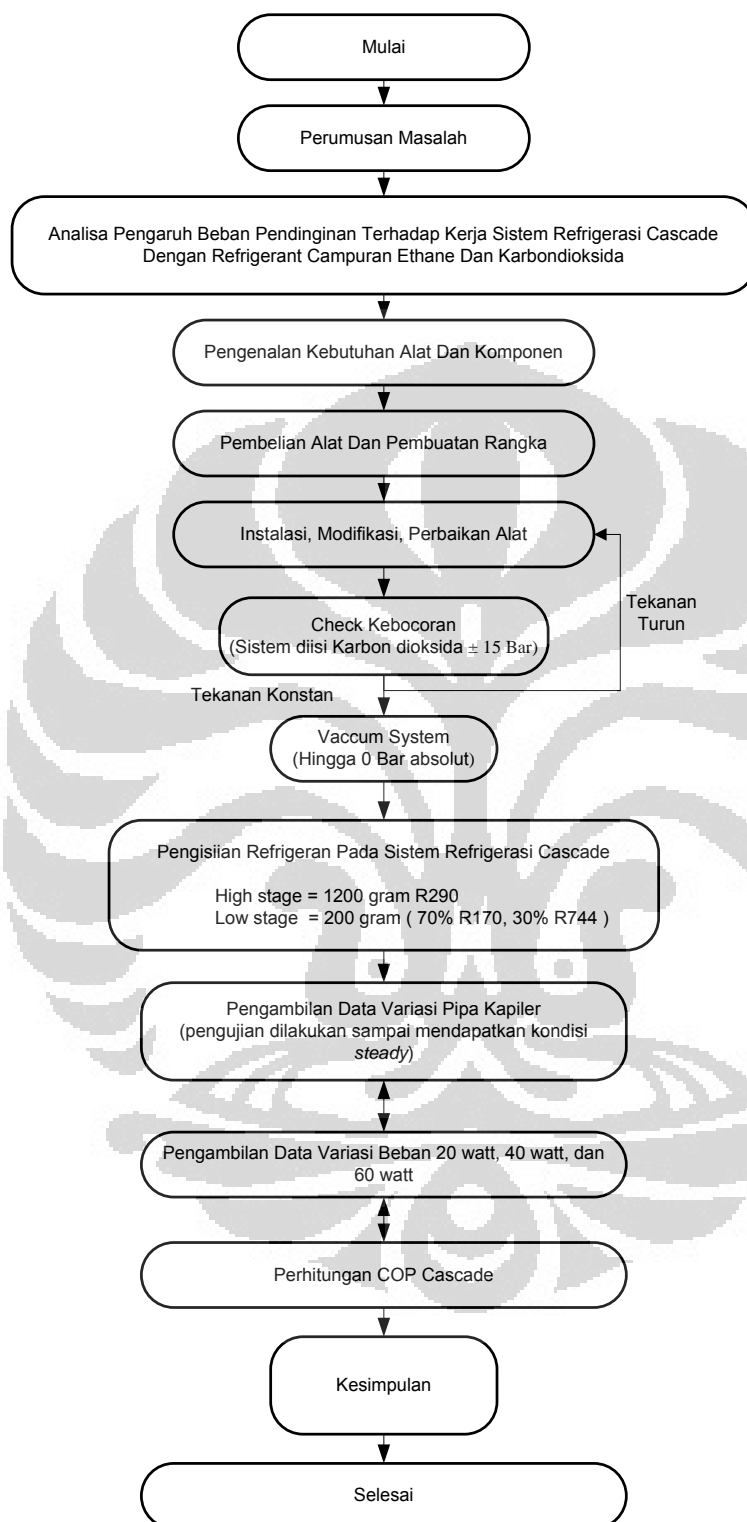


Gambar 3.26 Digital

3. *Shut off valve* pada sistem dalam keadaan tertutup, kemudian buka katup pada refrigeran.
4. *Flashing* refrigeran beberapa saat.
5. Kemudian pastikan selang manifold gauge pada suction kompresor terpasang dengan kencang.
6. Buka perlahan-lahan *shut off valve* sambil memperhatikan pembacaan timbangan, sesuai dengan berat refrigeran yang masuk kedalam sistem tercapai.



3.5 Metode Pengambilan Data



Gambar 3.27 Skema Diagram Metodologi Penelitian Perbandingan Tekanan Ekspansi *High Stage* pada *Low Stage* Pada Sistem Refrigerasi Cascade

Langkah Pengujian:

1. Buka program perangkat lunak labview.
2. Jalankan program.
3. Nyalakan *High stage*.
4. Tunggu hingga temperatur keluaran kapiler stabil.
5. Setelah temperatur keluaran kapiler *High state* stabil nyalakan *Low state*.
6. Tunggu hingga temperatur masuk evaporator *Low state* dan temperatur kabin stabil.
7. Klik save (menyimpan data pada kondisi stabil).
8. Tunggu hingga 10 menit lalu.
9. Pada saat memberikan pembebanan sesuaikan beban yang akan diberikan (pada pengujian ini pembebanan diberikan sebesar 20 watt, 40 watt, dan 60 watt).
10. Tunggu hingga temperatur keluar kapiler *High stage*, temperatur masuk evaporator dan temperatur kabin *Low state* stabil setelah itu klik save.
11. Pengambilan data selama 10 (sepuluh) menit.
12. Matikan *low stage*, *high stage*, dan *power* utama secara berurutan.
13. Matikan komputer.
14. Pengujian selesai.

BAB 4 PEMBAHASAN

4.1 Properties Refrigeran pada Sirkuit Temperatur Rendah (LS)

Properties refrigeran campuran karbondioksida/ethane (R744/R170) dengan fraksi massa berturut-turut 30% dan 70% dengan total massa 200 gram (sumber: REFPROP 8.0):

Tabel 4-1. *Critical Properties Refrigeran Campuran R744/R170*

<i>Estimated Critical Properties</i>	
Temperatur	24,845 [°C]
<i>Pressure</i>	53,859 [bar]
<i>Kontrol Density</i>	243,08 [kg/m ³]

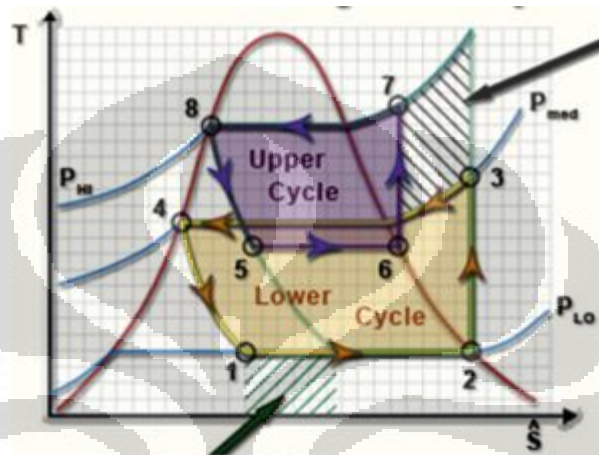
Sedangkan *properties* dari karbondioksida dan ethane sendiri adalah (sumber: REFPROP 8.0):

Tabel 4-2. *Properties dari Karbon dioksida dan Ethane*

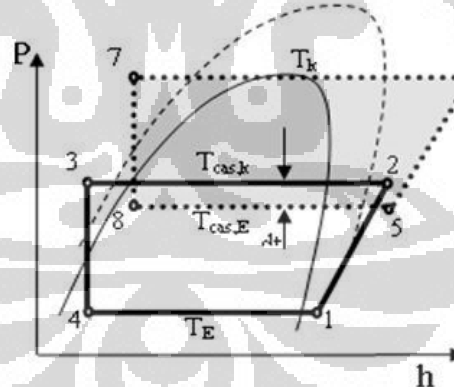
	Karbondioksida	Ethane
<i>Critical Temperature</i>	30,9 [°C]	-140.29 [°C]
<i>Critical Pressure</i>	73,8 [bar]	34.94 [bar]
<i>Critical Density</i>	467,6 [kg/m ³]	303.91 [kg/m ³]
<i>Minimum Temperature</i>	-56,6 [°C]	-204.99 [°C]
<i>Maximum Temperature</i>	1726,9 [°C]	226.85 [°C]
<i>Maximum Pressure</i>	8000 [bar]	10000[bar]

<i>Maximum Density</i>	1638,9 [kg/m ³]	947.86 [kg/m ³]
------------------------	-----------------------------	-----------------------------

Dari tabel diatas bisa dilihat adanya perubahan *properties* saat ethane dan karbondioksida dicampur. Terjadi penurunan *critical temperature* menjadi 24,845 °C dan *critical pressure* berubah menjadi 53,859 bar dibandingkan dengan karbondioksida sebelum dicampur.



Gambar 4.1 Diagram T-s sistem refrijerasi cascade



Gambar 4. 2 Diagram p-h sistem refrijerasi cascade

Model terdiri dari delapan submesin dasar berdasarkan proses thermodynamika klasik dalam mesin refrijerasi cascade. Dengan melihat beberapa titik-titik keadaan yang ditunjukkan pada gambar diatas, maka persamaan-persamaan yang digunakan untuk analisa thermodynamika-nya adalah sebagai berikut :

Kapasitas evaporasi mesin refrijerasi cascade didefinisikan sebagai :

Universitas Indonesia

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_r (h_1 - h_4) \quad (1)$$

Daya yang dibutuhkan kompresor untuk sirkuit temperatur rendah yaitu :

$$\dot{W}_r = \dot{m}_r (h_2 - h_1) \quad (2)$$

Laju perpindahan kalor yang terjadi di penukar kalor cascade dinyatakan sebagai :

$$\dot{Q}_{cas} = \dot{m}_t (h_5 - h_8) = \dot{m}_r (h_2 - h_3) \quad (3)$$

sehingga dari persamaan diatas, rasio laju aliran massa refrijerasi ditentukan sebagai :

$$\frac{\dot{m}_t}{\dot{m}_r} = \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_8} \quad (4)$$

Daya yang dibutuhkan untuk sirkuit temperatur tinggi :

$$\dot{W}_t = \dot{m}_t (h_6 - h_5) \quad (5)$$

dan, kalor yang dibuang ke lingkungan oleh kondenser yaitu :

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_t (h_6 - h_7) \quad (6)$$

Sehingga Performa mesin refrijerasi cascade diukur menggunakan *Coefficient of Performance (COP)* :

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_t + \dot{W}_r} \quad (7)$$

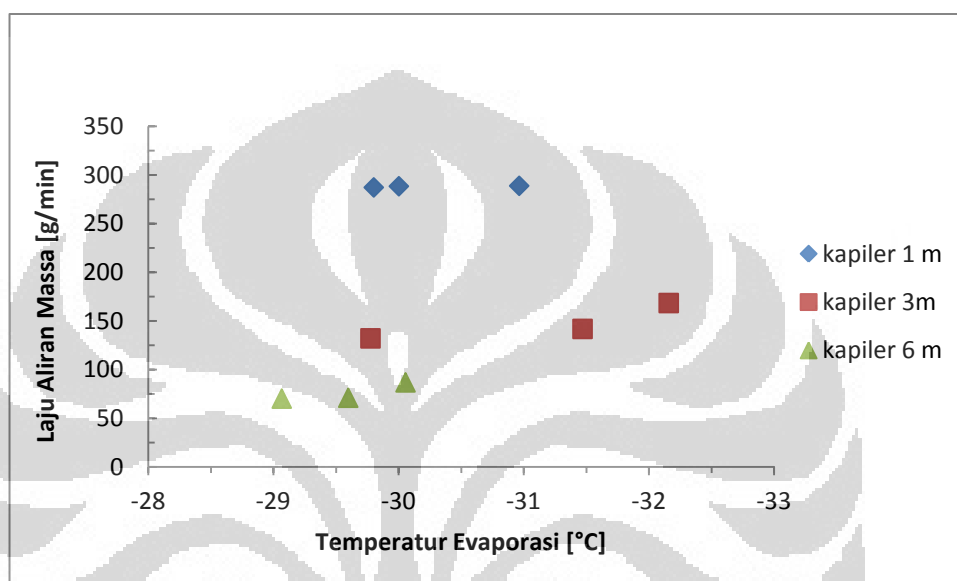
COP dapat juga dinyatakan dalam entalpy dengan mensubstitusikan persamaan (1),(2),(4) dan (6) ke dalam persamaan (8) maka, diperoleh :

$$COP = \frac{(h_5 - h_8)(h_1 - h_4)}{(h_6 - h_5)(h_2 - h_3) + (h_5 - h_8)(h_2 - h_1)} \quad (8)$$

Kemudian pengujian dilakukan dengan memvariasikan panjang pipa kapiler pada sirkuit tinggi dengan variabel tetap pada pipa kapiler temperatur rendah.

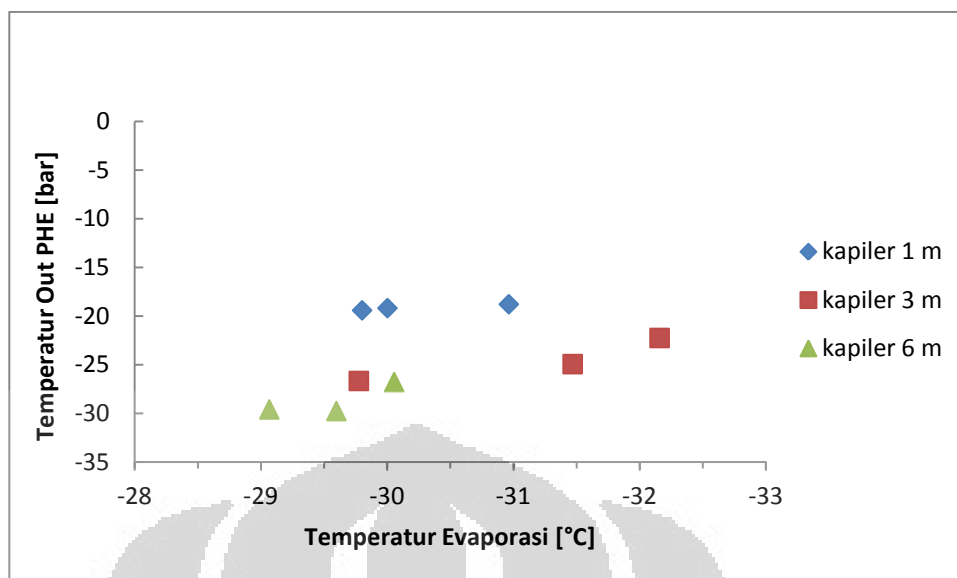
Variasi yang dilakukan yaitu 1 meter, 3 meter, dan 6 meter dengan variasi beban 20 watt, 40 watt, dan 60 watt.

4.2 Analisa Grafik Pembahasan



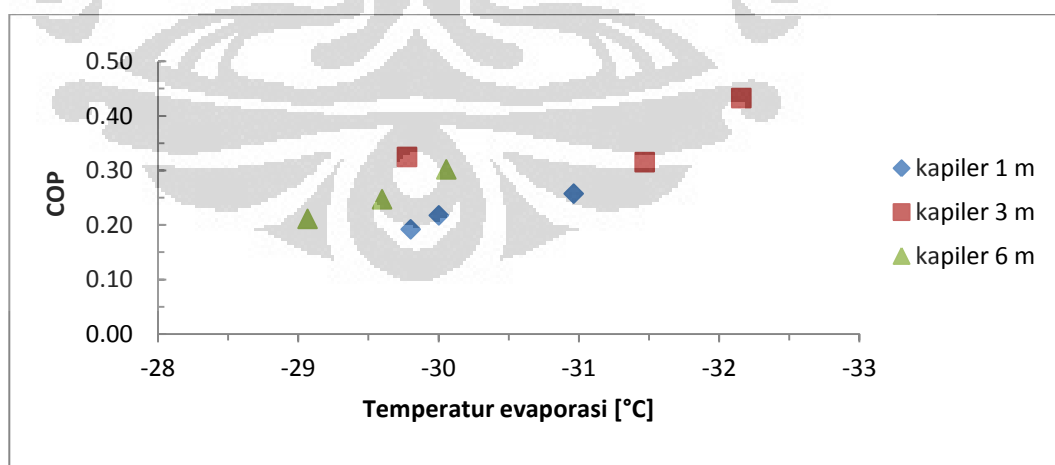
Gambar 4. 3 Grafik temperatur evaporasi HS terhadap laju aliran massa

Dari gambar 4.3 terlihat adanya kecenderungan peningkatan laju aliran massa seiring dengan penurunan temperatur evaporasinya. Penurunan temperatur evaporasi terjadi akibat pengaruh peningkatan pembebanan. Semakin tinggi besar pembebanan maka akan meningkatkan laju aliran massa dan menurunkan temperatur evaporasinya.



Gambar 4. 4 Grafik temperatur evaporasi HS terhadap temperatur out PHE LS

Dari gambar 4.4 dapat dilihat bahwa temperatur evaporasi *high stage* cenderung menurun seiring dengan naiknya temperatur *out PHE high stage*. Penurunan temperatur evaporasi mempengaruhi peningkatan temperatur *out PHE low stage*. Pada kapiler 3 m, penurunan temperatur evaporasi terlihat drastis, hal ini terlihat pada beban 20 dan 40 W. Hal ini kemungkinan akibat pengaruh dari pembeban yang tak stabil dimana terdapat *losses*/rugi-rugi dari temperatur lingkungan yang masuk dan dari panas yang dihasilkan fan didalam kabin.



Gambar 4. 5 Grafik temperatur evaporasi HS terhadap COP

Dari gambar 4.5 terlihat peningkatan nilai COP seiring dengan penurunan temperatur evaporasi HS. Semakin rendah temperatur HS maka akan menunjukkan nilai COP yang tinggi. Nilai COP tertinggi terdapat pada pipa kapiler dengan panjang 3 m pada beban 60 W. Penggunaan temperatur yang optimal pada temperatur evaporator sirkuit tinggi adalah sekitar -32°C maka akan mendapatkan nilai COP sebesar 0,43.

Disebabkan pengaruh pembebanan yang tak stabil mempengaruhi kinerja sistem cascade, hal ini diketahui pada kapiler 3 m, nilai COP lebih tinggi dibanding kapiler 6 m. beban yang selalu berubah-ubah mempengaruhi nilai COP.

Pengaruh beban heater berbeda dengan beban pendinginan, dimana pada beban pendinginan daya yang terjadi lebih besar daripada beban yang diberikan pada evaporator *low system*. Hal ini dapat disebabkan karena *losses*/rugi-rugi yang disebabkan oleh temperatur lingkungan yang masuk ke ruang evaporator dan juga panas yang keluar dari fan yang digunakan untuk menghembuskan panas dari heater ke evaporator di dalam kabin. Selain itu kemungkinan pengaruh akibat kompresor yang sebelumnya mengalami masalah, yaitu kemungkinan kurangnya oli pada kompresor. Dimana data yang didapat sebelum dan sesudah pengisian oli terlihat cenderung berbeda.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

- Temperatur evaporasi *low stage* terendah yang dicapai adalah -73°C dengan tekanan evaporasi 1,6 bar absolut.
- Nilai COP tertinggi dicapai pada kapiler 3 m beban 60 W, dengan nilai 0.43 dengan temperatur evaporasi *high stage* sekitar 32°C ..

5.2. SARAN

- Perlu dilakukan penggantian alat pengatur beban, dikarenakan alat pengaturnya / *dimmer* selalu berubah-ubah tegangannya. Hal ini disebabkan karena ada kemungkinan *dimmer* sensitif terhadap getaran mesin.

DAFTAR REFERENSI

- ASHRAE Handbook, 2006, *Refrigeration System and Applications (SI)*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineer, Atlanta, Georgia.
- Cengel. Yunus.A, Boles. Michael, 1998, "*Thermodynamics An Engineering Approach*", Third Edition, Mcgraw-Hill, International Edition
- Darwin Rio Budi Syaka, Nasruddin, 2008, *Analisa Termodinamika Pemilihan Refrigeran Pada Mesin Refrigerasi Cascade*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM)-VII, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi, Manado, 4 – 6 November.
- Gettu. H.M, Bansal. P.K, 2008, *Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system*, International Jurnal Of Refrigeration, 31 (2008):45-54
- Hosöz, Murat, 2004, *Performance Comparison of Single-Stage and Cascade Refrigeration System Using R134a as The Working Fluid*, Turkish J. Eng. Env. Sci., 29 (2005), 285 – 296
- Nasruddin, Dedeng Rachmat, Lubi Rahadiyan, 2009, *Utilization of CO₂/Ethane Mixture as a New Alternative of Eco-Friendly Refrigerant for Low Temperature Applications*, International Conference Of Saving Energy In Refrigeration And Air-Conditioning, Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik-Universitas Indonesia, Depok, January 14 – 17
- NIST Standard Reference Database 23, 1998. NIST Thermodynamics and Transport Properties of Refrigerans and Refrigeran Mixtures, REFPROP, Version 8.0.
- Refrigeration And Air Conditioning*, 2008, EE Indian Institue of Technology, Kharagpur