



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGUJIAN SISTEM REFRIGERASI CASCADE DENGAN
MENGUNAKAN REFRIGERAN ALAMI CAMPURAN R744
DENGAN R170 UNTUK APLIKASI TEMPERATUR RENDAH**

SKRIPSI

**RIFKY TRI WAHYU ROSADI
0405020618**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2009**

Universitas Indonesia



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGUJIAN SISTEM REFRIGERASI CASCADE DENGAN
MENGUNAKAN REFRIGERAN ALAMI CAMPURAN R744
DENGAN R170 UNTUK APLIKASI TEMPERATUR RENDAH**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RIFKY TRI WAHYU ROSADI
0405020618**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**PENGUJIAN SISTEM REFRIGERASI CASCADE DENGAN
MENGUNAKAN REFRIGERAN ALAMI CAMPURAN R744 DENGAN R170
UNTUK APLIKASI TEMPERATUR RENDAH**

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 skripsi 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.

Skripsi ini merupakan bagian dari skripsi yang dikerjakan bersama dengan saudara **LASMAN SAPUTRA (0405020456)**. Sehingga harap maklum jika ada beberapa bagian dari buku ini memiliki kesamaan.

Nama : Rifky Tri Wahyu Rosadi

NPM : 0405020618

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Rifky Tri Wahyu Rosadi
NPM : 0405020618
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Pengujian Sistem Refrigerasi Cascade Dengan Menggunakan Refrigeran Alami Campuran R744 Dengan R170 Untuk Aplikasi Temperatur Rendah

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. -Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng (.....)
Pembimbing : Dr. Ir. Muhammad Idrus Alhamid (.....)
Penguji : Dr. Ir. Budihardjo, Dipl. -Ing (.....)
Penguji : Lubi Rahadiyan, ST, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

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. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan doa dan dukungannya kepada saya untuk tetap semangat.
2. Dr. –Ing, Ir. Nasruddin, M.Eng, atas segala waktu, tenaga dan kesabaran dalam membimbing dan mengarahkan.
3. Ir. Darwin Rio Budi Syaka, M.T dan Lubi Rahardian, ST, M.Eng yang telah membimbing selama skripsi.
4. Lasman Saputra sebagai teman satu tim yang solid, yang selalu bersemangat untuk mengerjakan skripsi ini.
5. Senia Arini Putri yang memberikan semangat dan dorongan dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Teman – teman lab pendingin atas kebersamaannya selama menjalani skripsi.
7. Teman – teman teknik mesin 2005 yang telah membantu dan mendukung skripsi ini.

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, 17 Desember 2009

Penulis

ABSTRAK

Nama : Rifky Tri Wahyu Rosadi

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : **Pengujian Sistem Refrigerasi Cascade Dengan Menggunakan Refrigeran Alami Campuran R744 Dengan R170 Untuk Aplikasi Temperatur Rendah**

Dalam dunia pengobatan dan penelitian biomedis kebutuhan akan ruang pendingin yang dapat mencapai temperatur sangat rendah yaitu -80°C sangat dimintai karena dengan temperatur -80°C ini spesimen biomedis tidak mudah rusak, aplikasinya di bidang industri sistem refrigasi tunggal dan bertingkat tidak dapat mengatasi perbedaan yang cukup besar antara kalor yang akan diserap dan kalor yang akan dibuang akan tetapi berbeda dengan sistem refrigasi cascade. Penelitian yang dilakukan menggunakan alat yang sederhana dengan refrigeran alami ini memberikan peluang yang baik. Skripsi ini membahas mengenai pengujian sistem refrigerasi cascade dengan menggunakan refrigeran hidrokarbon pada bagian sirkuit temperatur tinggi dan refrigeran campuran R744 dengan R170 pada sirkuit temperatur rendah. Pengujian dilakukan dengan menggunakan propane sebagai refrigeran pada temperatur tinggi dan variasi komposisi masa pada sirkuit temperatur rendah untuk mencari komposisi optimum campuran R744 dengan R170. Temperatur evaporasi terendah yg dicapai pada sirkuit temperatur rendah ini adalah -94.8°C dengan refrigeran CO_2 murni akan tetapi temperatur tersebut tidak stabil, sedangkan temperatur stabil -77.95°C dicapai oleh refrigeran ethane murni dengan COP 0.77. Untuk komposisi campuran COP yang didapat sebesar 0.58 dengan komposisi 60% R744 dan 40% R170.

Kata Kunci : cascade, refrigeran campuran, R744, R170, COP

ABSTRACT

Name : Rifky Tri Wahyu Rosadi
Study Programe : Mechanical Engineering
Title : **Research In Cascade Refrigeration System Using Natural Refrigerant R744 Blend With R170 On Low Stage Application.**

In the world of biomedical the need of cold storage that can achieve temperature of -80°C is wanted because with that temperature biomedical specimen can not easily broken, in industrial application single stage and multi stage refrigeration system can not overcome the gap between the heat that will be absorb and the heat that will be release but it is different with the cascade system. The experiment that is conduct with simple cascade system and the use of natural refrigerants make the cascade system appear to be the best alternative. This paper will explain about the cascade system that will use a hidrocarbon on High Stage and blend refrigerant between R744 and R170 on Low Stage. The experimant is conduct with propane refrigerant in the high Stage and variation of blend refrigerant between R744 and R170, the use of pure CO_2 and the use of pure etahne. The lowest temperature that can be reached is -94.8°C with pure CO_2 but the temperature is unstable and the stable temperature is achieve by pure ethane -77.95°C with the COP 0.77. For the blend compositision the highest COP is 0.58 with 60%R744 an 40%R170.

Key Words : cascade,blend refrigerant, R744, R170, COP

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Rifky Tri Wahyu Rosadi
NPM : 0405020618
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 :

**PENGUJIAN SISTEM REFRIGERASI CASCADE DENGAN MENGGUNAKAN
REFRIGERAN ALAMI CAMPURAN R744 DENGAN R170 UNTUK APLIKASI
TEMPERATUR RENDAH**

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 : 17 Desember 2009

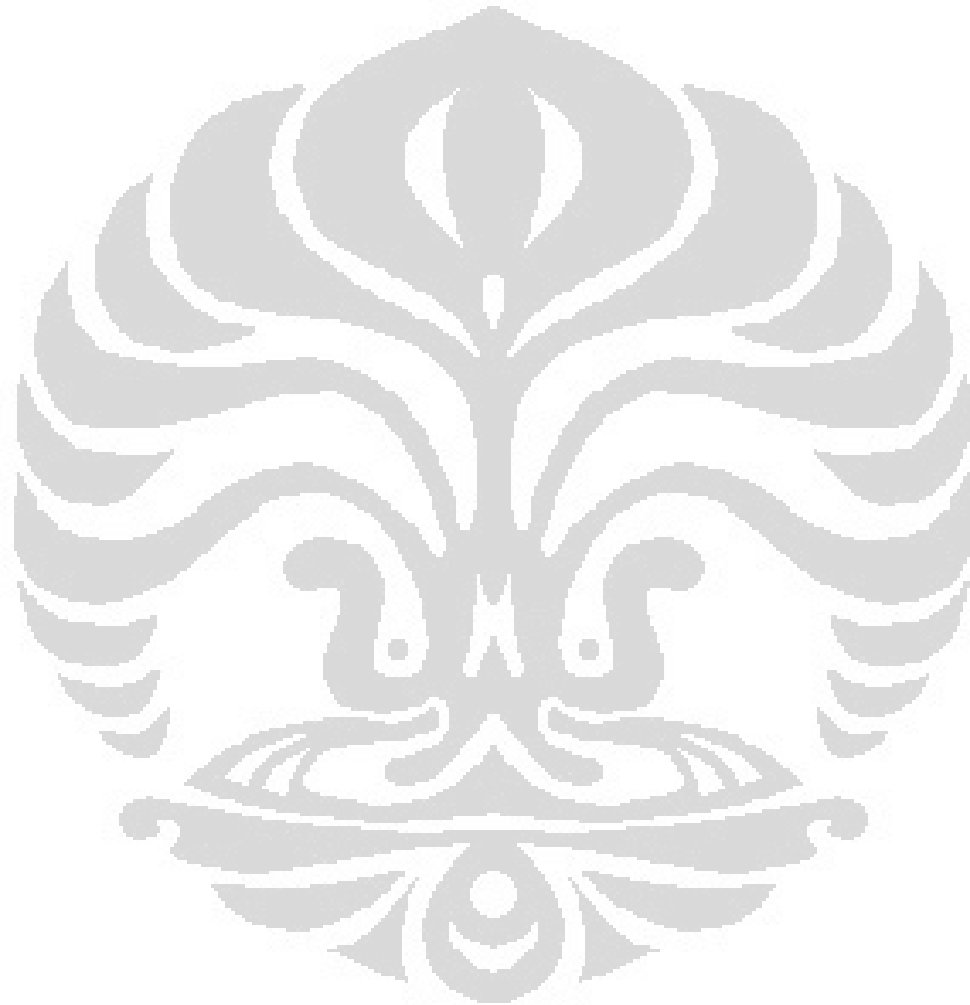
Yang menyatakan

(Rifky Tri Wahyu Rosadi)

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	III
HALAMAN PENGESAHAN	IV
DEWAN PENGUJI	IV
UCAPAN TERIMA KASIH.....	V
ABSTRAK	VI
ABSTRACT	VII
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	VIII
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	VIII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR	XI
DAFTAR TABEL.....	XIII
DAFTAR TABEL.....	XIII
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENULISAN	3
1.4 PEMBatasan MASALAH	3
1.5 METODOLOGI PENELITIAN	3
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	4
BAB 2 DASAR TEORI.....	6
2.1 REFRIGERASI DAN SISTEM REFRIGERASI.....	6
2.2 SIKLUS REFRIGERASI.....	8
2.2.1 <i>Siklus Refrigerasi Tunggal-Ideal</i>	8
2.2.2 <i>Siklus Refrigerasi Cascade</i>	11
2.3 SELEKSI REFRIGERAN.....	12
2.3.1 <i>Refrigeran</i>	12
2.3.2 <i>Perbandingan Beberapa Pilihan Refrigeran</i>	14
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	19
3.1 ALAT PENGUJIAN DAN KOMPONEN	19
3.2 TES KEBOCORAN	30
3.3 VACUUM SISTEM	31
3.4 CHARGING SISTEM	31
3.5 METODE PENGAMBILAN DATA	32
3.6 METODE VARIASI KOMPOSISI MASA R744 DENGAN R170.....	33
BAB 4 ANALISA DATA.....	34
4.1 PERBANDINGAN TEMPERATUR ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170.....	34
4.2 PERBANDINGAN TEMPERATUR KONDENSASI PADA BAGIAN HS	37
4.3 PERBANDINGAN TEMPERATUR EVAPORASI PADA BAGIAN HS	38
4.4 PERBANDINGAN TEKANAN DISCHARGE TERHADAP TEMPERATUR EVAPORASI DI HS	39
4.5 PERBANDINGAN POWER ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170.....	40
4.6 PERBANDINGAN TEKANAN KOMPOSISI MASA R744 /R170.....	42
4.7 PERBANDINGAN COP ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170.....	44
4.8 PERBANDINGAN P-H DIAGRAM ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170	49

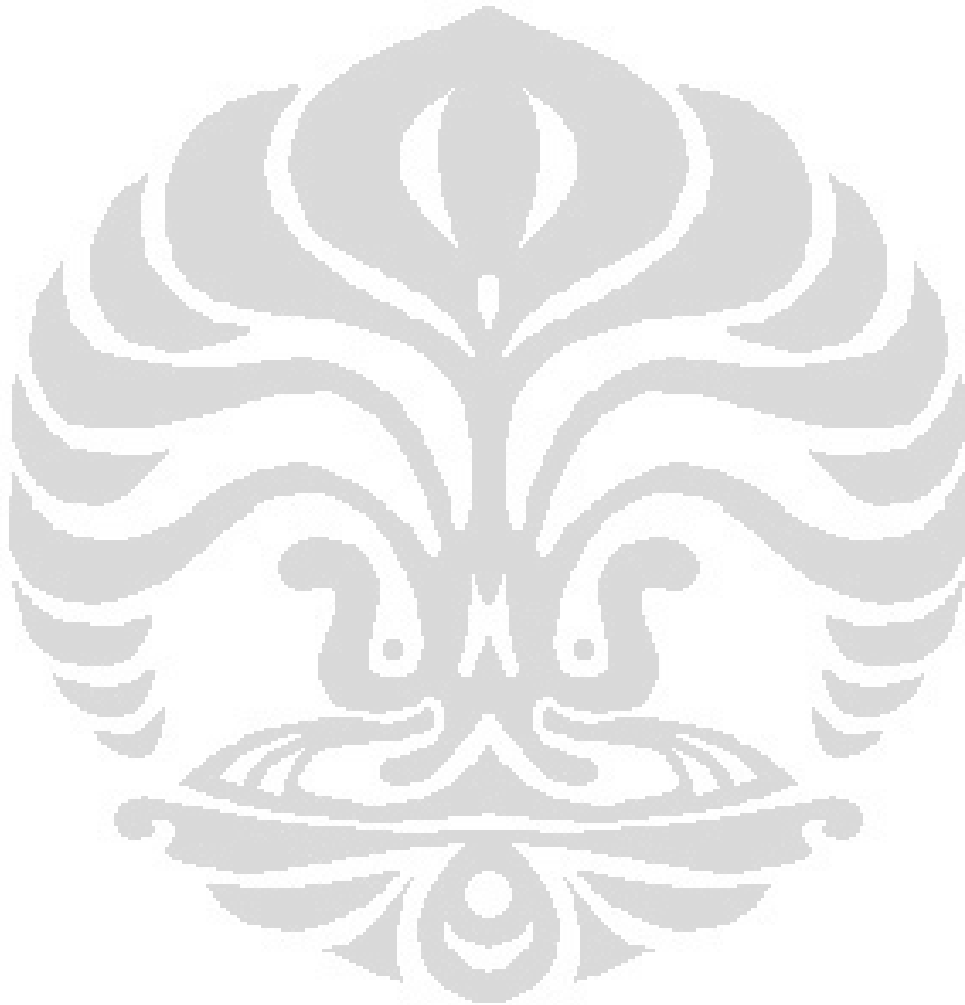
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1	KESIMPULAN.....	50
5.2	SARAN	50
DAFTAR PUSTAKA.....		51
LAMPIRAN.....		53
•	PERBANDINGAN TEMPERATUR EVAPORASI DENGAN DAYA DI LS	53
•	GAMBAR P-H DIAGRAM MASING-MASING KOMPOSISI DI LS.....	55
•	TABEL DATA TEMPERATUR (⁰ C)	57



DAFTAR GAMBAR

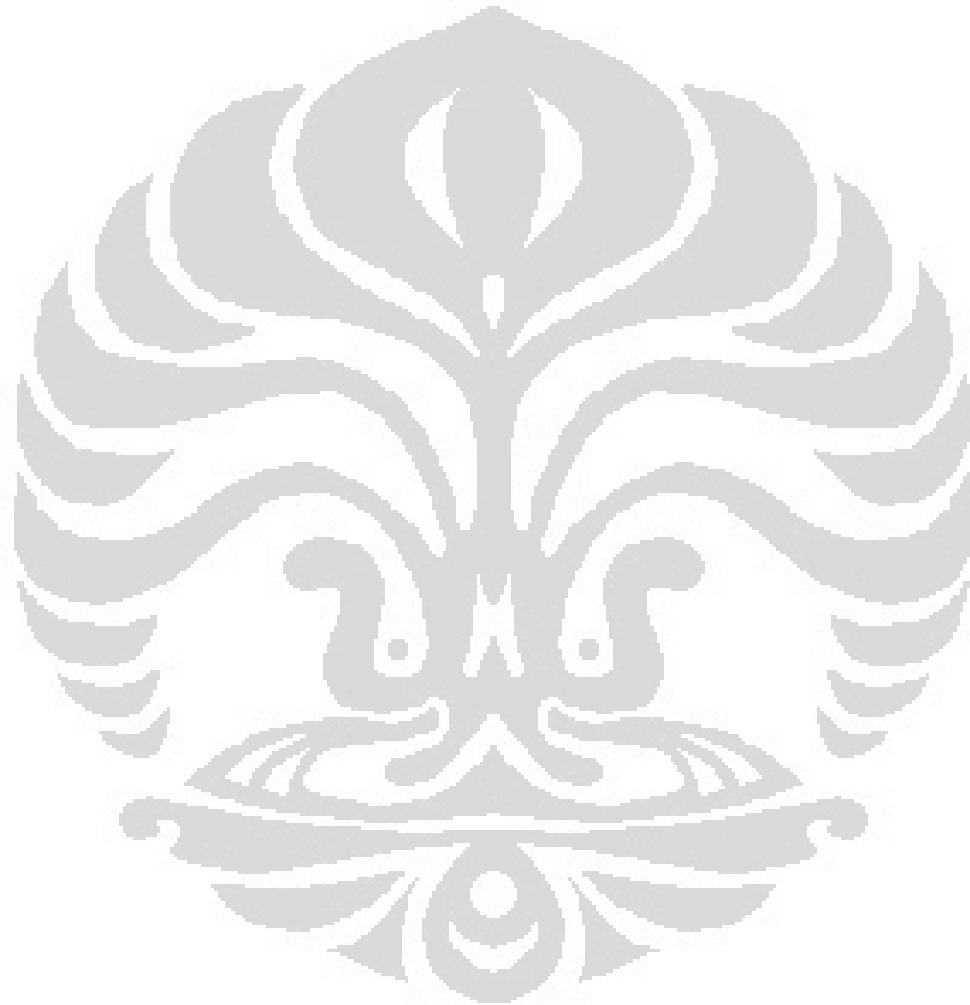
Gambar 2-1 Siklus Kompresi Uap	7
Gambar 2-2 Siklus Absorpsi.....	8
Gambar 2-3 Siklus Refrigasi Tunggal dan P-h Diagram.....	8
Gambar 2-4 Siklus Refrigasi Cascade dan T-s Diagram.....	11
Gambar 2-5 Survei Umum Refrigerant Alternatif	13
Gambar 2-6 Diagram Fase Tekanan-Temperature Karbondioksida	14
Gambar 2-7 Diagram t-x Campuran R744/R170.....	16
Gambar 2-8 P-h Diagram Amonia	17
Gambar 2-9 Karakteristik Amonia.....	18
Gambar 3-1 Skema Sistem Refrigerasi Cascade.....	19
Gambar 3-2 Wiring Diagram	20
Gambar 3-3 Kompresor HS	21
Gambar 3-4 Kompresor LS.....	21
Gambar 3-5 Cascade heat exchanger	22
Gambar 3-6 Kondenser.....	22
Gambar 3-7 Katup Ekspansi	23
Gambar 3-8 Ktaup Ekspansi Termal	23
Gambar 3-9 <i>Filter dryer</i>	24
Gambar 3-10 Akumulator.....	25
Gambar 3-11 <i>Oil separator</i>	25
Gambar 3-12 Evaporator	26
Gambar 3-13 National Instrument	27
Gambar 3-14 Termometer digital.....	28
Gambar 3-15 Termokopel.....	28
Gambar 3-16 Pressure Gauge	28
Gambar 3-17 Power Meter	29
Gambar 3-18 Refrigeran R170.....	29
Gambar 3-19 Refrigeran R744.....	30
Gambar 3-20 Tes Kebocoran.....	30
Gambar 3-21 Vakum Sistem.....	31
Gambar 3-22 Timbangan Digital	32
Gambar 4-1 Grafik Temperatur Evaporasi Terhadap Waktu	34
Gambar 4-2 Grafik Steady State di HS	35
Gambar 4-3 Grafik Temperatur lingkungan vs waktu	36
Gambar 4-4 Perbandingan Temperatur Kondensasi Masing-masing Komposisi Pada HS	37
Gambar 4-5 Perbandingan Temperatur Evaporasi Masing-masing Komposisi Pada Bagian HS	38
Gambar 4-6 Perbandingan Temperatur Evaporasi dan Pengaruhnya Terhadap Tekanan Discharge Komposisi 60% CO ₂ dan 40% Ethane	39
Gambar 4-7 Perbandingan Tekanan Discharge dan Tekanan Suction di HS	40
Gambar 4-8 Grafik Daya Listrik Rata-Rata vs Kompisisi Massa R744/R170.....	40
Gambar 4-9 Pengaruh Temperatur Evaporasi Terhadap Daya(66:34).....	41
Gambar 4-10 Grafik Tekanan Discharge LS vs Waktu	42
Gambar 4-11 Perbandingan Tekanan Discharge dan Suction pada LS.....	42
Gambar 4-12 Pengaruh Tekanan Discharge pada Daya.....	43
Gambar 4-13 Grafik COP vs Komposisi Massa R744/R170	44

Gambar 4-14 P-h Diagram sistem <i>cascade</i>	44
Gambar 4-15 Perbandingan Nilai COP_{carnot} Campuran	47
Gambar 4-16 Diagram Nilai Efisiensi <i>carnot</i> Masing-Masing Komposisi	48
Gambar 4-17 P-h Diagram Masing-masing Komposisi Massa R744/R170.....	49



DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Klasifikasi Tingkat Keamanan Refrigeran.....	15
Tabel 2-2 Perbandingan Beberapa Refrigeran (ASHRAE Standard 43-1997).....	16
Tabel 3-1 Posisi Pressure Gauge.....	29
Tabel 3-2 Komposisi Massa Refrigeran R170/R744	33
Tabel 4-1 Standar Deviasi Temperatur Ambient	36
Tabel 4-2 Perbandingan COP masing-masing Komposisi Campuran	46
Tabel 4-3 Perbandingan COP <i>carnot</i> Masing-masing Campuran	46
Tabel 4-4 Nilai Efisiensi <i>carnot</i> Masing-masing Komposisi	48



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Refrigerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi, dan memindahkan kalor tersebut ke suatu medium tertentu yang memiliki temperatur lebih rendah serta menjaga kondisi tersebut sesuai dengan yang dibutuhkan.

Pada umumnya efek refrigerasi ini dimanfaatkan untuk mengkondisikan keadaan udara suatu ruangan. Kondisi yang ada dimanfaatkan untuk menunjang kenyamanan para pekerja di suatu ruang perkantoran dan industri ataupun dimanfaatkan untuk mendukung dan menjaga kualitas hasil produksi.

Dalam beberapa bidang industri seperti pengawetan makanan, perminyakan, pengolahan bahan-bahan kimia dan pendinginan setempat (*spot cooling*) pada industri baja dibutuhkan kondisi ruangan yang bertemperatur sangat rendah berkisar antara -30°C hingga -50°C .

Kisaran temperatur yang sangat rendah itu dapat dipenuhi oleh sistem refrigerasi satu tingkat yang menggunakan satu kompresor, sistem bertekanan banyak menggunakan lebih dari satu kompresor seperti yang terdapat pada sistem refrigerasi bertingkat (*multistage*) dan kombinasi dua atau lebih sistem refrigerasi tunggal (*cascade*) dimana satu sistem sebagai *high-stage* (HS) dan lainnya sebagai *low-stage* (LS).

Namun peningkatan performa unjuk kerja (COP) dan penghematan daya menjadi faktor seleksi bagi penerapannya dalam industri. Diantara ketiganya, sistem refrigerasi *cascade* merupakan cara yang terbaik untuk mendapatkan penghematan daya dan COP.

Sebagai solusi untuk menghasilkan kondisi bertemperatur sangat rendah dan hemat daya, keunggulan sistem refrigerasi *cascade* masih dapat diperbesar. Salah satu caranya adalah dengan menggunakan refrigeran alternatif yang dapat digunakan untuk memperoleh temperatur evaporasi yang sangat rendah (-60°C sampai -80°C), ramah lingkungan dan menghasilkan nilai COP tinggi.

Semenjak disepakatinya protokol Montreal dan Kyoto terdapat dua kriteria yang harus dipenuhi suatu jenis refrigeran agar dapat digunakan secara aman dan komersial. Dua kriteria tersebut adalah ODP (*Ozone Depletion Potential*) merupakan

nilai yang menunjukkan potensi suatu jenis refrigeran terhadap kerusakan ozon dan GWP (*Global Warming Potential*) merupakan nilai yang menunjukkan potensi suatu jenis refrigeran terhadap pemanasan global.

R170 dan R744 memiliki nilai ODP dan GWP yang kecil sehingga memenuhi syarat sebagai refrigeran alternatif. Disamping ramah lingkungan, R744 juga tidak mudah terbakar dan tidak mengandung racun serta mudah didapat dipasaran dengan harga yang relatif murah. Akan tetapi, kelemahan dari R744 adalah tekanan kerja yang tinggi serta temperatur triple point yang tinggi (5,11 bar; -56,4°C), sehingga tidak bisa dipakai pada sistem refrigerasi dengan aplikasi temperatur rendah, karena itu R744 digunakan sebagai bahan campuran refrigeran dengan refrigeran hidrocarbon lainnya.

Dari diagram T-x, campuran R170/R744, terlihat bahwa refrigeran tersebut bercampur dengan cukup sempurna mendekati campuran azeotrop pada komposisi massa 70:30 pada temperatur -30°C s/d -90°C. Azeotrop adalah campuran antara dua atau lebih senyawa pada komposisi tertentu yang tidak bisa dipisahkan dengan metode destilasi biasa. Sehingga dipilih menjadi alternatif campuran refrigeran dalam penelitian ini.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Sistem refrigerasi yang ada saat ini masih banyak yang menggunakan sistem tunggal, dalam penelitian ini dirancang suatu sistem refrigerasi gabungan dua siklus tunggal (*cascade*) yang dapat menghasilkan temperatur sangat rendah dengan menggunakan *double pipe heat exchanger* sebagai *cascade heat exchanger*.

1.3 TUJUAN PENULISAN

Penulisan skripsi ini memiliki tujuan :

- Modifikasi sistem refrigerasi cascade
- Menganalisa kinerja sistem refrigerasi cascade dengan melakukan:
 - Variasi komposisi campuran R744/R170
 - Optimalisasi komposisi campuran R744/R170

1.4 PEMBATASAN MASALAH

Hal yang akan dibahas dalam makalah ini adalah nilai COP serta kecenderungan parameter-parameter yang mempengaruhi nilai COP dari sistem refrigerasi *cascade*, dengan asumsi dan batasan sebagai berikut :

1. Refrigeran yang digunakan adalah *Propane* (HS) dan campuran R170/R744 (LS)
2. Total Massa Refrigeran campuran R170/R744 sebesar 100 g dengan HS *Propane* sebesar 300gr
3. Variasi Komposisi Massa R744/R170 : 60-40; 66:34 dan 70:30 pada LS dan pada HS tetap menggunakan *propane*.
4. Jenis kompresor HS yang digunakan adalah jenis kompresor untuk refrigeran R-22. Jenis kompresor LS yang digunakan adalah jenis kompresor untuk refrigeran R-404a.

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 dan jurnal.

2. Modifikasi Sistem Refrigerasi *Cascade*

Modifikasi ini meliputi rancang ulang sistem pemipaan dan penambahan alat ukur tekanan (*pressure transmitter*) dan temperatur, serta pemasangan sight glass katup ekspansi termal pada *High Stage* dan katup ekspansi manual pada *Low Stage*.

3. Pengadaan Alat

Proses ini meliputi persiapan dan pembelian terhadap alat-alat yang dibutuhkan untuk melakukan pengujian. seperti kompresor, pipa, kawat las, *pressure gauge*, termokopel, *power meter*, refrigeran R170, refrigeran R744, Propane.

4. Perbaikan Alat uji

Perbaikan alat uji dilakukan untuk mengembalikan dan meningkatkan kondisi alat, sehingga pengujian dapat dilakukan. Perbaikan dilakukan pada bagian-bagian seperti sambungan pipa, isolator dinding pipa, penambahan alat ukur tekanan dan temperatur, pemasangan *sight-glass*, pemasangan katup ekspansi.

5. Pengujian sistem

Pengujian dilakukan dengan memantau data dari alat ukur seperti *pressure gauge*, *pressure transmitter*, termometer digital, *power meter*, untuk mengetahui karakteristik refrigeran dan COP sistem secara keseluruhan. Proses pengujian meliputi proses kalibrasi alat ukur, pengambilan data melalui alat ukur, dan perhitungan COP sistem.

6. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

Data yang telah diolah, dianalisa terhadap grafik yang diperoleh. Dari analisa tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian, dan mengetahui COP sistem refrigerasi *cascade*.

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 1 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

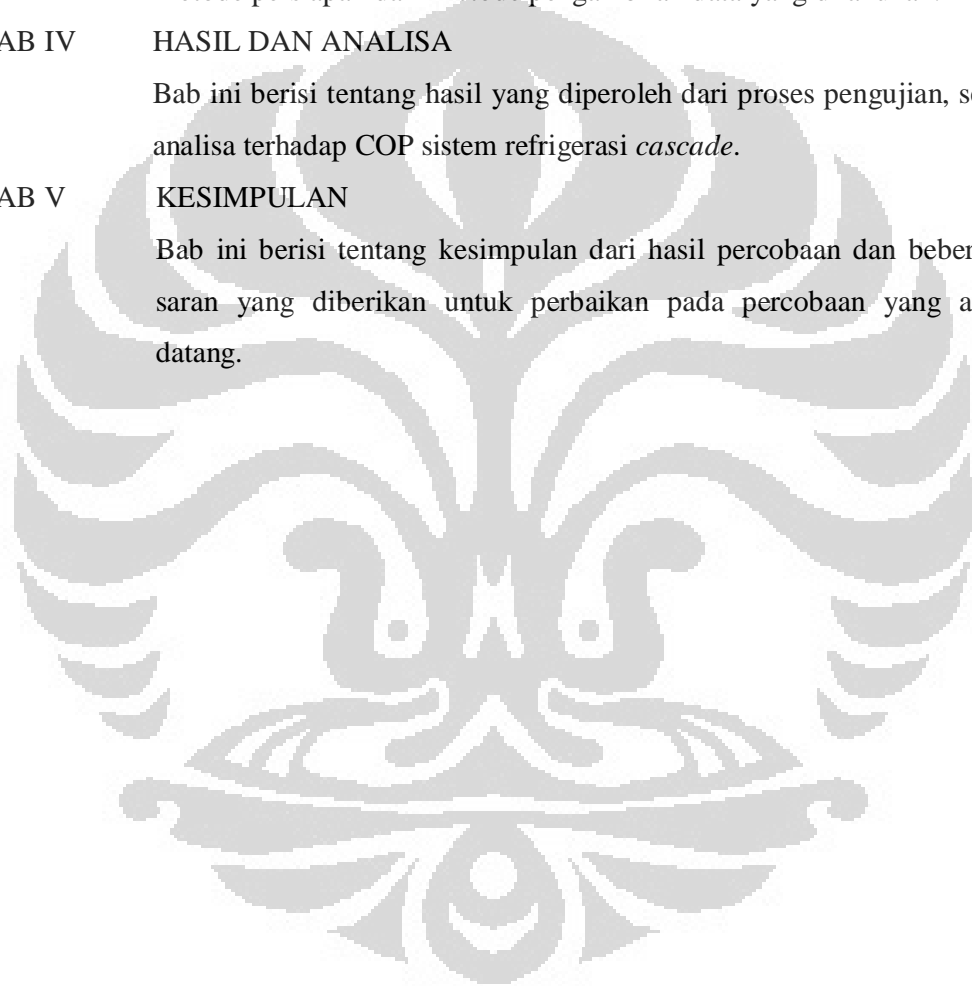
Bab ini berisikan tentang deskripsi alat pengujian yang digunakan, metode persiapan dan metode pengambilan data yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini berisi tentang hasil yang diperoleh dari proses pengujian, serta analisa terhadap COP sistem refrigerasi *cascade*.

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

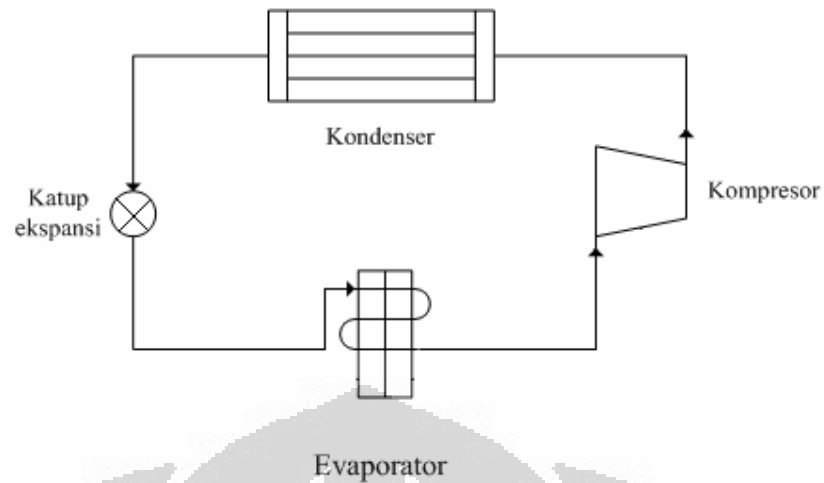
2.1 REFRIGERASI DAN SISTEM REFRIGERASI

Refrigerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi, dan memindahkan kalor tersebut ke suatu medium tertentu yang memiliki temperatur lebih rendah serta menjaga kondisi tersebut sesuai dengan yang dibutuhkan. Pada sistem ini, sebuah kompresor akan mengkompres refrigeran sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat. Refrigeran yang telah terkompres kemudian dikondensasikan dengan kondenser menjadi cairan dengan melepaskan kalor latennya. Memasuki alat ekspansi, cairan tersebut diturunkan tekanannya sehingga temperaturnya menurun dan kemudian dilanjutkan kedalam evaporator menghasilkan efek refrigerasi dengan menyerap kalor dari suatu ruangan.

Sistem refrigerasi adalah suatu sistem yang terdiri dari minimal atas kondenser, alat ekspansi, dan evaporator yang terhubung satu dengan lainnya dengan sistem pemipaan tertentu yang didukung oleh alat bantu lainnya jika dibutuhkan. Performa suatu sistem dapat diidentifikasi dari beberapa nilai diantaranya COP, kapasitas pendinginan volumetrik, kapasitas pendinginan, kapasitas kondenser, daya kompresor, temperatur *discharge*, rasio tekanan dan aliran massa refrigeran. Ada dua jenis sistem refrigerasi yang umum digunakan, yaitu :

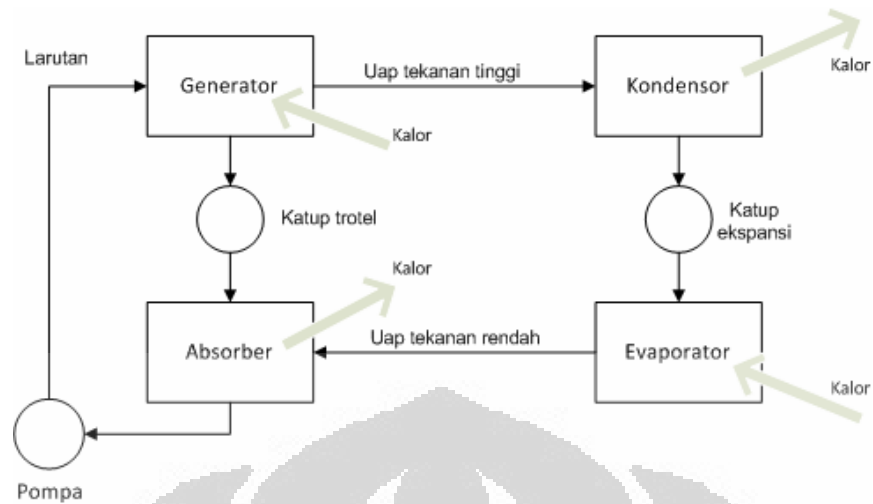
- Sistem Kompresi-Uap

Sistem ini menggunakan daur kompresi uap yang sangat umum digunakan dalam sistem refrigerasi. Pada sistem ini, proses yang terjadi adalah refrigeran mengalami kompresi secara adiabatik hingga tekanan dan temperaturnya naik, lalu melakukan pelepasan kalor secara isothermal, kemudian refrigeran diekspansikan secara adiabatik hingga tekanan dan temperaturnya turun. Terakhir, refrigeran menyerap kalor secara isothermal.



Gambar 2-1 Siklus Kompresi Uap

- **Sistem Absorpsi**
 Berbeda dengan sistem kompresi uap yang dioperasikan oleh kerja, sistem absorpsi dioperasikan oleh kalor karena sistem memberikan kalor yang diperlukan untuk melepaskan refrigeran dari cairan bertekanan tinggi. Refrigeran bertekanan rendah dari evaporator diserap oleh cairan didalam absorber, proses dilakukan secara adiabatik hingga temperatur cairan naik dan proses absorpsi berhenti. Untuk itu absorber umumnya didinginkan oleh udara atau air yang berfungsi menyerap kalor dan melepasnya ke lingkungan. Kemudian pompa menerima zat cair dari absorber dan menaikkan tekanannya lalu mengirimnya ke generator. Dalam generator, kalor dari sumber tertentu melepas uap yang telah diserap oleh larutan. Cairan dikembalikan ke absorber melalui katup *throttling* untuk menurunkan tekanannya sehingga menjaga perbedaan tekanan antara generator dengan absorber.

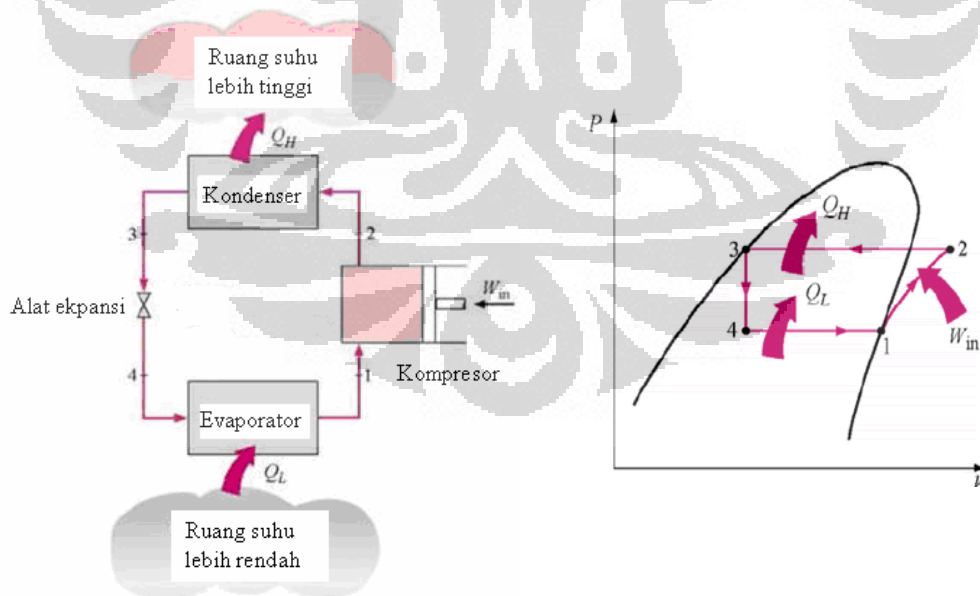


Gambar 2-2 Siklus Absorpsi

2.2 SIKLUS REFRIGERASI

2.2.1 Siklus Refrigerasi Tunggal-Ideal

Siklus refrigerasi tunggal-ideal memiliki satu tingkat kompresi isentropik dan kerugian tekanan yang terjadi pada jaringan pemipaan, katup atau pun komponen lainnya diabaikan.



Gambar 2-3 Siklus Refrigerasi Tunggal dan P-h Diagram

Proses yang terjadi :

1-2 : Kompresi adiabatik

2-3 : Pelepasan kalor pada tekanan konstan

3-4 : Ekspansi pada entalpi konstan

4-1 : Penyerapan kalor pada tekanan konstan

Kompresor

Kompresor merupakan salah satu komponen terpenting dalam sistem refrigerasi. Sesuai dengan namanya, alat ini bermanfaat untuk mengkompresikan fluida (refrigeran) yang berfase uap. Dengan adanya kompresi ini maka terjadi perbedaan tekanan antara sisi keluar (*discharge*) dengan sisi hisap (*suction*) yang menyebabkan refrigeran dapat mengalir dalam sistem refrigerasi.

Kerja kompresi isentropik :

$$w_{is} = (h_{is,comp-out} - h_{comp-in}) \quad (1)$$

Kerja kompresor :

$$w = w_{is} / \eta_{is} \quad (2)$$

Daya kompresor :

$$P = \dot{m} \times w \quad (3)$$

Kondenser

Memindahkan kalor dari sistem ke lingkungan merupakan fungsi dari sebuah kondenser. Kalor tersebut dipindahkan secara konveksi paksa dengan menggunakan sebuah kipas (*fan*) sehingga refrigeran berfase uap yang memasuki kondenser berubah fasenya menjadi cair.

Jumlah kalor yang dipindahkan oleh kondenser ditunjukkan dengan persamaan:

$$q_{cond} = (h_{cond-out} - h_{cond-in}) \quad (4)$$

Alat ekspansi

Alat ekspansi merupakan alat yang berfungsi untuk menurunkan tekanan. Refrigeran yang berasal dari kondenser umumnya masih memiliki tekanan yang cukup tinggi sehingga tekanannya perlu diturunkan. Proses yang terjadi didalam alat ekspansi diasumsikan dalam kondisi adiabatik.

$$h_{xv-in} = h_{xv-out} \quad (5)$$

Evaporator

Evaporator memiliki fungsi untuk menyerap kalor dari suatu ruangan kedalam sistem refrigerasi. Kalor tersebut diserap oleh refrigeran sehingga berubah fasenya dari cair menjadi uap.

Jumlah kalor yang diserap oleh evaporator ditentukan dengan persamaan :

$$Q_{evap} = (h_{evap-out} - h_{evap-in}) \quad (6)$$

Pada siklus refrigerasi juga perlu diketahui laju aliran massa refrigeran yang mengalir. Laju aliran massa adalah besaran yang menentukan seberapa banyak massa yang mengalir tiap satuan waktu. Laju aliran massa dapat dicari dengan membagi kapasitas refrigerasi dengan dampak refrigerasi:

$$\dot{m} = \frac{Q}{Q_{evap}} \quad (7)$$

Besarnya laju aliran massa juga dapat dicari jika daya kompresor dan kerja kompresor diketahui. Besarnya adalah sama dengan daya kompresor dibagi dengan kerja kompresor.

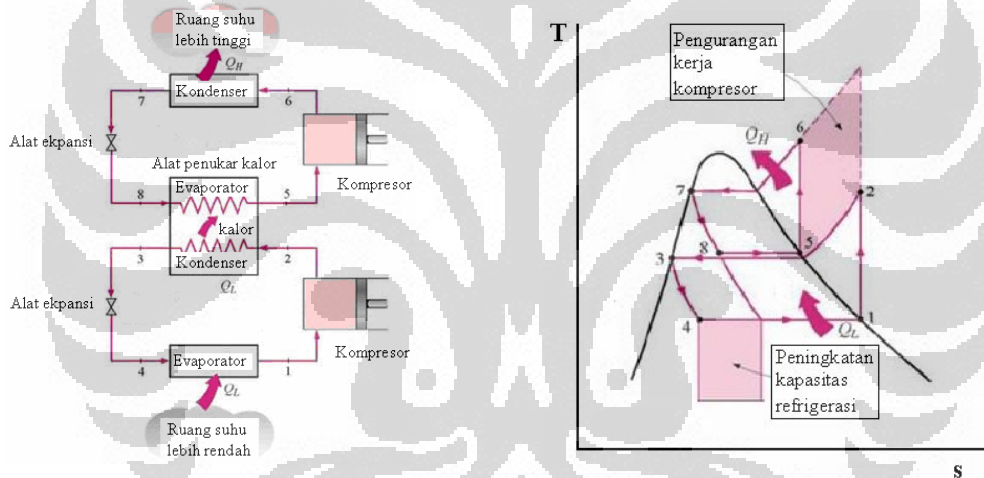
$$\dot{m} = \frac{P}{w} \quad (8)$$

Dari dampak refrigerasi, dapat dihitung besarnya COP dari sistem refrigerasi. COP dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{komp}} \quad (9)$$

2.2.2 Siklus Refrigerasi Cascade

Sistem refrigerasi *cascade* terdiri dari dua sistem refrigerasi siklus tunggal. Sistem pertama disebut *high-stage* (HS) dan sistem kedua disebut *low-stage* (LS). Pada prinsipnya efek refrigerasi yang dihasilkan oleh evaporator HS dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dilepas oleh kondenser LS sehingga dihasilkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator LS.



Gambar 2-4 Siklus Refrigerasi Cascade dan T-s Diagram

Sistem seperti ini, meskipun akan menghasilkan temperatur yang sangat rendah, namun berdampak pada tingginya daya kompresor yang digunakan karena sistem *cascade* menggunakan dua buah kompresor. Akibatnya, koefisien kinerja yang dihasilkan juga rendah.

Pada sistem refrigerasi *cascade*, besarnya kerja kompresor total didapat dengan menjumlahkan kerja kompresor pada sistem HS dan LS.

$$W_{Total} = W_{HS} + W_{LS} \quad (10)$$

Dan nilai koefisien kinerja (COP) didapat dengan :

$$COP = \frac{Q_{evapLS}}{W_{kompresortotal}} \quad COP = \frac{Q_{efektif}}{W_{total}}$$

(11)

2.3 SELEKSI REFRIGERAN

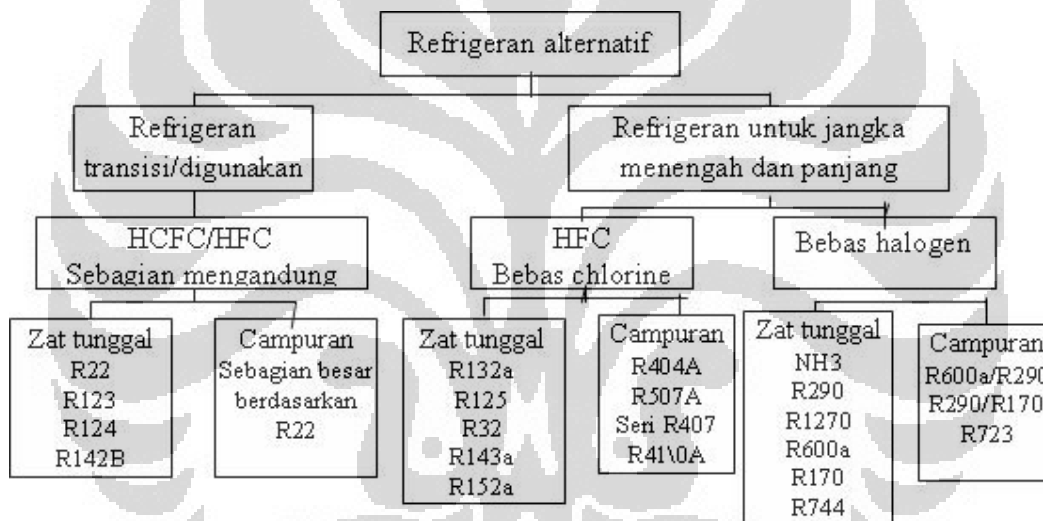
2.3.1 Refrigeran

Refrigeran merupakan fluida kerja pada sistem refrigerasi atau pompa kalor. Refrigeran ini berfungsi menyerap kalor/panas dari suatu daerah dan membuangnya ke daerah yang lain, biasanya hal ini dilakukan melalui proses evaporasi (penguapan) dan kondensasi (pengembunan).

Pemilihan refrigeran merupakan kompromi antara beberapa sifat-sifat termodinamik yang saling berlawanan. Suatu refrigeran harus memenuhi beberapa persyaratan, sebagian dari persyaratan tersebut tidak secara langsung berhubungan dengan kemampuannya pada perpindahan kalor/panas. Stabilitas kimia di bawah beberapa kondisi tertentu saat digunakan merupakan karakteristik yang paling penting. Beberapa sifat yang berhubungan dengan keamanan refrigeran seperti tidak dapat terbakar (*non-flammable*) dan tidak beracun saat digunakan merupakan sifat yang juga dibutuhkan. Harga, ketersediaan, efisiensi, dan kecocokan dengan pelumas kompresor dan bahan-bahan dari komponen-komponen sistem refrigerasi juga harus diperhatikan. Pengaruh refrigeran terhadap lingkungan apabila refrigeran tersebut bocor dari suatu sistem harus pula dipertimbangkan.

Pada sistem refrigerasi cascade, pada sirkuit temperatur tinggi dapat menggunakan refrigeran yang umum digunakan misalnya ammonia (R717), Propane (R290), Propylene (R1270), Isobutan (R600a) atau R404A. Untuk daerah temperatur kerja antara 15°C s/d -25°C, maka propana (R290) merupakan pilihan refrigeran yang menghasilkan performa tertinggi sistem bila digunakan pada sirkuit temperatur tinggi. Sedangkan untuk temperatur rendah antara -40°C s/d -70°C, dipilih refrigeran tekanan tinggi dengan densitas uap yang tinggi. Tetapi hanya sedikit pilihan refrigeran yang memenuhi syarat diatas. Selama ini R13 dan R503a merupakan refrigeran yang paling umum dipakai. Namun

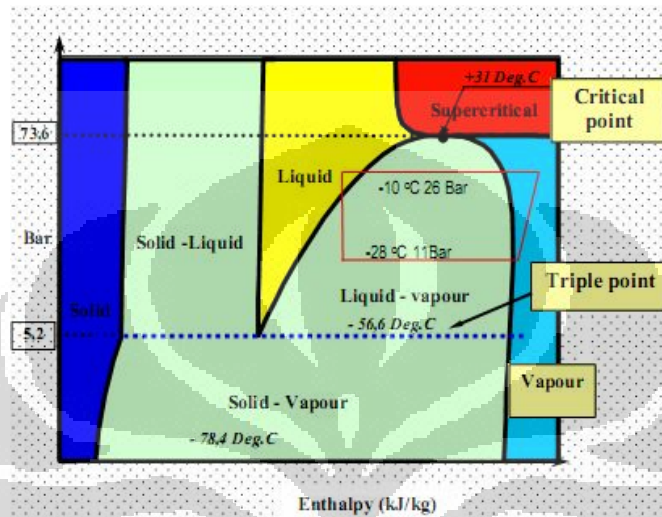
demikian, refrigeran-refrigeran ini termasuk refrigeran CFC, yang menurut Protokol Montreal pada 2010 sudah tidak dapat dipergunakan lagi. Sehingga, refrigeran alternatif yang lain harus segera ditemukan untuk menggantikannya. Beberapa alternatif refrigeran ditunjukkan pada gambar 2-5, refrigerant yang masih sebagian mengandung chlorine masih digunakan sebagai refrigeran transisi yang nantinya untuk jangka menengah akan digantikan oleh refrigeran HFC yang bebas chlorine. Dalam memilih refrigeran yang akan digunakan, selain mempertimbangkan sistem yang akan dipakai, terdapat beberapa kriteria khusus. Sesuai standar ANSI/ASHRAE 34-1992, terdapat dua faktor penting yang sangat berpengaruh dalam pemilihan refrigeran, meliputi kandungan racun (*toxicity*) dan mampu terbakar (*flammability*).



Gambar 2-5 Survei Umum Refrigerant Alternatif

Alternatif penggunaan golongan refrigeran 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. Oleh karena itu, untuk jangka panjang perlu dicari refrigeran alternatif baru bebas terhadap zat halogen yang diarahkan pada penggunaan refrigeran-refrigeran alamiah semisal karbondioksida (CO₂), ammonia atau hidrokarbon.

Karena ramah terhadap lingkungan, karbondioksida dirasa masih lebih menguntungkan dibandingkan dengan amonia atau hidrokarbon. Hal ini dikarenakan refrigeran karbondioksida murah dan sesuai dengan pelumas dan peralatan pada sistem refrigerasi.



Gambar 2-6 Diagram Fase Tekanan-Temperature Karbondioksida

Namun demikian, penggunaan karbondioksida sebagai refrigeran dibatasi oleh tingginya tekanan dan tingginya temperatur *triple* (5,2 bar dan 216,58 K). Tekanan dan temperatur dalam sistem refrigerasi tidak boleh lewat dibawah tekanan dan temperatur *triple* (gambar 2-6), apabila CO₂ berada dibawah tekanan dan temperatur *triple* maka, *dry ice* karbondioksida akan terbentuk dan hal ini tidak diinginkan. Hal inilah yang menghalangi penggunaan karbondioksida untuk bagian temperatur rendah pada sistem refrigerasi *cascade*. Solusi untuk mengatasi kekurangan ini diantaranya adalah dengan mencampurkan karbondioksida dengan refrigeran yang lain.

2.3.2 Perbandingan Beberapa Pilihan Refrigeran

Klasifikasi tingkat keamanan refrigeran dibuat berdasarkan kombinasi kandungan racun dan mampu bakar pada refrigeran tersebut: A1, A2, A3, B1, B2, dan B3. Refrigeran yang memiliki tingkat keamanan terbaik adalah A1.

Tabel 2-1 Klasifikasi Tingkat Keamanan Refrigeran

Safety level	Lower Toxicity	Higher Toxicity
Higher Flammability	A3	B3
Lower Flammability	A2	B2
No Flame Propagation	A1	B1

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

Dalam hipotesisnya Roland dan Molina mengatakan bahwa CFC (*Chlorofluorocarbon*) akan terurai menjadi unsur penyusunnya oleh karena radiasi sinar ultraviolet pada lapisan stratosfer. Munculnya unsur klorin sebagai katalis pada lapisan tersebut menyebabkan terjadinya dekomposisi atau penguraian dari ozon (O_3) menjadi oksigen (O_2). Selanjutnya penguraian lapisan ozon dapat mengakibatkan terjadinya radiasi langsung sinar ultraviolet ke atas permukaan bumi.

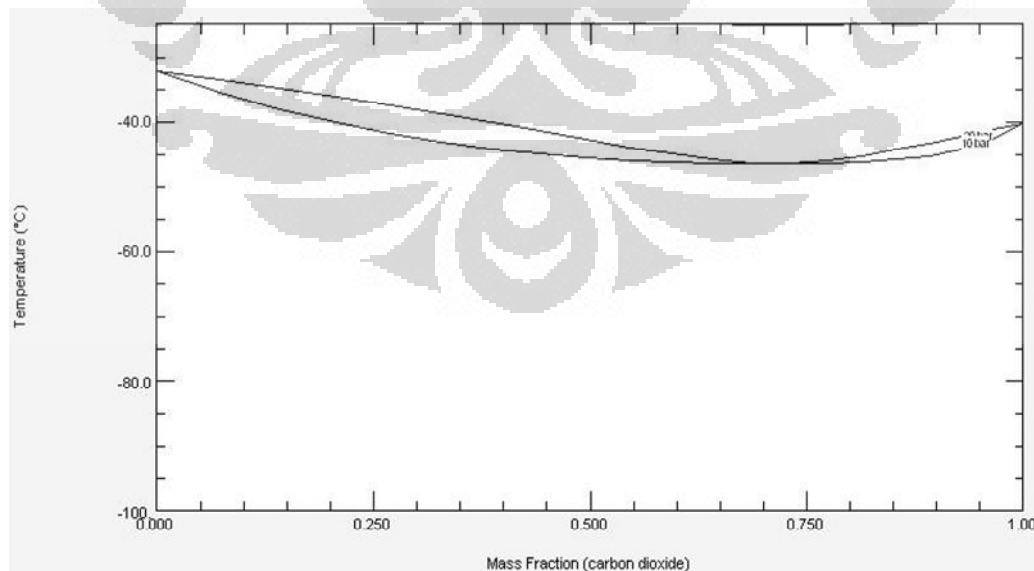
Selain menimbulkan dampak negatif pada lapisan ozon, refrigeran yang terlepas ke udara ternyata dapat menimbulkan efek rumah kaca sama seperti yang disebabkan oleh gas karbondioksida (CO_2). Peningkatan temperatur yang cukup besar yang diakibatkan oleh efek rumah kaca dapat mengakibatkan pemanasan global. Hal ini mengakibatkan meningkatnya ketinggian air laut setiap tahunnya serta perubahan iklim.

Tabel 2-2 menunjukkan nilai ODP dan GWP yang dimiliki oleh CFC (*Chlorofluorocarbon*), HFC (*Hydrofluorocarbon*) dan *Hydrocarbon*. Sebagai contoh, R170 dan R744 memiliki nilai ODP dan GWP yang kecil sehingga memenuhi syarat sebagai refrigeran alternatif.

Tabel 2-2 Perbandingan Beberapa Refrigeran (ASHRAE Standard 43-1997)

Properties	R13 CClF3	R744 CO2	R170 C2H6	R744/R170 CO2/ C2H6
Molecular mass	104.46	44.01	30.07	37.039
Normal boiling point	-81.3	-78.4	-88.9	-96.339
Crit. temperature (T_{cr})	28.9	31.1	32.2	18.163
Crit. pressure (P_{cr})	38.8	73.8	48.7	56.496
TLV	1000	5000	1000	n/a
LFL	none	None	2.9	n/a
Heat of combustion	-3		-	
Atmospheric life [yr]	640	>50	-	
ODP	1	0	0	0
GWP	14000	1	~20	<20

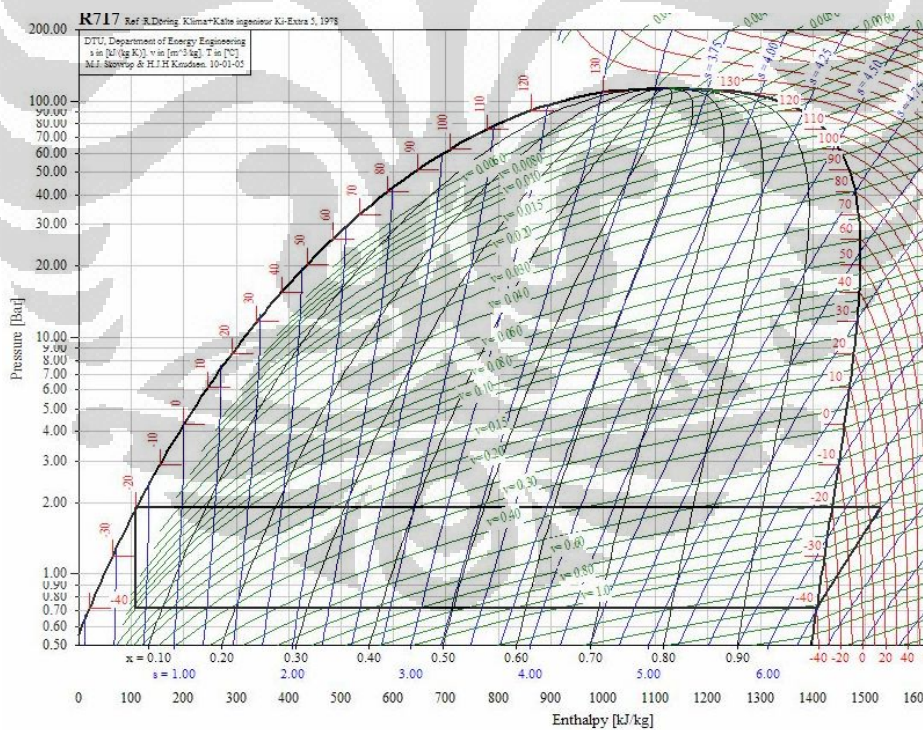
Disamping ramah lingkungan, R744 juga tidak mudah terbakar dan tidak mengandung racun serta mudah didapat dipasaran dengan harga yang relatif murah. Akan tetapi, kelemahan dari R744 adalah tekanan kerja yang tinggi serta temperatur triple point yang tinggi (5,11 bar; $-56,4^{\circ}\text{C}$), sehingga tidak bisa dipakai pada sistem refrigerasi dengan aplikasi temperatur rendah, karena itu R744 digunakan sebagai bahan campuran refrigeran dengan refrigeran hidrocarbon lainnya.



Gambar 2-7 Diagram t-x Campuran R744/R170

Dari diagram T-x, campuran R744/R170, terlihat bahwa refrigeran tersebut bercampur dengan cukup sempurna mendekati campuran azeotrop pada komposisi massa 70:30 pada temperatur -30°C s/d -90°C . Azeotrop adalah campuran antara dua atau lebih senyawa pada komposisi tertentu yang tidak bisa dipisahkan dengan metode destilasi biasa. Sehingga dipilih menjadi alternatif campuran refrigeran dalam penelitian ini.

Untuk refrigeran amonia sendiri tidak dijadikan sebagai pilihan karena beberapa hal seperti tingkat korosif dari amonia terhadap tembaga oleh karena itu penggunaan kompresor *hermatic* dan *semi-hermatic* tidak memungkinkan untuk menggunakan refrigeran amonia karena kompresor tersebut mempunyai komponen yang bermaterial tembaga (Hermann Halozan, 2007), disamping itu amonia memiliki sifat racun yang sangat tinggi (N. Cox, 2007). Selain itu amonia adalah refrigeran dengan tekanan kerja yang rendah seperti yang dapat dilihat dari gambar P-h dibawah ini :



Gambar 2-8 P-h Diagram Amonia

Gambar 2-8 diatas di ambil dari simulasi dengan menggunakan software *coolpack*, dari gambar diatas dapat dilihat bahwa untuk mendapatkan suhu

kondensasi -20°C tekanan yang dibutuhkan sekitar 2 bar, oleh karena itu amonia tidak dijadikan sebagai pilihan refrigeren. Selain itu amonia juga memiliki titik triple point lebih tinggi dibandingkan oleh etane yaitu -77.65°C pada tekanan 1 atm (gambar 2-9), dengan begitu amonia bukan merupakan refrigeran yang cocok yang dipakai pada sirkuit temperatur rendah karena pada sirkuit temperatur rendah temperatur yang ingin dicapai $<-80^{\circ}\text{C}$ walaupun amonia memiliki kapasitas pendinginan yang sangat besar.

ammonia - NH3 (CAS# 7664-41-7)			
Molar mass	Triple pt. temp.	Normal boiling pt.	Gas phase dipole at NBP
17.03 kg/kmol	-77.655 °C	-33.327 °C	1.47 debye
Critical Point			
Temperature	Pressure	Density	Acentric factor
132.25 °C	113.33 bar	225.0 kg/m ³	0.25601
Range of applicability			
Minimum temp.	Maximum temp.	Maximum pressure	Maximum density
-77.655 °C	426.85 °C	10000.0 bar	901.16 kg/m ³
NIST Rec: FEQ Helmholtz equation of state for ammonia of Tillner-Roth et al. (1993).			
LITERATURE REFERENCE			
Tillner-Roth, R., Harms-Watzenberg, F., and Baehr, H.D., "Eine neue Fundamentgleichung fuer Ammoniak," DKV-Tagungsbericht, 20:167-181, 1993.			
see also:			
Baehr, H.D. and Tillner-Roth, R. Thermodynamic Properties of Environmentally Acceptable Refrigerants: Equations of State and Tables for Ammonia, R22, R134a, R152a, and R123.			
Equation of State	Viscosity	Thermal Conductivity	
Surface tension	Melting Line	Sublimation Line	
OK	Cancel	Print	Copy Copy All

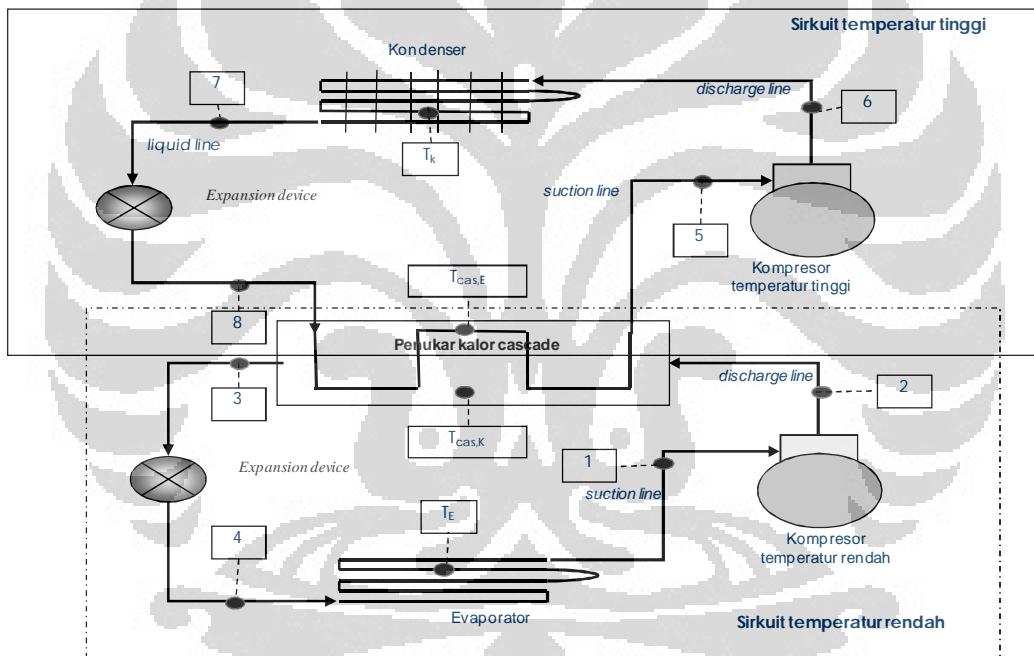
Gambar 2-9 Karakteristik Amonia

Dari gambar 2-9 ini dapat diketahui pula bahwa titik didih dari amonia cukup tinggi yaitu -33.32°C sehingga pada saat berada di evaporator amonia akan berbentuk gas seluruhnya, ini dapat mengakibatkan proses perpindahan kalor yang kurang baik karena proses perpindahan kalor yang baik adalah saat refrigeran itu berada pada fase cair.

BAB 3 METODE PENELITIAN

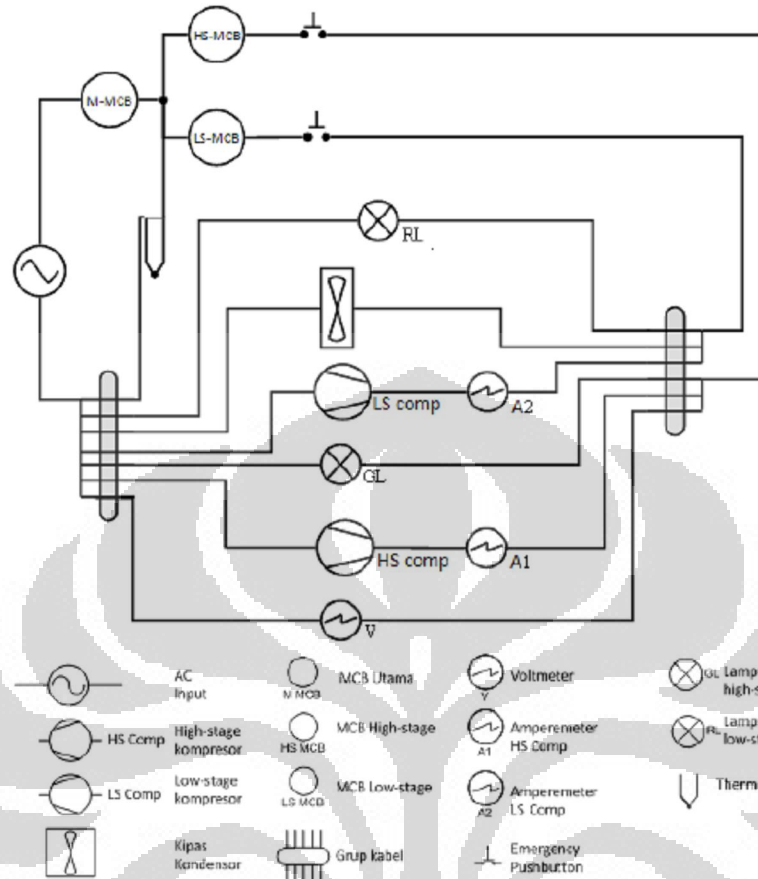
3.1 ALAT PENGUJIAN DAN KOMPONEN

Sistem *cascade* yang digunakan dalam pengujian ini terdapat di gedung Department Teknik Mesin Lantai 3 (Depok). Sebelumnya sistem ini dimanfaatkan untuk mendinginkan komponen pesawat di IPTN dengan menggunakan refrigeran R502 pada sistem HS dan R503 pada sistem LS. Untuk melakukan pengujian ini maka dilakukan beberapa modifikasi. Modifikasi yang dilakukan meliputi komponen kompresor, fan kondenser, alat ukur (*pressure gauge/pressure transmitter* dan termokopel), *filter dryer*, akumulator, *sightglass* dan *oil separator*.



Gambar 3-1 Skema Sistem Refrigerasi Cascade

Dari gambar 3-1 diatas merupakan skema sederhana dari sistem *cascade* dimana pada sirkuit temperatur tinggi evaporatornya menjadi satu tempat dengan kondenser sirkuit temperatur rendah. Hal tersebut diperlukan agar temperatur yang dapat dicapai pada evaporator sirkuit temperatur rendah dapat melebihi temperatur yang dicapai oleh sirkuit temperatur tinggi.



Gambar 3-2 Wiring Diagram

Gambar 3-2 diatas menunjukkan rangkaian listrik yang diaplikasikan pada sistem *cascade*, dimana arus yang terbaca pada amper meter merupakan arus dari masing-masing kompresor akan tetapi pada power meter arus yang teBaca merupakan arus gabungan dari kompresor HS dan kompresor LS serta kipas dari kondensator pada HS. Sehingga daya yang di baca adalah daya total dimana daya kompresor HS, kompresor LS serta fan kondensator HS. Power utama untuk menyalakan seluruh sistem tergabung dengan tombol fan kondensator HS, sehingga jika power utama ditekan maka fan kondensator HS akan langsung menyala, setelah power utama ditekan maka tombol yang aktif selanjutnya adalah kompresor pada bagian HS oleh karenanya jika tombol kompresor LS ditekan tanpa menyalakan kompresor HS maka kompresor LS tidak akan menyala, karena aliran listrik tidak langsung terhubung pada kompresor LS melainkan melalui kompresor HS terlebih dahulu.

➤ **Kompresor**

• HS

Merek/model : Tecumseh/ AJB5515EXD

Horse Power : 1

Voltage/Hz : 230/50

Refrigeran : R22

Lubricant : *Alkylbeneze*

Dimensi : Panjang 23 cm, lebar 15 cm dan tinggi 30 cm



Gambar 3-3 Kompresor HS

• LS

Merek/model : Tecumseh/ AJA7494ZXD

Horse Power : 1

Voltage/Hz : 230/50

Refrigeran : R404A

Lubricant : *Alkylbeneze*

Dimensi : Panjang 23 cm, lebar 15 cm dan tinggi 30 cm



Gambar 3-4 Kompresor LS

➤ **Cascade Heat Exchanger**

Tipe : *Shell & Tube*
Material : Pipa tembaga
Dimensi : Panjang 60 cm, diameter 2,375 in

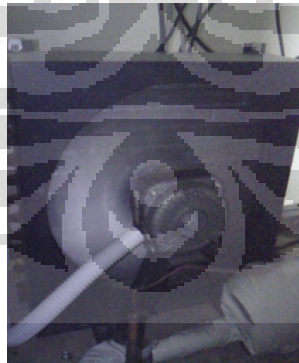


Gambar 3-5 Cascade heat exchanger

➤ **Kondenser**

▪ HS

Tipe : *Tubes & fins air cooled evaporator*
Material : Pipa tembaga
Fan : 1300 rpm - 0.5A
Dimensi : Panjang 31 cm, lebar 9 cm dan tinggi 31 cm



Gambar 3-6 Kondenser

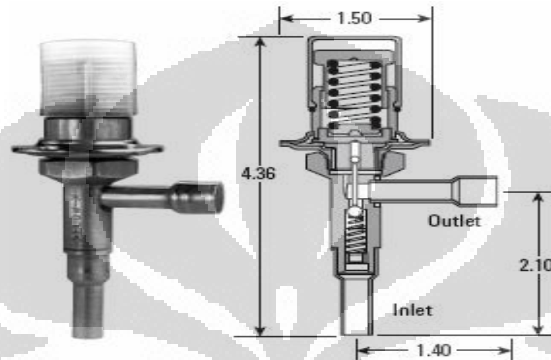
➤ Katup Ekspansi

Alat ekspansi yang digunakan adalah *thermal expansion valve* pada bagian HS dan katup ekspansi manual, dimana laju aliran refrigeran dapat diatur secara manual.

Merk/type : Sporlan/AS-HS-B20.133 2X3 ODF

Adj. Range : 0,17 bar – 6,21 bar

Refrigerant : R12; R22; R502



Gambar 3-7 Katup Ekspansi Manual

Ketika kepala katup ekspansi manual diputar searah jarum jam, maka pegas akan mendorong bantalan kecil berbentuk bola dibawahnya, sehingga katup akan terbuka dan laju aliran massa refrigeran akan mengalir lebih banyak. Dengan katup ekspansi manual ini tekanan refrigeran yang melalui ekspansi akan bisa diatur besarnya sehingga temperatur yang akan masuk pada evaporator pun akan bervariasi tergantung dari bukaan katup ekspansi tersebut.

Untuk katup ekspansi termal menggunakan merek dari danfoss yang mempunyai rentang temperatur 0°C hingga -40°C . Katup ekspansi termal ini menggunakan R22 sebagai refrigeran pada *sensing bulb*-nya.



Gambar 3-8 Ktaup Ekspansi Termal

➤ **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* ditempatkan setelah kondenser dan sebelum alat ekspansi. Jenis yang digunakan:

- Merek/model : Emerson/EK 163
- Refrigeran : CFC, HCFC dan HFC
- Dimensi : Panjang 17,46 cm dan diameter 6,67 cm



Gambar 3-9 *Filter dryer*

➤ **Akumulator**

Akumulator merupakan *vessel* yang menjadi tempat penampungan refrigeran setelah melewati evaporator sebelum memasuki *suction line* kompresor. Fungsinya adalah untuk memastikan tidak ada cairan yang masuk ke kompresor yang dapat menyebabkan kerusakan karena cairan merupakan fluida *incompressible*. Akumulator ditempatkan sebelum *suction line* kompresor dan setelah alat ekspansi. Kapasitas akumulator diharuskan minimal 50% dari kapasitas refrigeran dalam sistem. Akumulator yang dipakai adalah:

- Merek/model : Emerson/A-AS 464
- Refrigeran : CFC, HCFC dan HFC
- Dimensi : Tinggi 15,95 cm dan diameter 10,16 cm



Gambar 3-10 Akumulator

➤ **Oil Separator**

Oil separator berfungsi untuk memastikan pelumas yang digunakan kompresor untuk kembali ke *crankcase* kompresor sebelum masuk ke kondenser. Pelumas tersebut kembali ke *crankcase* karena tekanan pada *oil separator* yang lebih tinggi dibandingkan pada *crankcase*. Jika tekanan pelumas lebih rendah, terdapat katup khusus akan menutup untuk mencegah refrigeran masuk ke *crankcase*. *Oil separator* yang digunakan adalah:

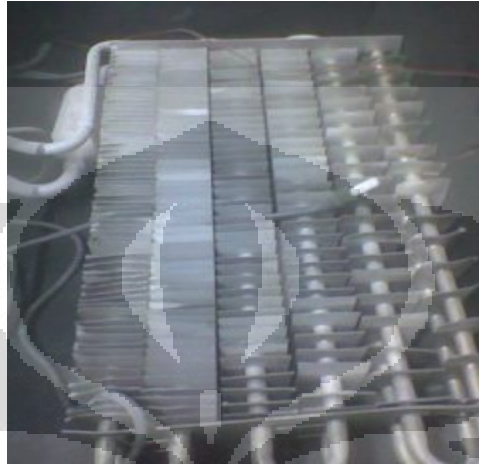
Merek/model : Asian First Brand
Refrigeran : CFC, HCFC dan HFC
Dimensi : Tinggi 26,035 cm, diameter 10,16 cm



Gambar 3-11 Oil separator

➤ **Box Pendingin**

Box pendingin yang menjadi tempat penyimpanan barang yang akan didinginkan memiliki dimensi panjang 50 cm, lebar 39 cm dan tinggi 35 cm. Didalam box pendingin ini terdapat evaporator yang akan menyerap panas dari box pendingin. Semua pipa evaporator terbungkus oleh Polyurethane.

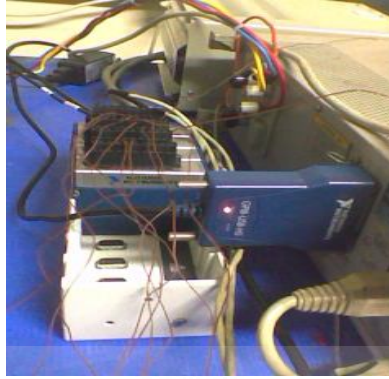


Gambar 3-12 Evaporator

➤ **National Instrument**

National instrument merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengukuran dalam sistem ini, dalam pengujian ini digunakan 4 panel dimana panel yang pertama dengan tipe 9211 digunakan untuk mengukur tekanan pada sistem, kemudian 3 panel selanjutnya untuk mengukur temperatur. Nantinya data dari national instrument ini akan dikonversikan ke dalam bentuk digital dengan bantuan software labview, sehingga data yang diperoleh akurat, national instrument yang digunakan dalam sistem ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Model	: 9211 dan 9203
Dimensi	: Panjang 9 cm, lebar 3 cm dan tinggi 7 cm
Jumlah panel	: 4 panel



Gambar 3-13 National Instrument

➤ **Shut-off Valve**

Penggunaan *shut-off* dalam percobaan ini adalah untuk *charging* sistem yaitu proses pemasukan refrigeran, untuk lebih memudahkan dalam pemasukan refrigeran. Shut off yang digunakan berukuran 1/4 hal ini disesuaikan dengan ulir yang ada pada selang refrigeran yang digunakan.

➤ **Pipa Tembaga**

Sebagai medium tempat mengalirnya refrigeran maka digunakan pipa dengan material tembaga, dipilih tembaga dengan pertimbangan bahwa material ini memiliki konduktivitas termal yang baik sehingga memiliki perpindahan panas yang cukup baik. Pipa tembaga yang digunakan merupakan pipa tembaga Australia dengan pertimbangan pipa tersebut memiliki sifat fisik yang lebih kuat dibanding merek lain. Dalam percobaan ini digunakan pipa tembaga dengan ukuran diameter 3/8 dan 1/4.

➤ **Alat Ukur**

• **Thermometer Digital**

Merek/model	: Kin & BNT/TPM900
Kisaran temperature	: -30°C-110°C
Accuracy	: +/- 1°C
Power consumption	: <3W (AC)
Environment temperature range	: 0°C-60°C
Environment humidity range	: 20%-85%
Tipe probe	: NTC



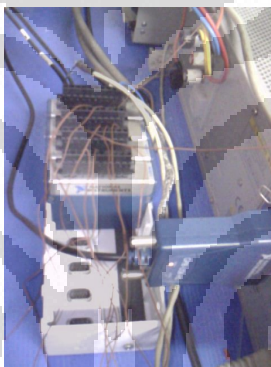
Gambar 3-14 Termometer digital

- **Termokopel berbasis NI**

Tipe : K

Temp. range : 100⁰C - 110⁰C

Accuracy : +/- 1⁰C



Gambar 3-15 Termokopel

- **Pengukur Tekanan**

High pressure : 0-35 bar atau 0-500 psi

Low pressure : 0-17.5 bar atau 0-250 psi



Gambar 3-16 Pressure Gauge

Tabel 3-1 Posisi Pressure Gauge

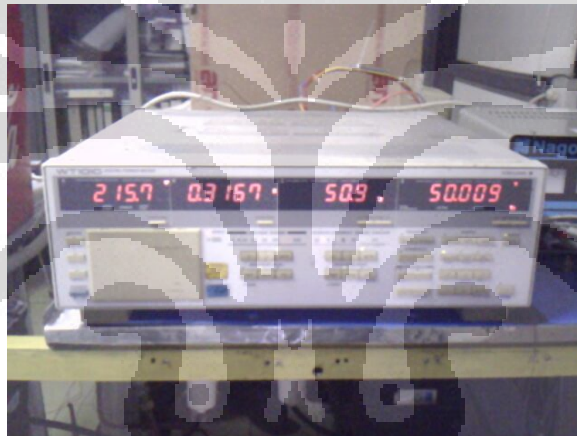
Posisi Pressure Gauge	HS	LS
Suction	1	1
Discharge	1	1
Condensor Out	1	1
Evaporator In	1	1

- **Power Meter**

Dipakai untuk mengukur daya listrik kompresor HS dan LS

Model : Yokogawa W1010

Volt/Freq : 230/50



Gambar 3-17 Power Meter

- **Refrigeran R170**

Type : High Purity (99,5%)

Capacity : 1,5 kg



Gambar 3-18 Refrigeran R170

➤ **Refrigeran R744**

Type : High Purity (99,99%)

Capacity : 80 kg



Gambar 3-19 Refrigeran R744

3.2 TES KEBOCORAN

Setelah semua sistem pemipaan serta komponennya terpasang, maka terlebih dahulu dilakukan tes kebocoran. Adapun prosedurnya adalah sebagai berikut:

- Unit dalam keadaan OFF
- Hubungkan selang angin bertekanan kepada inlet sistem.
- Charging , Tekanan = 7-8 bar
- Sistem Pemipaan di tes kebocoran dengan busa sabun
- Tandai setiap tempat yang bocor
- Perbaiki kebocoran.



Gambar 3-20 Tes Kebocoran

3.3 VACUUM SISTEM

Setelah dipastikan tidak ada kebocoran pada sistem, maka langkah selanjutnya adalah melakukan evakuasi sistem menggunakan pompa vakum. Langkah ini dimaksudkan untuk memastikan sistem tidak mengandung uap air. Adapun prosedurnya adalah sebagai berikut:

- Unit dalam keadaan OFF
- Hubungkan selang pompa vakum pada katup *suction kompresor*.
- Start pompa vakum hingga selama kurang lebih 30 menit.
- Tutup katup *suction* kompresor dan lepaskan selang pompa vakum.
- Stop pompa vakum.



Gambar 3-21 Vakum Sistem

3.4 CHARGING SISTEM

Setelah proses evakuasi sistem dengan menggunakan pompa vakum selesai, maka dilanjutkan dengan pengisian refrigeran kedalam sistem sesuai dengan kebutuhan. Adapun prosedurnya adalah sebagai berikut:

- Unit dalam keadaan OFF
- Hubungkan selang refrigeran pada suction kompresor.
- Buka katup tabung refrigeran.
- Purge/flash refrigeran beberapa saat pada katup kompresor.
- Kencangkan selang refrigeran pada suction kompresor.
- Start Unit

- Charge R170 kedalam sistem melalui suction kompresor sesuai dengan komposisinya (perhatikan timbangan digital). Selama proses charging, kompresor LS nyala.
- Kemudian charge R744 kedalam sistem melalui suction kompresor sesuai dengan komposisinya (perhatikan timbangan digital). Selama proses charging, kompresor LS menyala.



Gambar 3-22 Timbangan Digital

3.5 METODE PENGAMBILAN DATA

Setelah semua proses persiapan dilewati (tes kebocoran, evakuasi sistem, dan charging sistem), maka pengambilan data bisa dilakukan. Adapun prosedur pengambilan data ini adalah sebagai berikut:

- Kondisikan suhu sistem sampai pada kurang lebih 20°C untuk posisi HS dan LS
- Start HS kompresor sampai jangka waktu 15 menit atau suhu evaporator HS mencapai -30°C
- Pada saat menit ke 15 nyalakan LS kompresor.
- Data tekanan dicatat setiap 5 menit (Tekanan *out condenser*, *in eveap*)
- Data temperatur, tegangan, arus, daya, tekanan *discharge* dan *suction* dicatat secara otomatis oleh LabView setiap 2 detik.

3.6 METODE VARIASI KOMPOSISI MASSA R744 DENGAN R170

Total massa refrigeran campuran untuk pengambilan data variasi komposisi massa R744/170 adalah sebesar 100 g pada sisi bagian LS, dengan komposisi sebagai berikut:

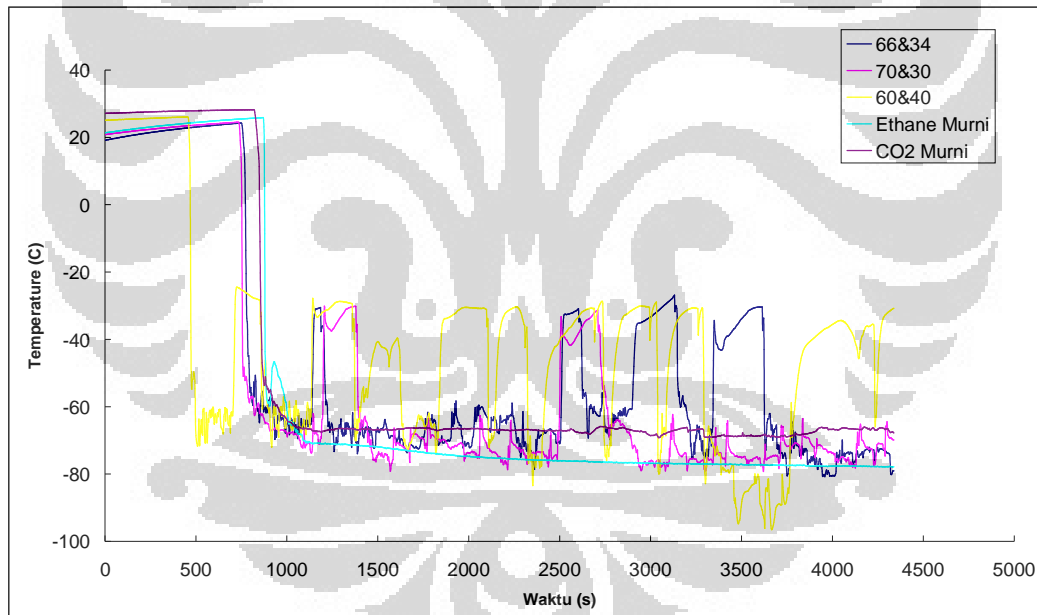
Tabel 3-2 Komposisi Massa Refrigeran R170/R744

Komposisi	R170	R744
I	34 %	66 %
II	40 %	60 %
III	30 %	70 %
IV	100 %	0 %

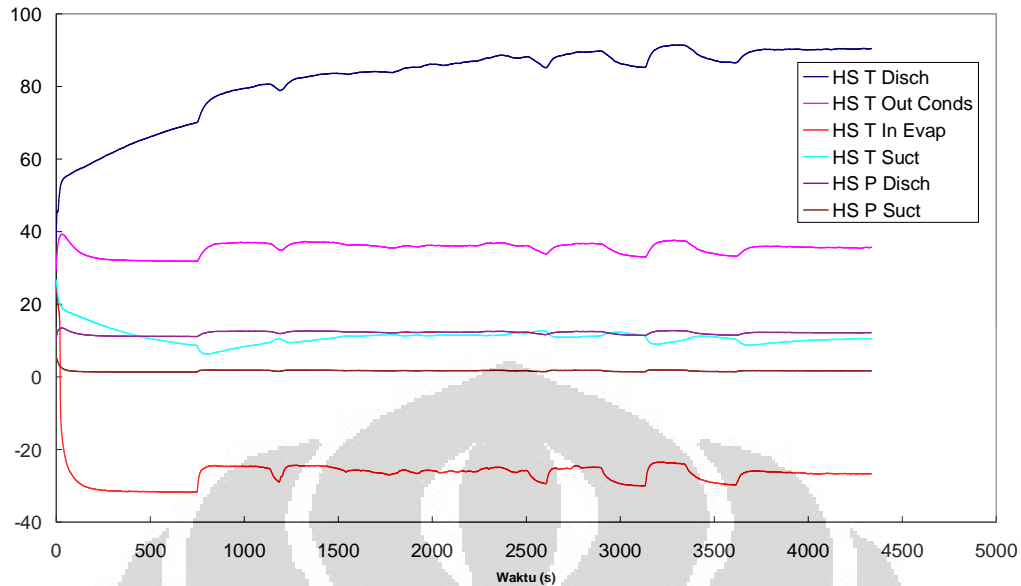
BAB 4 ANALISA DATA

4.1 PERBANDINGAN TEMPERATUR ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170

Pengambilan data yang dilakukan adalah mem-variasikan komposisi massa pada sistem LS antara refrigeran R744 dengan R170. Dari gambar dibawah dapat dilihat perbandingan temperatur yang berada di evaporator antara masing-masing komposisi yang dilakukan, temperature yang dapat dicapai paling rendah sekitar -94.86°C untuk komposisi R744:R170 sebesar 60:40 akan tetapi temperatur yang di dapat tidak stabil pada komposisi tersebut hal ini dikarenakan komposisi R744 yang cukup besar sehingga dapat memungkinkan terjadinya *freezing* pada saat melalui katup ekspansi. Sedangkan untuk komposisi 100% etane didapat temperatur yang cukup stabil dikarenakan titik uap dari refrigeran etane cukup besar mencapai sekitar -80°C



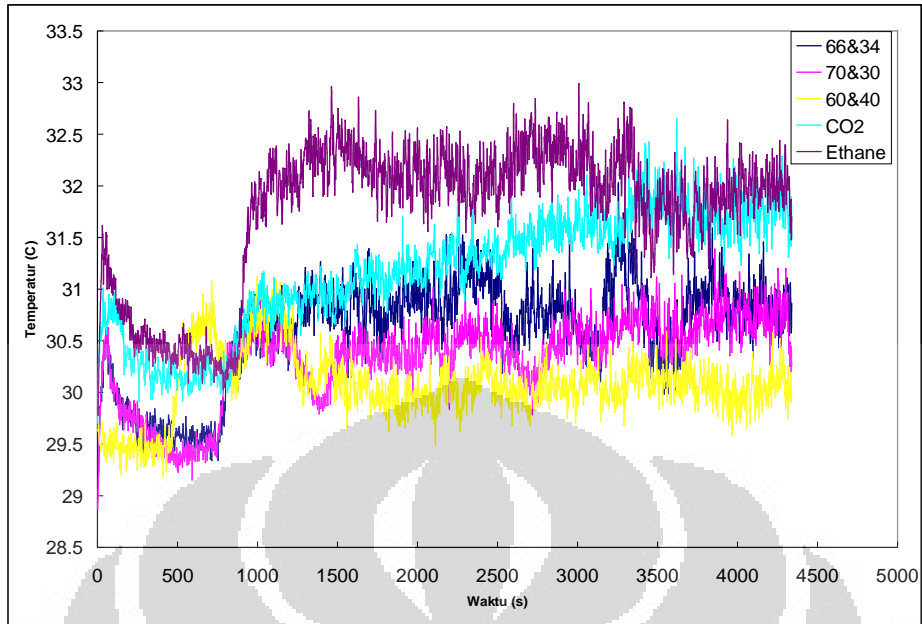
Gambar 4-1 Grafik Temperatur Evaporasi Terhadap Waktu



Gambar 4-2 Grafik Steady State di HS

Dari grafik di atas terlihat bahwa kondisi HS *steady* sekitar pada menit ke-8 dan 13 lalu pada menit ke-15 kompresor LS dinyalakan. Kondisi *steady* pada sistem yang dimaksud adalah ketika tekanan dan temperatur terukur relatif konstan seperti pada gambar 4-2

Dari gambar 4-1 terlihat bahwa semakin rendah komposisi R744 dalam campuran, maka temperatur evaporasi yang dicapai akan semakin rendah pula, hal ini disebabkan karakteristik dari R744 yang memiliki tekanan kerja tinggi. Sedangkan pada menit ke-30 hingga menit ke-45, terlihat temperatur evaporasi terendah dicapai oleh campuran R744/R170 dengan komposisi 60:40. Hal ini disebabkan oleh temperatur lingkungan dengan komposisi 60:40 lebih rendah (30°C) dibandingkan temperatur lingkungan dengan komposisi 0:100 (31.5°C), seperti terlihat pada gambar 4-3.



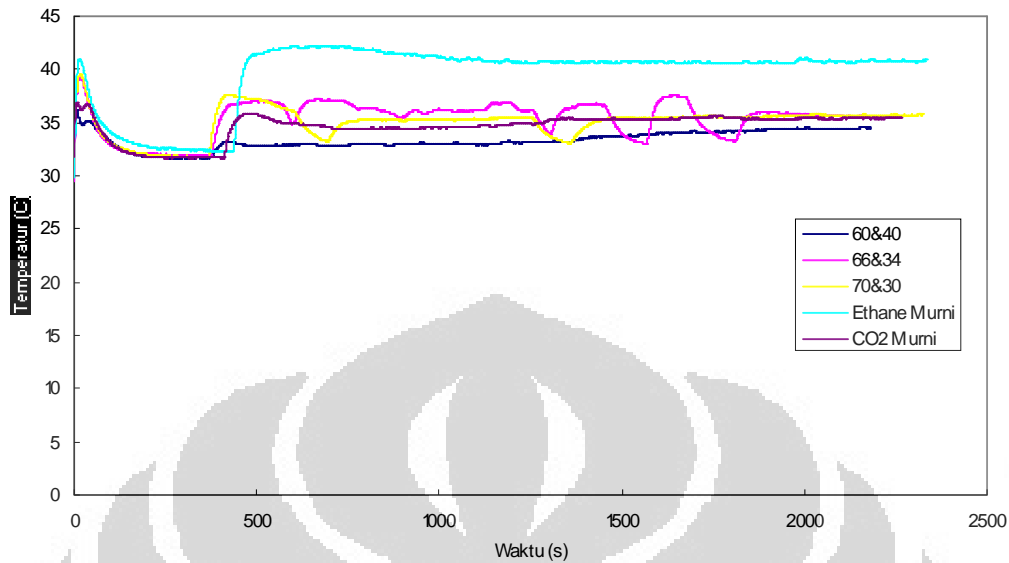
Gambar 4-3 Grafik Temperatur lingkungan vs waktu

Tabel 4-1 Standar Deviasi Temperatur Ambient

	60&40	66&34	70&30	Ethane Murni	CO2 Murni
Temperatur Rata-rata	30.07	30.59	30.3	31.17	31.74
Std. Deviasi	0.32	0.5	0.4	0.56	0.69
Persentase (%)	1.08	1.64	1.3	1.8	2.2

Dengan melihat tabel 4-1 diatas dapat disimpulkan bahwa simpangan dari temperatur ambient ini bisa dikatakan sangat kecil karena pada dasarnya temperatur ambient tidak dijaga konstan melainkan dibiarkan saja pada udara bebas oleh karenanya dengan temperatur ambient ini data yang didapat dapat dibandingkan satu sama lain. Sehingga data dapat dikatakan valid.

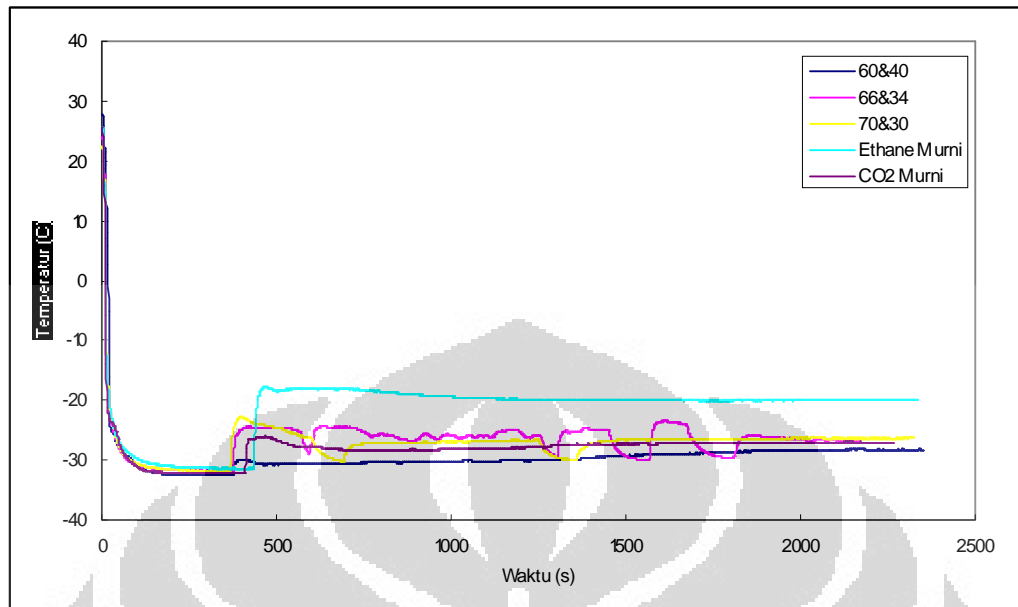
4.2 PERBANDINGAN TEMPERATUR KONDENSASI PADA BAGIAN HS



Gambar 4-4 Perbandingan Temperatur Kondensasi Masing-masing Komposisi Pada HS

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa pada saat melewati kondenser refrigeran mendapatkan suhu lingkungan yang berbeda-beda, dilihat dari gambar 4-3 grafik temperatur ambient bahwa pada saat ethane murni dijalankan temperatur ambient menunjukkan nilai paling besar dengan begitu akan mempengaruhi temperatur kondensasi itu sendiri. Sehingga dapat dilihat pada gambar 4-4 bahwa temperatur kondensasi terbesar terdapat pada etane murni dan temperatur kondensasi terendah terdapat pada komposisi 60% CO₂ dan 40% etane. Temperatur kondensasi ini juga terpengaruh pada saat sistem di LS menyala, dapat dilihat dari grafik temperatur masing-masing komposisi tersebut naik pada saat detik kurang lebih 400, pada detik itu lah sistem LS dinyalakan.

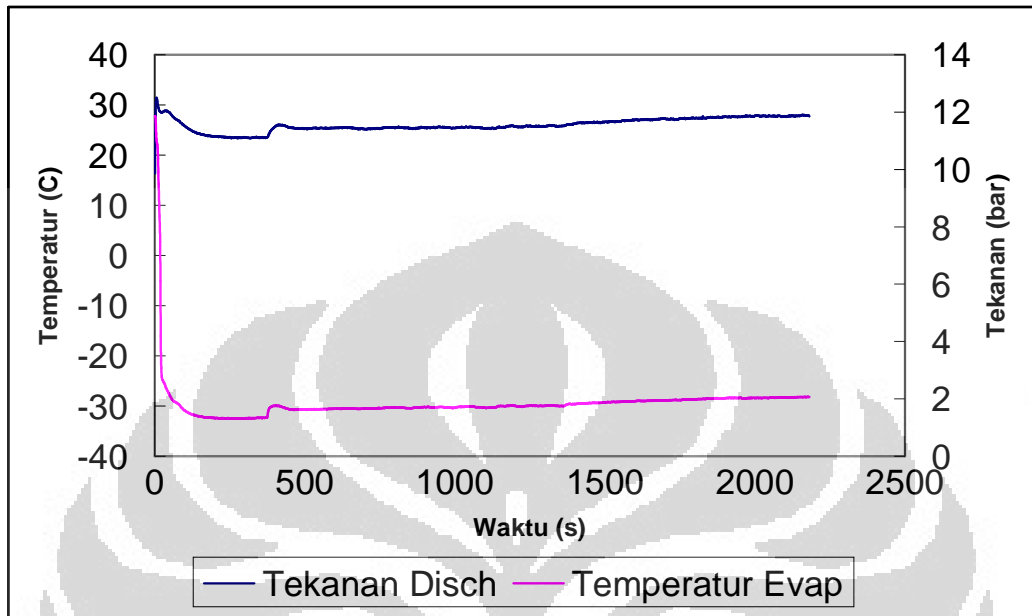
4.3 PERBANDINGAN TEMPERATUR EVAPORASI PADA BAGIAN HS



Gambar 4-5 Perbandingan Temperatur Evaporasi Masing-masing Komposisi Pada Bagian HS

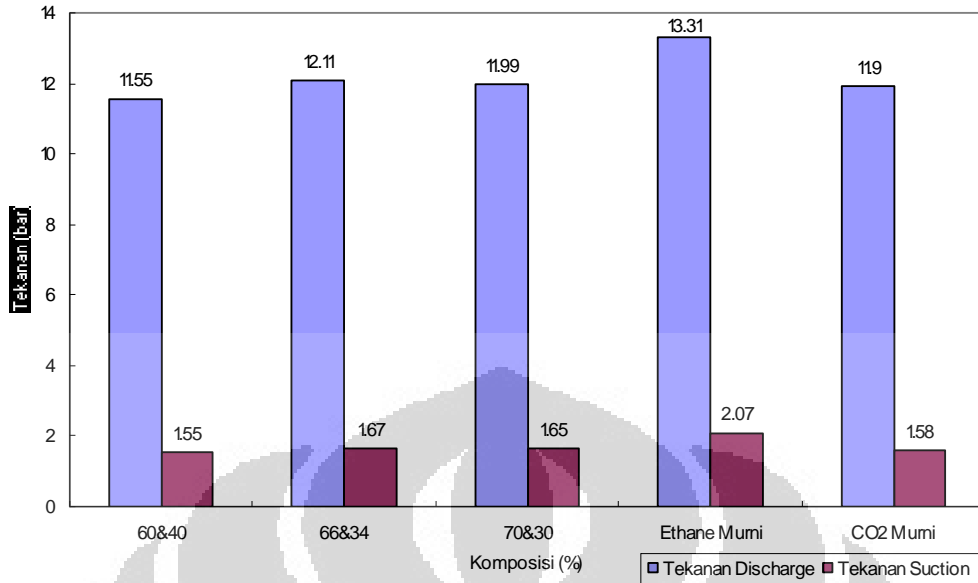
Temperatur evaporasi ini yang akan menjadi kunci untuk menurunkan temperatur kondensasi pada bagian LS, semakin rendah temperatur evaporasi pada bagian HS akan menurunkan temperatur kondensasi pada bagian LS. Jika dilihat dari gambar 4-5 ketidakstabilan temperatur terjadi pada saat komposisi 66% CO_2 dan 34% *ethane* pada bagian LS, ketidakstabilan ini dapat terjadi karena pada bagian LS terjadi pembekuan (*freezing*) pada aliran di sistem LS sehingga aliran refrigeran tidak tetap yang membuat perbedaan dalam perpindahan panas tersebut.

4.4 PERBANDINGAN TEKANAN DISCHARGE TERHADAP TEMPERATUR EVAPORASI DI HS



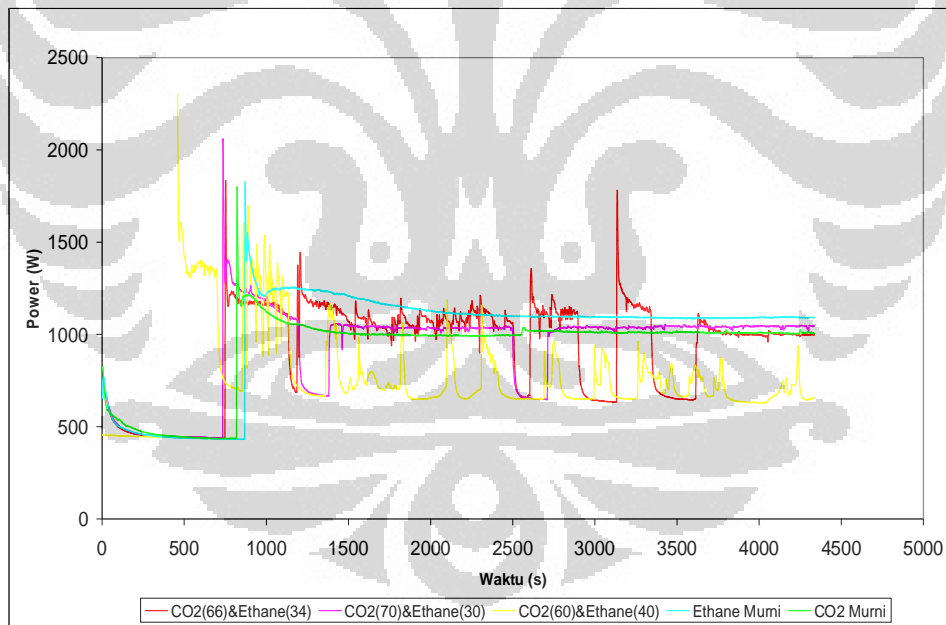
Gambar 4-6 Perbandingan Temperatur Evaporasi dan Pengaruhnya Terhadap Tekanan Discharge Komposisi 60% CO₂ dan 40% Ethane

Dengan melihat pada gambar 4-6 dapat disimpulkan bahwa tekanan *discharge* berbanding lurus dengan temperatur evaporasi. Semakin rendah temperatur evaporasi yang dihasilkan oleh evaporator maka kerja dari kompresor akan semakin kecil. Selain itu bisa juga dilihat dari gambar 4-7 mengenai perbedaan dari perbandingan tekanan *discharge* dan tekanan *suction* pada sistem HS pada saat memvariasikan komposisi campuran pada sistem LS. Jika membandingkan gambar 4-6 dengan 4-7 maka dapat disimpulkan bahwa temperatur evaporasi paling tinggi didapat saat sistem LS menggunakan refrigeran *ethane* murni, karena dari gambar 4-7 ini tekanan *discharge* tertinggi diperoleh dari *ethane* murni tersebut.



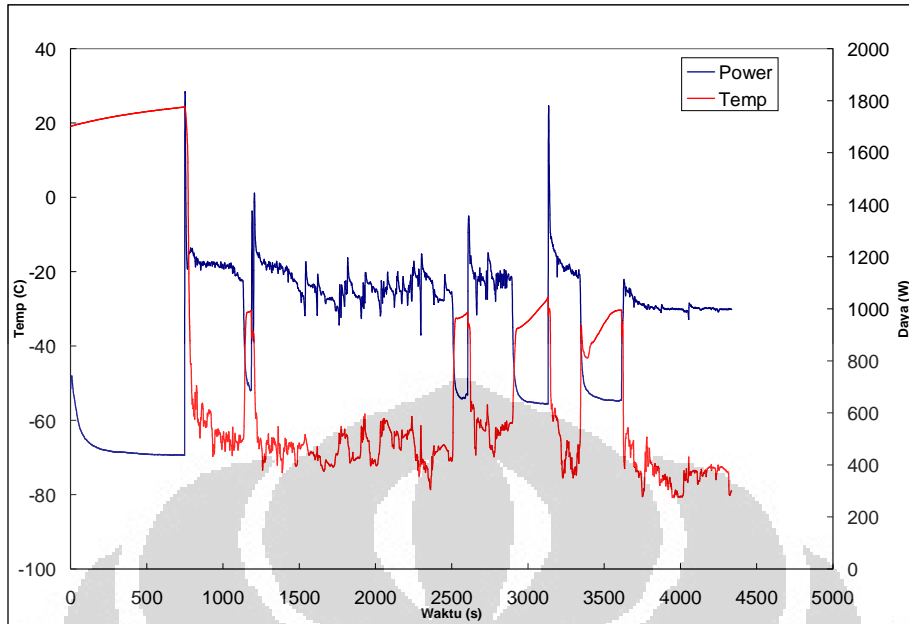
Gambar 4-7 Perbandingan Tekanan Discharge dan Tekanan Suction di HS

4.5 PERBANDINGAN POWER ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170



Gambar 4-8 Grafik Daya Listrik Rata-Rata vs Komposisi Massa R744/R170

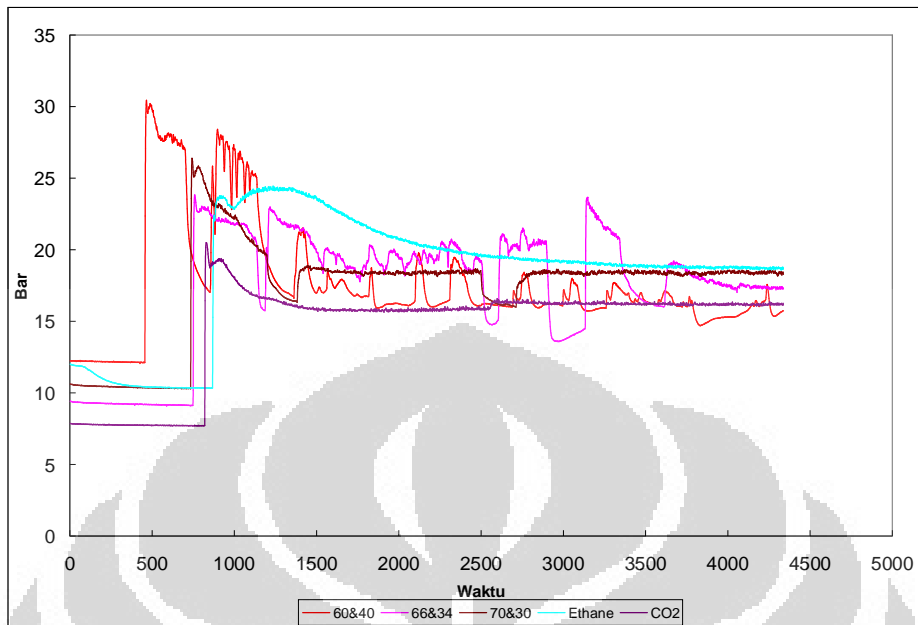
Campuran R744/R170 dengan komposisi 0:100 menyerap listrik paling besar yaitu 1000 Watt (Gb. 4-8), hal ini disebabkan oleh kerja kompresi yang tinggi.



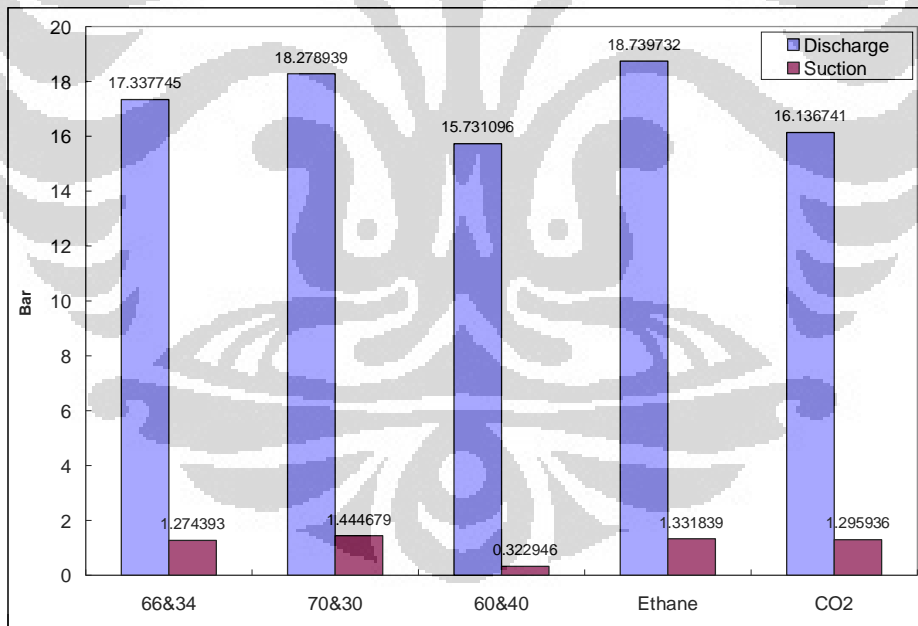
Gambar 4-9 Pengaruh Temperatur Evaporasi Terhadap Daya(66:34)

Pada gambar 4-9 dapat dilihat bahwa temperatur evaporasi mempengaruhi daya yang dihasilkan karena temperatur evaporasi berhubungan dengan banyaknya aliran refrigeran yang akan melewati kompresor sehingga semakin banyak refrigeran di kompresor maka akan semakin besar daya yang dibutuhkan oleh kompresor itu.

4.6 PERBANDINGAN TEKANAN KOMPOSISI MASA R744 /R170



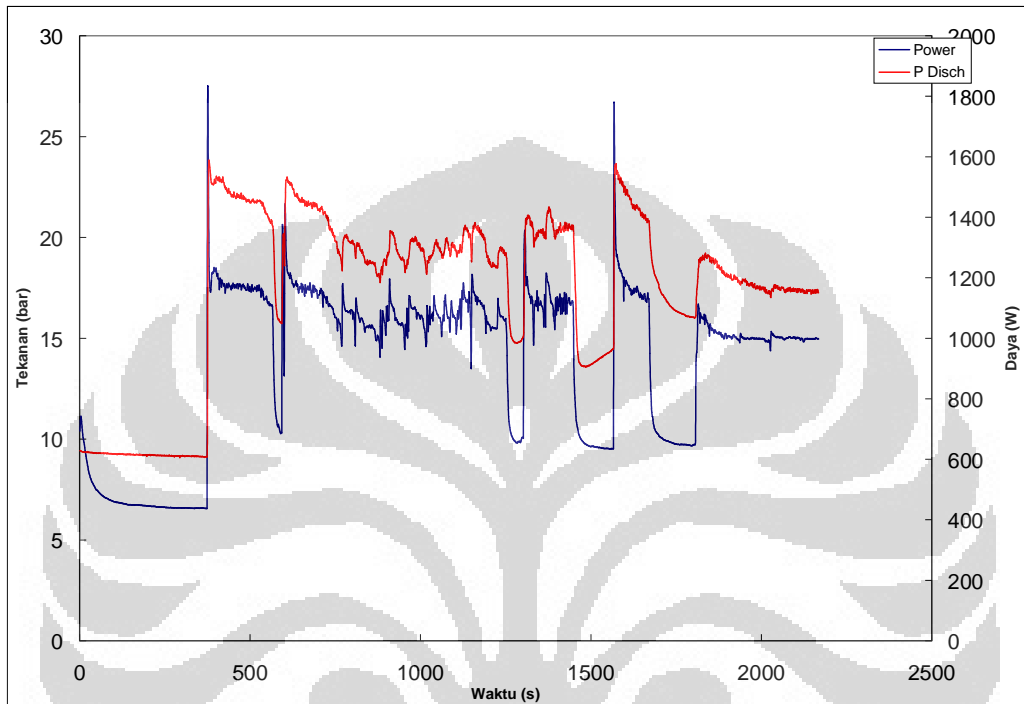
Gambar 4-10 Grafik Tekanan Discharge LS vs Waktu



Gambar 4-11 Perbandingan Tekanan Discharge dan Suction pada LS

Semakin tinggi kadar R744 dalam campuran, maka semakin tinggi pula tekanan kerja sistem tersebut (Gb. 4-10), hal ini sebagai akibat dari kelemahan karakteristik R744 yang bekerja pada tekanan tinggi. Gambar 4-11 memperlihatkan perbedaan tekanan *discharge* dan tekanan *suction* pada masing-masing komposisi.

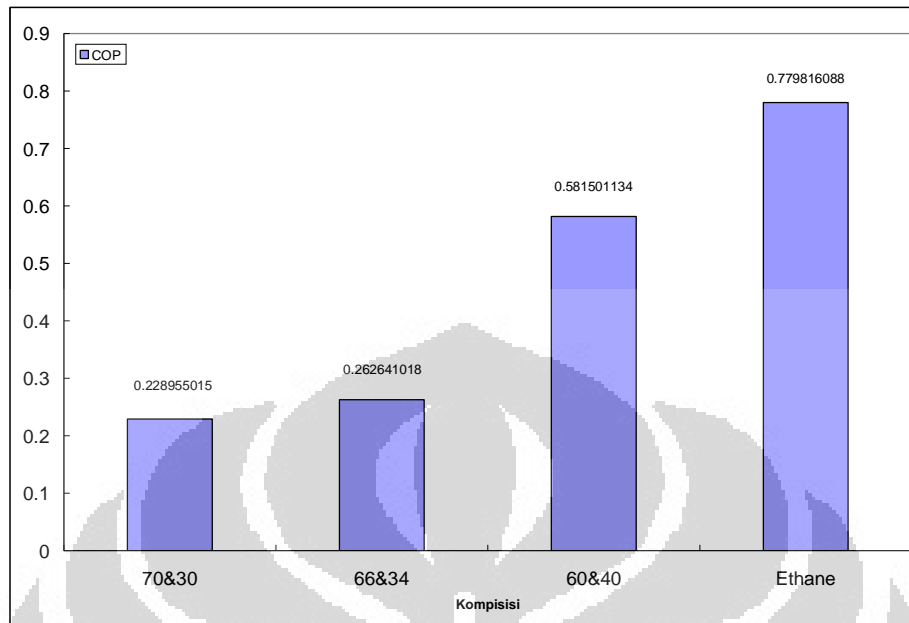
Tekanan paling tinggi ditunjukkan pada *ethane* murni sedangkan tekanan terendah ditunjukkan oleh campuran 60%R744 dan 40%R170. Hal ini terjadi karena campuran dari R744 lebih besar dari pada R170, karena R744 merupakan refrigeran tekanan tinggi.



Gambar 4-12 Pengaruh Tekanan Discharge pada Daya

Dari gambar 4-12 dapat disimpulkan bahwa tekanan *discharge* berbanding lurus dengan daya yang dibutuhkan oleh kompresor karena semakin besar tekanan *discharge* dari kompresor itu maka daya yang dibutuhkan kompresor untuk mengempres refrigeran akan semakin besar pula sehingga dengan naiknya tekanan *discharge* maka daya akan naik pula.

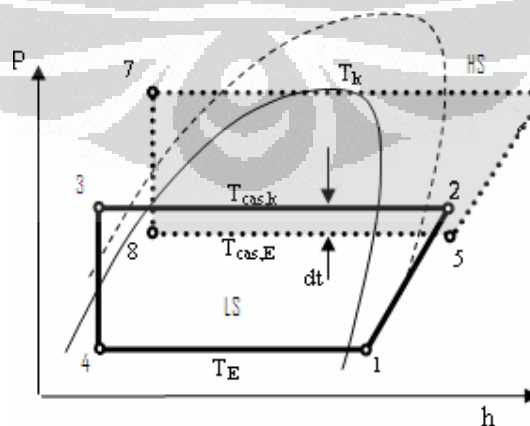
4.7 PERBANDINGAN COP ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170



Gambar 4-13 Grafik COP vs Komposisi Massa R744/R170

Perhitungan COP diatas dilakukan dengan cara mencari kapasitas evaporasi pada bagian LS dan juga nilai dari kerja kompresor sistem yang mana dalam hal ini adalah kompresor HS dan kompresor LS sehingga rumus yang digunakan adalah :

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{kompresor}} = \frac{Q_{evap}}{W_{HS} + W_{LS}} \quad (12)$$



Gambar 4-14 P-h Diagram sistem cascade

Dari rumus diatas maka diperlukan kapasitas dari pendinginan pada sistem LS, dengan mengacu pada gambar 4-14 maka dapat dicari rumus kapasitas pendinginan yaitu :

$$Q_{evap} = m \times (\Delta h) = m \times (h_1 - h_4) \quad (13)$$

Sedangkan untuk kerja kompresor pada bagian HS dan LS adalah sebagai berikut :

$$W_{kompHS} = m_{HS} \times (\Delta h) = m_{HS} \times (h_6 - h_4) \quad (14)$$

$$W_{kompLS} = m_{LS} \times (\Delta h) = m_{LS} \times (h_5 - h_1) \quad (15)$$

Untuk kapasitas pendinginan pada bagian HS akan sama dengan perpindahan kalor pada kondenser LS yaitu :

$$Q_{evapHS} = Q_{cascade} = m_{HS} \times (\Delta h) = m_{HS} \times (h_5 - h_8) \quad (16)$$

$$Q_{kondsLS} = Q_{cascade} = m_{LS} \times (\Delta h) = m_{LS} \times (h_2 - h_3) \quad (17)$$

$$Q_{evapHS} = Q_{kondsLS} = Q_{cascade} \Rightarrow m_{HS} \times (h_5 - h_8) = m_{LS} \times (h_2 - h_3) \quad (18)$$

$$\Rightarrow \frac{m_{HS}}{m_{LS}} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_5 - h_8)}$$

Dengan mensubstitusi persamaan 18 dengan 12 akan didapatkan COP sebagai berikut :

$$COP = \frac{(h_5 - h_8)(h_1 - h_4)}{(h_6 - h_5)(h_2 - h_3) + (h_5 - h_8)(h_2 - h_1)} \quad (19)$$

Dengan menggunakan persamaan 19 akan didapatkan COP dari masing-masing komposisi sebagai berikut :

Tabel 4-2 Perbandingan COP masing-masing Komposisi Campuran

		70&30	66&34	60&40	Ethane
Suct LS	h1	541.45	551.2	580.39	579
Disch LS	h2	626.94	628.36	567.2	767.03
Conds LS	h3	473.25	481.19	497.39	564.33
Evap LS	h4	444.3	446.81	498.87	26.605
Suct HS	h5	537.28	543.52	548.93	642.97
Disch HS	h6	623.04	632.1	642.57	779.51
Conds HS	h7	553.73	560.38	566.75	671.13
Evap HS	h8	498.38	502.82	506.31	589.78
COP		0.228955	0.262641	0.581501	0.779816

Nilai COP serta efek pendinginan terbesar untuk variasi campuran R744/R170 didapat pada komposisi 0:100 yaitu 0.77. Dari tabel 4-2 diatas dapat dikatakan bahwa dengan berkurangnya komposisi CO₂ pada campuran maka akan menaikkan COP dari sistem LS tersebut.

Untuk perhitungan COP *carnot* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$COP_{carnot} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (20)$$

dengan :

T_H = Temperatur pada kondenser HS

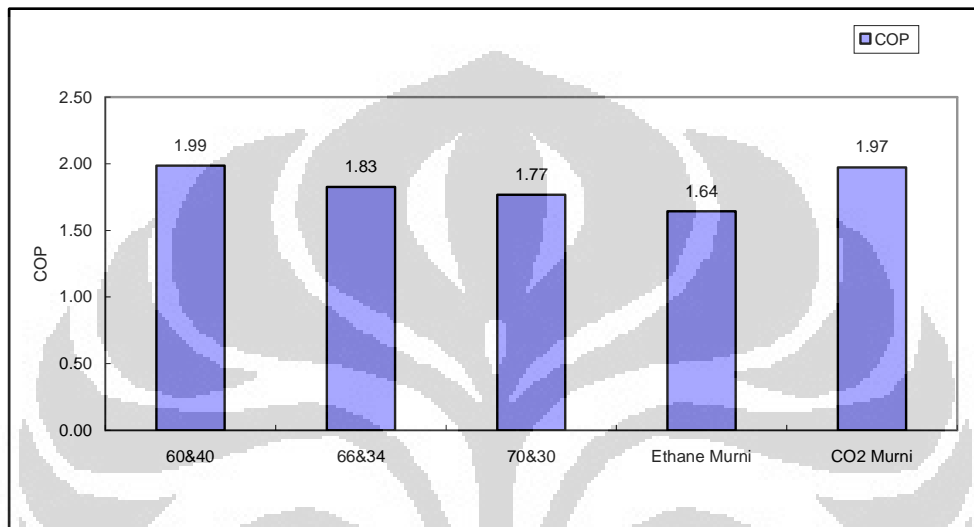
T_L = Temperatur pada evaporator LS

Dari persamaan 20 diatas maka akan didapatkan COP *carnot* untuk masing-masing komposisi campuran :

Tabel 4-3 Perbandingan COP *carnot* Masing-masing Campuran

	60&40	66&34	70&30	Ethane Murni	CO2 Murni
T Kondenser HS (°C)	34.71	35.72	35.75	40.94	35.49
T Evaporator LS (°C)	-68.32	-73.52	-75.85	-77.82	-68.31
T Kondenser HS (K)	307.71	308.72	308.75	313.94	308.49
T Evaporator LS (K)	204.68	199.48	197.15	195.18	204.69
COP	1.99	1.83	1.77	1.64	1.97

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa COP *carnot* tertinggi didapat oleh campuran dengan komposisi 60% CO₂ dan 40% *ethane* dan secara umum semakin tinggi komposisi CO₂ maka akan mengurangi COP *carnot* ini, hal ini dikarenakan temperatur evaporator pada sisi LS semakin rendah dengan bertambahnya CO₂ didalam campuran tersebut. Penurunan COP *carnot* tersebut dapat dilihat pada gambar 4-15.



Gambar 4-15 Perbandingan Nilai COP_{carnot} Campuran

Jika COP refrigerasi dibandingkan dengan COP *carnot* maka hasil yang didapat dari kedua COP itu akan berbanding terbalik, ini dapat dikarenakan COP refrigerasi menggunakan parameter entalpi yang dipengaruhi oleh parameter tekanan dan temperatur, sedangkan pada COP *carnot* hanya menggunakan parameter temperatur saja sehingga cenderung hasil COP yang didapat lebih besar dari COP refrigerasi.

Setelah COP *carnot* didapatkan dengan begitu efisiensi *carnot* pun dapat dicari dengan simulasi software *coolpack* sehingga didapatkan rumus sebagai berikut :

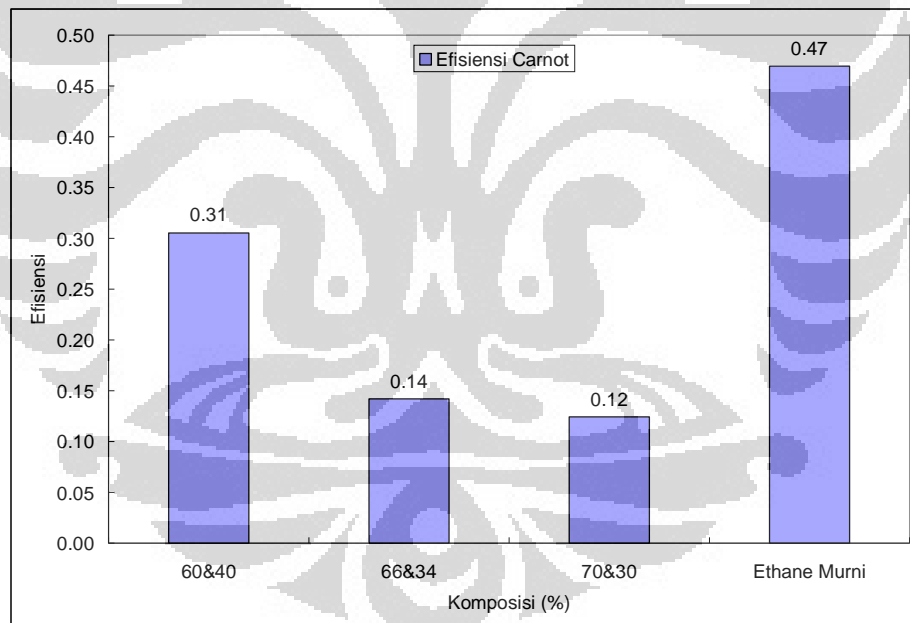
$$\eta_{carnot} = \frac{COP}{COP_{carnot}} \quad (21)$$

Dengan menggunakan persamaan 21 diatas nilai efesiensi dari masing-masing komposisi campuran adalah sebagai berikut :

Tabel 4-4 Nilai Efisiensi *carnot* Masing-masing Komposisi

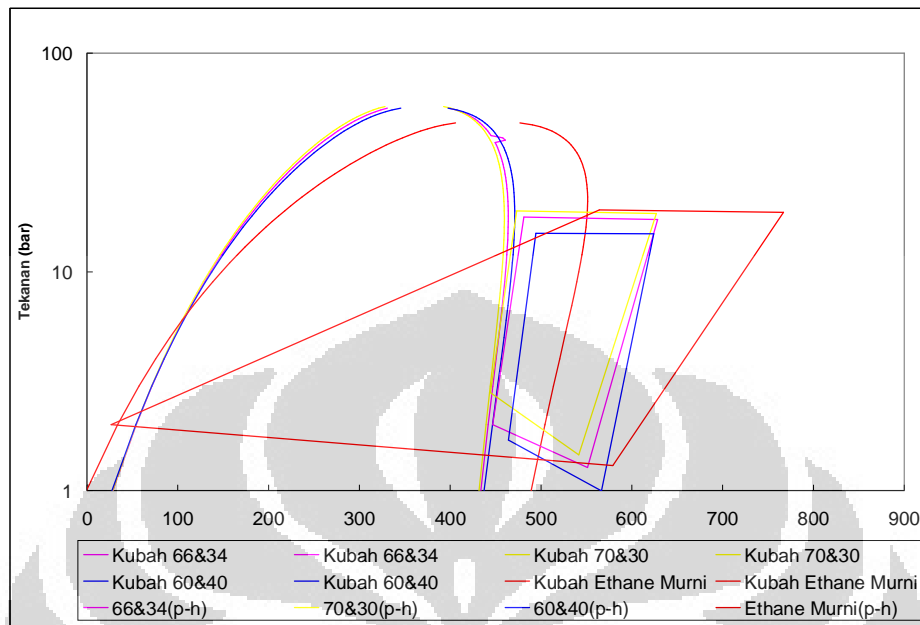
	60&40	66&34	70&30	Ethane Murni
COP Carnot	1.90	1.83	1.77	1.64
COP	0.58	0.26	0.22	0.77
η_{carnot}	0.31	0.14	0.12	0.47

Dari tabel 4-4 diatas dapat disimpulkan bahwa dengan bertambahnya komposisi CO₂ dalam campuran akan mengurangi efesiensi *carnot* yang didapat. Hal ini dapat dikarenakan pengaruh CO₂ dalam sistem akan mempengaruhi kerja dari kompresor sehingga semakin banyak CO₂ dalam campuran akan memperbesar daya yang dibutuhkan oleh kompresor untuk melakukan kompresi sehingga COP akan semakin kecil.



Gambar 4-16 Diagram Nilai Efisiensi *carnot* Masing-Masing Komposisi

4.8 PERBANDINGAN P-H DIAGRAM ANTARA KOMPOSISI MASA R744/R170



Gambar 4-17 P-h Diagram Masing-masing Komposisi Massa R744/R170

Dari diagram P-h tersebut dapat dilihat bahwa plot dari diagram pada masing-masing komposisi berada di luar kubah uap, hal ini terjadi mungkin karena kurangnya kapasitas pendinginan dari kondenser pada sirkuit temperatur rendah ini. Selain itu bisa dilihat juga kecenderungan dari kubah uap bergeser ke kanan seiring dengan berkurangnya komposisi dari campuran R744. Dan juga dilihat dari plot diagram pada komposisi etane 100% murni, pada saat posisi ekspansi grafik terlihat menuju ke arah *saturated liquid*. Hal ini mungkin dapat disebabkan karena kesalahan pembacaan temperatur pada alat ukur, karena kesalahan pembacaan 1°C saja akan menggeser diagram P-h itu menuju ke pada *saturated liquid* atau tetap pada daerah uap seluruhnya.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil pengujian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem Cascade yang paling baik adalah menggunakan refrigeran R170 murni pada sisi LS. COP tertinggi bernilai 0.77 dengan temperatur evaporasi terendah sebesar -77.95°C .
2. Sedangkan temperatur terendah didapat pada saat menggunakan CO_2 murni mencapai -94.8°C .
3. Fraksi massa R744 dalam campuran azeotrop tidak begitu berpengaruh besar terhadap kenaikan temperatur evaporasi, tetapi berpengaruh signifikan terhadap kenaikan tekanan discharge. Hal ini disebabkan oleh tingginya tekanan saturasi R744.
4. Semakin rendah kadar CO_2 dalam campuran maka semakin tinggi COP yang didapat.

5.2 SARAN

Beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

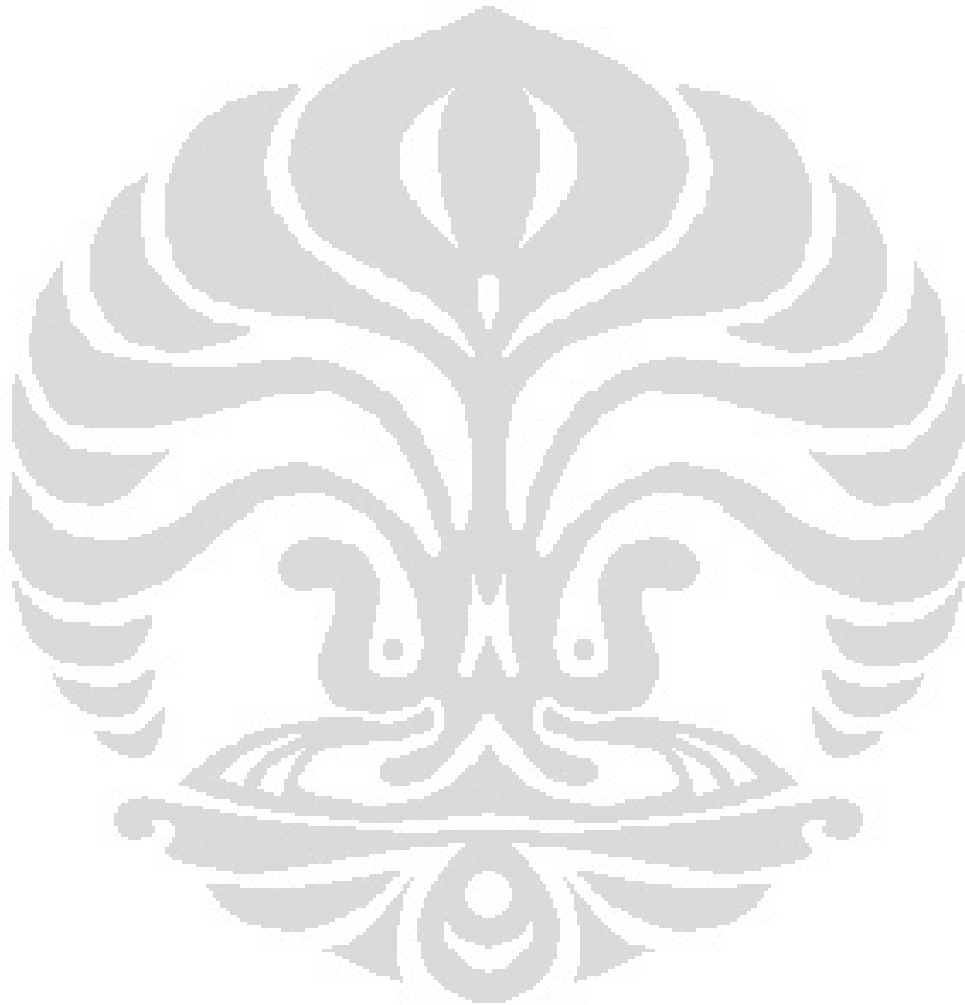
1. Gunakan *pressure transmitter* untuk semua pengukuran tekanan agar kesalahan membaca tidak terjadi (lebih akurat).
2. Isolasi pipa dan komponen lain sehingga panas yang terbuang tidak terlalu besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Nasruddin, *Utilization of CO₂/Ethane Mixture as a New Alternative of Eco-Friendly Refrigerant For Low Temperature Applications*, Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering-University of Indonesia, 2007
- A. Kilicarslan, *An experimental investigation of a different type vapor compression cascade refrigeration system*, Science direct, June 2004
- Tzong-Shing Lee, Cheng-Hao Liu, Tung-Wei Chen, *Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems*, Science direct, June 2006
- Christian, *Pengujian sistem refrigerasi cascade menggunakan R22-R404a dengan variasi tekanan discharge pada high-stage*, Skripsi, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2007/2008
- Stoecker, Wilbert F., Jones, Jerold W., *Refrigerasi dan Pengkondisian udara*, Jakarta, Erlangga, 1989
- Meacock, M.H., *Refrigeration Processes*, England, Permesson Press, 1979
- Wang, S.K. and Lavan, Z. *Air-Conditioning and Refrigeration*, dalam Frank Kreith (Ed.), *Mechanical Engineering Handbook*, (Boca Raton: CRC Press LLC, 1999).
- Cengel. Yunus A., Michael A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach* (New York: McGraw-Hill, Inc., 1994)
- Shah, Ramesh K., Dušan P. Sekulić, *Fundamental of Heat Exchanger Design* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003).
- Agnew, B and Ameli, M.S. *A finite time analysis of cascade refrigeration system using alternative refrigerants*, Science direct, 30 April 2004.
- Bhattacharyya, Souvik, *Optimization of a CO₂-C₃H₈ cascade system for refrigeration and heating*, Science direct, November 2005
- Hourahan, G. C and Calm, J. M, *Refrigerant Data Summary*, Engineered Systems, November 2001
- Maclain-cross, I.L and Leonardi, E, *Comparative Performance of Hydrocarbon Refrigerants*, Australia
- Jung, Dongsoo, *Capillary Tube Selection for HCFC 22 Alternatives*, Science direct, 7 Juni 1999.

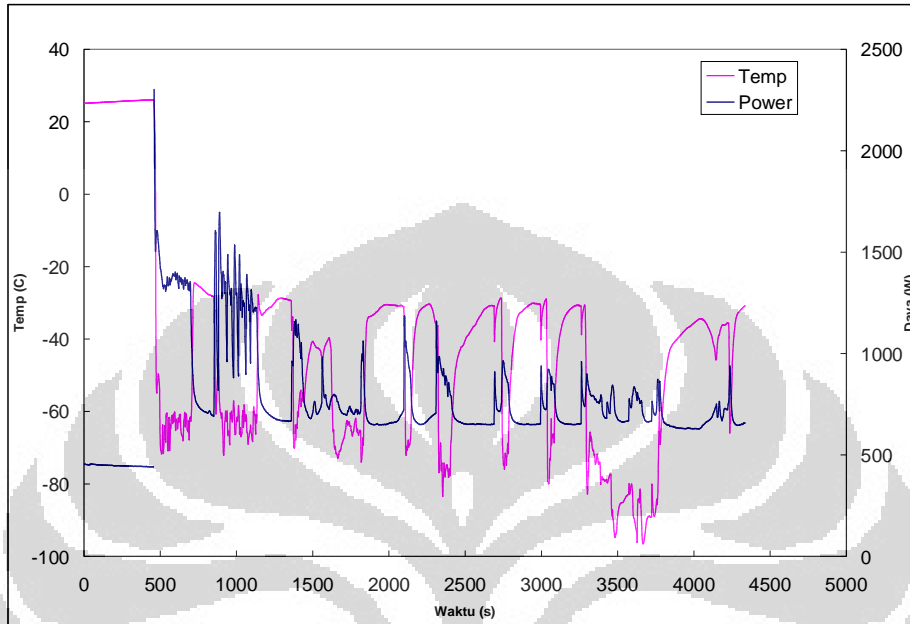
Halozan, Hermann, *HFCs or The Old Refrigerants – What Is The Best Choice?*,
Austria.

Cox, N, *Working Towards More Enviromentally Friendly Refrigerant Blends*, United
State.

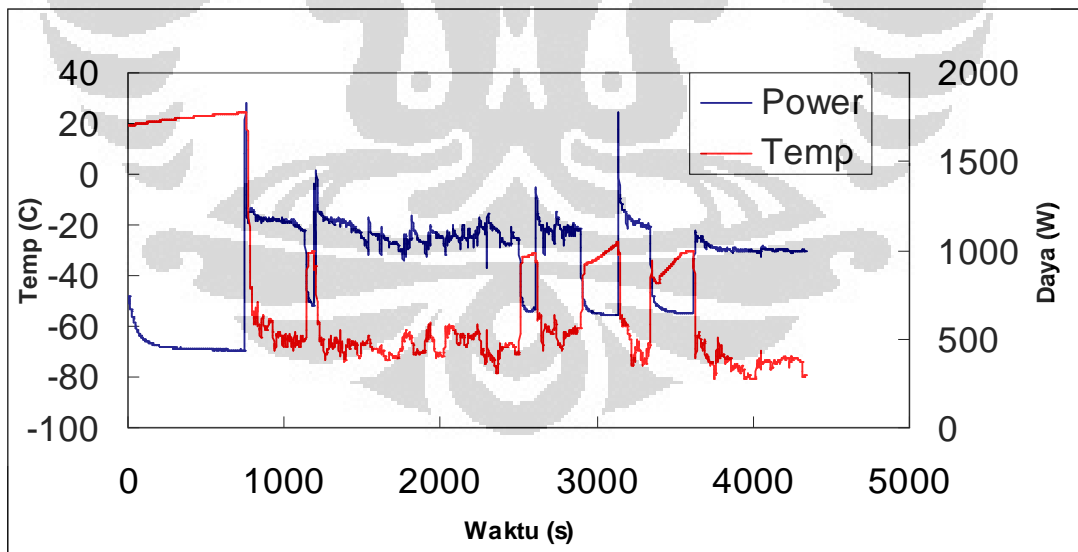


LAMPIRAN

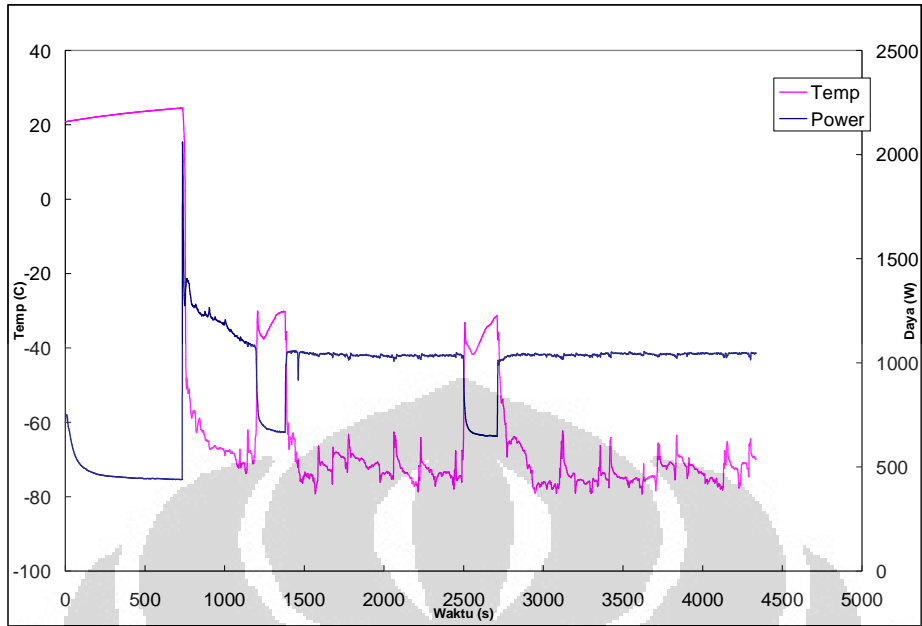
- PERBANDINGAN TEMPERATUR EVAPORASI DENGAN DAYA DI LS



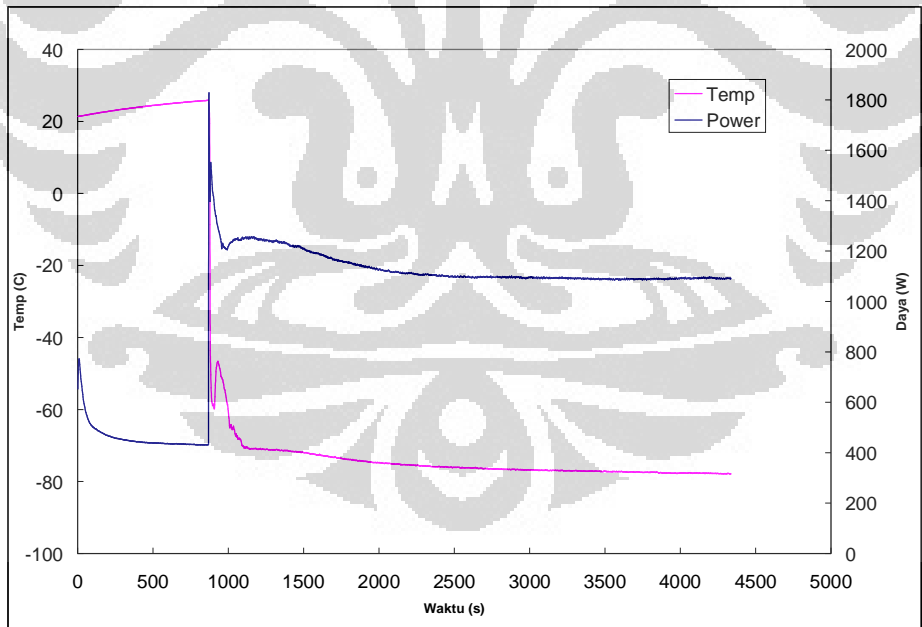
Gambar 1 Komposisi R744(CO₂) 60% dan R170(Ethane) 40%



Gambar 2 Komposisi R744(CO₂) 66% dan R170(Ethane) 34%

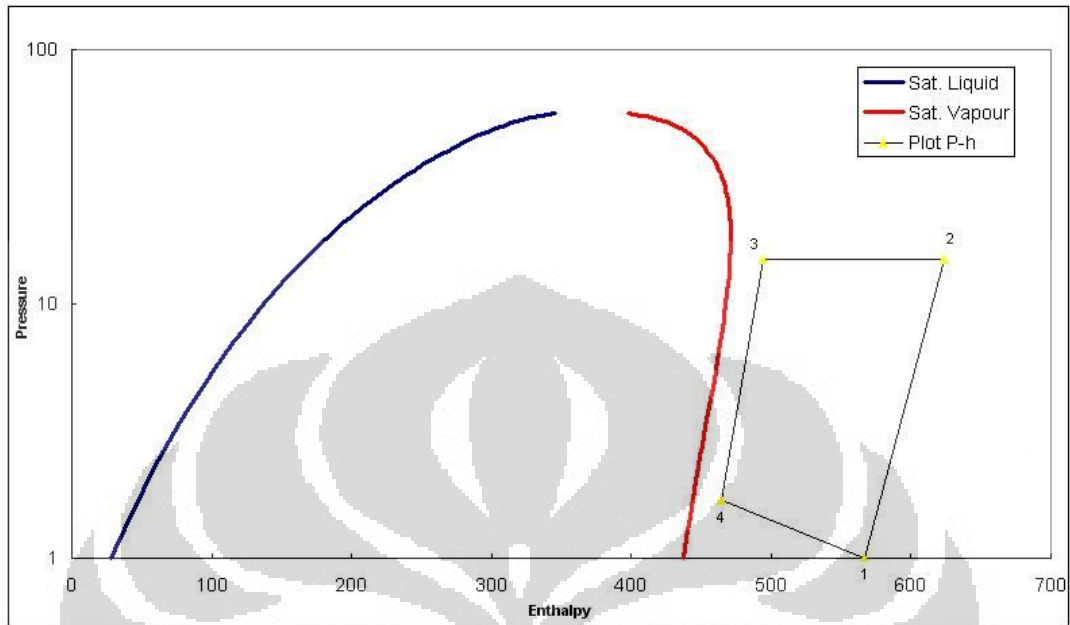


Gambar 3 Komposisi R744(CO₂) 70% dan R170(Ethane) 30%

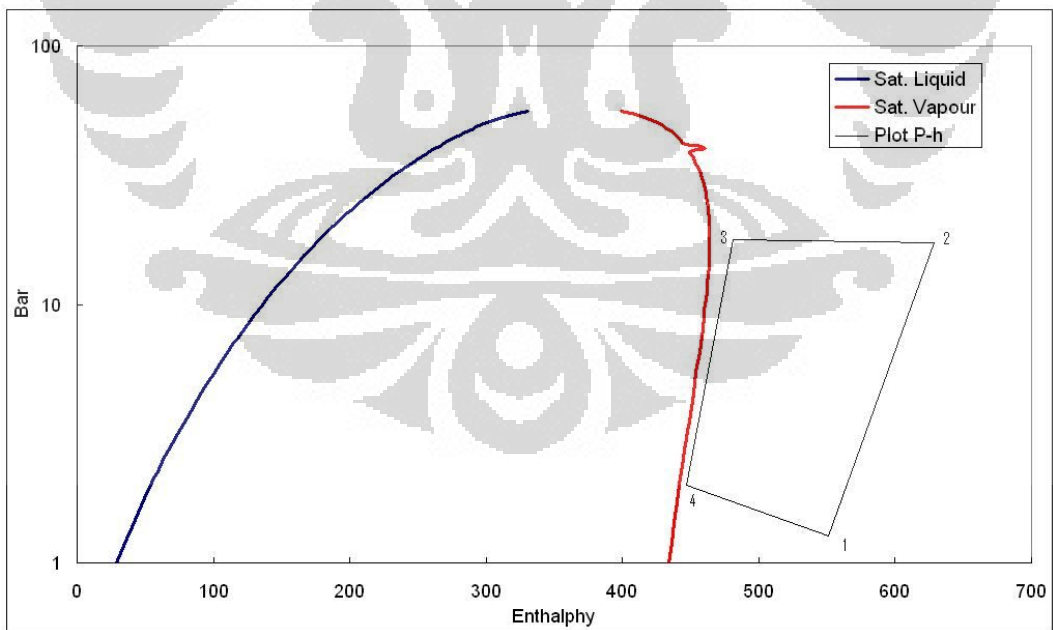


Gambar 4 Komposisi R170(Ethane) 100%

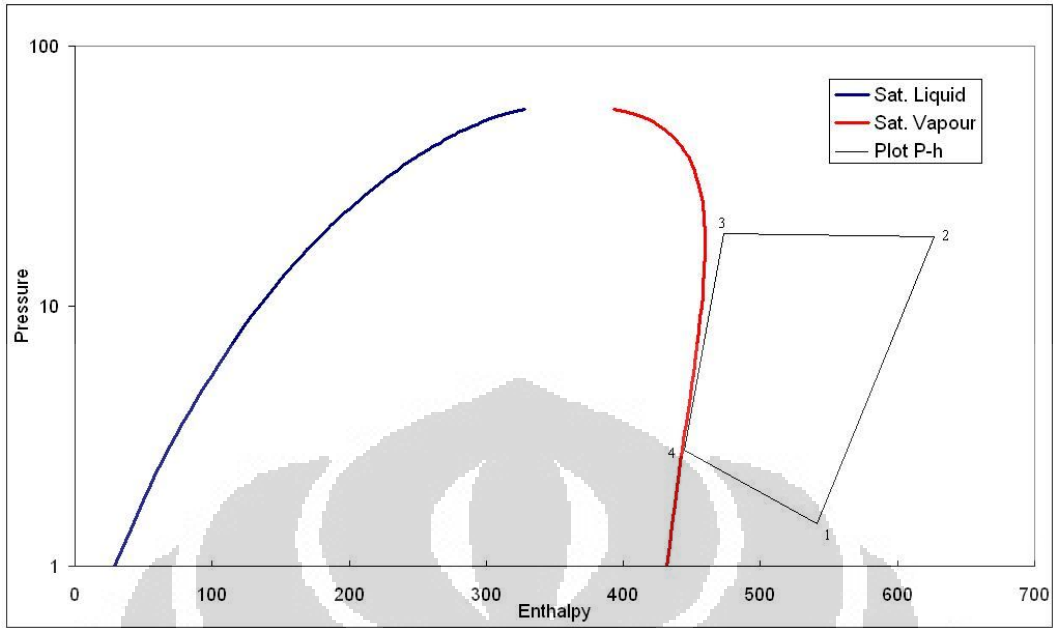
- **GAMBAR P-H DIAGRAM MASING-MASING KOMPOSISI DI LS**



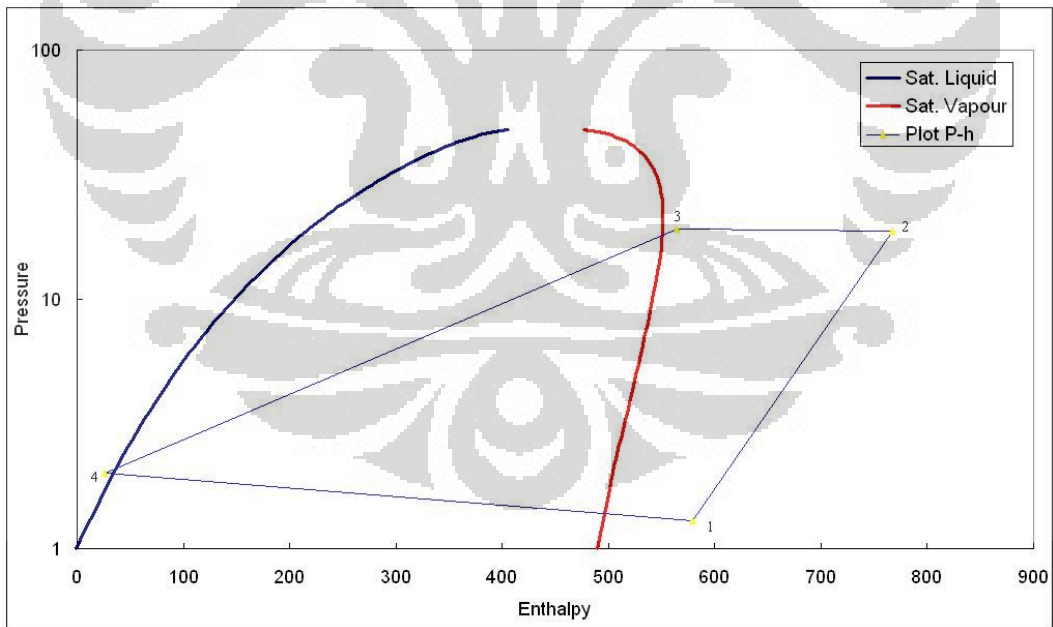
Gambar 5 Komposisi R744(CO₂) 60% dan R170(Ethane) 40%



Gambar 6 Komposisi R744(CO₂) 66% dan R170(Ethane) 34%



Gambar 7 Komposisi R744(CO₂) 70% dan R170(Ethane) 30%



Gambar 8 Komposisi R170(Ethane) 100%

- **TABEL DATA TEMPERATUR (°C)**

➤ Komposisi 70%R744 dan 30%R170

HS				LS			
T Disch	T Conds	T Evap	T Suct	T Disch	T Conds	T Evap	T Suct
38.54	30.91	22.26	26.11	28.97	26.52	20.83	30.92
42.64	33.41	22.32	24.73	29.01	26.56	20.87	30.98
43.16	36.41	19.33	22.41	28.99	26.53	20.89	30.93
44.11	37.02	18.46	21.81	29.00	26.57	20.91	30.96
44.85	37.60	17.77	21.28	29.02	26.61	20.96	30.99
46.78	38.03	17.20	20.90	29.01	26.57	20.97	30.97
47.98	38.34	16.73	20.53	28.99	26.57	20.95	30.91
49.23	38.71	14.43	20.27	29.01	26.58	20.96	30.97
50.34	38.94	10.99	19.99	29.03	26.61	20.98	31.00
51.16	39.16	-4.09	19.73	29.01	26.57	20.96	30.96
51.77	39.32	-10.29	19.47	29.03	26.58	21.01	30.98
54.27	38.67	-22.90	17.80	29.21	26.63	21.18	31.10
54.34	38.51	-23.18	17.74	29.19	26.64	21.23	31.10
54.42	38.40	-23.57	17.71	29.22	26.65	21.22	31.15
54.50	38.22	-23.85	17.65	29.22	26.67	21.26	31.14
54.57	38.11	-24.17	17.60	29.22	26.69	21.28	31.14
54.61	37.96	-24.49	17.55	29.26	26.68	21.28	31.16
54.83	37.54	-25.22	17.42	29.28	26.69	21.31	31.18
54.83	37.35	-25.53	17.33	29.30	26.72	21.34	31.17
68.58	32.03	-29.29	7.31	44.39	19.70	22.67	28.74
68.85	32.19	-28.26	7.07	45.16	15.80	21.08	28.74
69.15	32.41	-27.34	6.77	45.32	9.55	19.12	28.87
69.52	32.66	-26.63	6.57	45.30	4.80	16.97	28.95
69.88	32.94	-26.02	6.39	45.28	-3.59	14.97	29.00
70.22	33.13	-25.62	6.18	45.19	-9.16	10.83	29.04
70.57	33.40	-25.28	6.03	45.21	-7.85	2.27	29.13
70.91	33.60	-25.01	5.90	45.41	-4.57	-23.48	29.17
80.77	35.27	-27.09	8.80	73.26	-18.57	-72.70	19.04
80.74	35.21	-27.12	8.79	73.26	-18.62	-72.70	19.02
80.79	35.22	-27.14	8.79	73.31	-18.60	-73.04	18.98
80.79	35.21	-27.13	8.80	73.35	-18.63	-72.92	18.96
80.82	35.23	-27.13	8.85	73.41	-18.58	-72.97	18.94
80.81	35.21	-27.19	8.79	73.47	-18.58	-73.15	18.92
80.85	35.23	-27.13	8.83	73.52	-18.60	-72.96	18.86
80.84	35.23	-27.09	8.82	73.56	-18.64	-72.80	18.83
80.91	35.25	-27.14	8.87	73.55	-18.59	-74.69	18.84
80.90	35.24	-27.17	8.84	73.65	-18.59	-76.45	18.82
80.94	35.27	-27.13	8.86	73.66	-18.58	-70.60	18.83

➤ Komposisi 66%R744 dan 34%R170

HS				LS			
T Disch	T Conds	T Evap	T Suct	T Disch	T Conds	T Evap	T Suct
38.10	29.42	23.90	26.75	29.23	25.98	19.17	30.71
42.86	31.92	23.84	25.50	29.19	25.97	19.18	30.70
45.65	33.94	23.55	24.55	29.23	26.03	19.18	30.71
45.64	35.14	22.23	23.53	29.22	25.97	19.24	30.70
45.39	36.04	21.00	22.59	29.22	26.01	19.24	30.70
52.36	38.96	-5.21	19.86	29.21	26.03	19.38	30.70
52.88	39.09	-11.27	19.60	29.22	26.03	19.40	30.71
53.27	39.17	-13.22	19.40	29.24	26.03	19.40	30.71
56.56	35.63	-27.86	17.21	29.60	26.29	20.12	31.07
56.59	35.50	-28.04	17.15	29.61	26.29	20.14	31.07
56.67	35.41	-28.18	17.12	29.65	26.34	20.15	31.07
57.65	33.88	-29.91	16.25	29.75	26.51	20.56	31.12
57.68	33.81	-30.01	16.22	29.74	26.52	20.56	31.11
71.30	32.67	-27.32	7.45	45.01	10.26	18.36	29.21
71.55	32.80	-26.93	7.26	44.84	5.08	16.88	29.27
71.85	33.04	-26.58	7.13	44.66	1.49	15.45	29.32
72.16	33.26	-26.24	7.06	44.47	1.10	13.49	29.33
72.43	33.46	-26.00	6.91	44.40	-0.26	9.44	29.42
72.70	33.63	-25.88	6.83	44.52	1.19	-1.65	29.44
72.97	33.80	-25.71	6.77	44.77	1.72	-13.53	29.49
73.18	33.95	-25.66	6.68	45.08	1.60	-20.48	29.50
74.17	34.66	-25.24	6.45	46.67	0.07	-44.09	29.59
74.32	34.74	-25.21	6.41	47.04	-0.34	-45.08	29.64
74.52	34.86	-25.13	6.40	47.38	-0.77	-44.79	29.61
75.86	35.84	-24.59	6.36	49.90	-4.14	-58.10	29.60
75.96	35.89	-24.57	6.33	50.03	-4.33	-59.60	29.63
77.11	36.57	-24.44	6.63	52.56	-7.75	-60.64	29.40
77.17	36.59	-24.46	6.66	52.71	-7.88	-62.59	29.40
77.23	36.62	-24.43	6.70	52.85	-8.10	-64.41	29.37
80.22	36.24	-27.24	9.98	61.09	-15.17	-31.04	22.35
80.13	36.17	-27.44	10.02	60.67	-14.92	-30.95	22.48
80.06	36.07	-27.59	10.10	60.19	-14.63	-31.00	22.55
79.99	36.04	-27.72	10.16	59.86	-14.38	-30.92	22.70
88.47	36.89	-24.87	11.45	90.69	-15.26	-76.33	12.36
88.51	36.91	-24.91	11.45	90.68	-15.27	-75.85	12.37
88.53	36.90	-24.91	11.43	90.65	-15.25	-77.80	12.37
88.55	36.86	-24.91	11.47	90.63	-15.31	-78.20	12.35
88.56	36.84	-24.93	11.45	90.69	-15.27	-78.56	12.34
88.59	36.86	-24.91	11.44	90.74	-15.24	-78.64	12.39

➤ Komposisi 60%R744 dan 40%R170

HS				LS			
T Disch	T Conds	T Evap	T Suct	T Disch	T Conds	T Evap	T Suct
59.15	32.05	-31.58	13.46	29.65	27.62	25.12	31.10
59.24	32.05	-31.55	13.46	29.63	27.61	25.11	31.14
59.27	32.04	-31.61	13.40	29.70	27.67	25.15	31.17
59.37	32.05	-31.58	13.35	29.68	27.65	25.15	31.14
59.40	32.05	-31.59	13.34	29.66	27.63	25.15	31.11
59.49	32.03	-31.57	13.33	29.63	27.61	25.16	31.09
59.54	32.05	-31.60	13.28	29.69	27.67	25.19	31.16
59.56	32.01	-31.64	13.24	29.65	27.63	25.15	31.13
59.63	32.02	-31.64	13.19	29.69	27.68	25.22	31.15
59.68	31.97	-31.65	13.13	29.69	27.66	25.20	31.13
70.40	33.34	-24.45	6.39	46.59	-3.66	-39.50	28.77
70.83	33.65	-23.92	6.25	47.01	-3.25	-51.40	28.86
71.24	33.93	-23.55	6.12	47.46	-2.46	-54.48	28.92
71.65	34.24	-23.18	6.01	47.95	-0.82	-54.81	29.00
71.99	34.48	-22.88	5.88	48.41	-0.03	-52.30	29.08
72.34	34.74	-22.64	5.79	48.66	1.07	-51.92	29.07
72.68	34.98	-22.33	5.73	49.00	1.69	-51.78	29.10
73.01	35.20	-22.14	5.61	49.27	1.69	-50.39	29.13
73.32	35.41	-21.96	5.55	49.57	1.88	-49.62	29.18
73.66	35.64	-21.78	5.51	49.80	2.06	-50.20	29.14
73.95	35.87	-21.66	5.46	49.94	2.25	-51.16	29.13
74.20	36.09	-21.52	5.43	50.15	2.44	-52.39	29.18
74.42	36.28	-21.37	5.40	50.20	1.95	-54.57	29.18
87.44	33.17	-29.52	7.50	43.50	-14.22	-81.52	30.72
87.53	33.18	-29.47	7.50	44.00	-14.33	-82.44	30.67
87.46	33.14	-29.45	7.43	44.46	-14.38	-86.29	30.65
87.54	33.21	-29.34	7.44	44.95	-14.40	-88.75	30.62
87.57	33.21	-29.22	7.41	45.49	-14.47	-89.20	30.56
87.62	33.25	-29.17	7.36	46.08	-14.58	-89.45	30.54
87.63	33.24	-29.12	7.31	46.55	-14.66	-89.55	30.54
87.69	33.30	-29.04	7.32	46.98	-14.78	-90.04	30.49
87.77	33.33	-28.95	7.30	47.36	-14.90	-90.64	30.48
87.80	33.37	-28.86	7.27	47.73	-14.89	-90.69	30.51
87.81	33.38	-28.83	7.23	47.90	-15.05	-91.25	30.44
87.89	33.44	-28.78	7.22	48.06	-15.18	-92.15	30.42
87.93	33.45	-28.76	7.19	48.20	-15.20	-92.28	30.47
87.98	33.48	-28.74	7.17	48.22	-15.15	-92.78	30.48
88.04	33.47	-28.75	7.16	48.17	-15.26	-93.31	30.48
88.12	33.55	-28.67	7.18	48.08	-15.22	-93.28	30.53
88.16	33.57	-28.71	7.13	47.96	-15.26	-96.01	30.53

➤ Refrigeran Ethane Murni

HS				LS			
T Disch	T Conds	T Evap	T Suct	T Disch	T Conds	T Evap	T Suct
32.64	29.81	25.72	29.27	30.16	27.66	21.38	32.56
40.44	31.88	25.71	27.35	30.15	27.64	21.40	32.58
43.59	34.56	25.65	26.33	30.16	27.67	21.44	32.56
54.76	39.66	-22.56	20.67	30.34	27.82	21.75	32.72
54.80	39.55	-22.99	20.59	30.36	27.78	21.81	32.74
54.87	39.42	-23.19	20.55	30.39	27.81	21.80	32.75
54.94	39.24	-23.62	20.46	30.38	27.81	21.81	32.74
56.81	35.99	-27.66	18.72	30.78	28.01	22.22	32.93
56.91	35.98	-27.70	18.73	30.74	28.00	22.20	32.88
56.96	35.87	-27.82	18.63	30.72	27.97	22.20	32.90
57.05	35.84	-27.82	18.60	30.73	27.99	22.21	32.89
71.39	32.58	-28.03	8.06	47.75	-2.11	23.14	29.65
71.77	32.87	-26.43	7.68	48.73	-1.74	19.47	29.64
72.21	33.20	-25.14	7.38	49.19	-1.58	-8.63	29.68
72.68	33.55	-24.16	7.13	49.64	-3.91	-43.63	29.79
78.53	37.95	-18.58	5.77	56.98	8.37	-59.53	30.05
81.84	41.48	-18.42	7.82	59.91	4.86	-60.40	25.65
81.85	41.47	-18.44	7.86	60.09	4.81	-61.82	25.40
81.90	41.48	-18.45	7.90	60.22	4.74	-62.36	25.14
91.62	40.65	-20.02	12.24	88.33	-5.44	-77.44	-28.76
91.64	40.66	-20.05	12.22	88.34	-5.36	-77.44	-28.76
91.67	40.64	-20.08	12.21	88.33	-5.37	-77.45	-28.81
91.64	40.64	-20.06	12.20	88.35	-5.35	-77.43	-28.79
91.67	40.65	-20.05	12.22	88.35	-5.35	-77.48	-28.81
91.66	40.67	-20.10	12.22	88.35	-5.37	-77.45	-28.84
91.63	40.70	-20.05	12.18	88.32	-5.41	-77.38	-28.76
91.63	40.71	-20.06	12.20	88.30	-5.43	-77.37	-28.78
91.66	40.77	-20.01	12.19	88.32	-5.43	-77.39	-28.76
91.66	40.73	-20.02	12.21	88.25	-5.39	-77.47	-28.78
91.68	40.74	-20.02	12.21	88.27	-5.37	-77.44	-28.70
91.69	40.74	-19.98	12.20	88.28	-5.29	-77.48	-28.67
91.71	40.75	-19.97	12.19	88.25	-5.33	-77.52	-28.69
91.73	40.75	-19.98	12.22	88.24	-5.34	-77.42	-28.65
91.70	40.76	-20.00	12.18	88.23	-5.30	-77.45	-28.64
91.75	40.75	-20.00	12.18	88.27	-5.32	-77.43	-28.61
91.69	40.73	-20.03	12.15	88.30	-5.31	-77.54	-28.54
91.69	40.68	-19.99	12.13	88.34	-5.27	-77.43	-28.54
92.31	40.90	-19.89	12.05	90.57	-5.55	-77.81	-28.63
92.33	40.94	-19.86	12.08	90.54	-5.55	-77.82	-28.61

➤ Refrigeran CO₂ Murni

HS				LS			
T Disch	T Conds	T Evap	T Suct	T Disch	T Conds	T Evap	T Suct
38.18	36.14	22.44	25.60	29.11	28.14	27.13	29.41
38.77	36.47	21.28	25.43	29.16	28.18	27.17	29.42
39.11	36.69	20.53	25.35	29.13	28.16	27.15	29.45
40.03	36.61	-5.80	25.40	29.18	28.17	27.19	29.46
39.87	36.54	-13.89	25.43	29.16	28.17	27.17	29.44
39.71	36.46	-18.51	25.43	29.19	28.18	27.17	29.46
39.54	36.36	-20.38	25.40	29.21	28.24	27.21	29.51
39.43	36.29	-21.11	25.43	29.18	28.18	27.15	29.45
39.31	36.23	-21.78	25.40	29.22	28.22	27.20	29.53
39.25	36.23	-22.23	25.42	29.20	28.19	27.21	29.47
42.97	35.70	-27.54	23.72	29.49	28.32	27.34	29.76
43.03	35.65	-27.75	23.64	29.50	28.34	27.32	29.77
43.08	35.53	-27.90	23.56	29.53	28.35	27.31	29.77
44.05	34.15	-29.93	21.94	29.63	28.42	27.42	29.90
44.10	34.09	-29.98	21.85	29.63	28.41	27.41	29.87
44.17	34.03	-30.01	21.74	29.62	28.48	27.42	29.88
64.48	32.76	-27.21	7.94	33.66	8.81	22.22	28.69
64.73	32.97	-26.89	7.82	33.61	9.66	20.91	28.74
65.03	33.12	-26.65	7.69	33.62	9.49	19.56	28.78
65.29	33.31	-26.51	7.59	33.54	8.77	18.23	28.80
65.57	33.48	-26.42	7.51	33.53	7.95	16.81	28.86
66.79	34.22	-26.48	7.27	33.80	3.54	-20.31	29.06
66.91	34.29	-26.53	7.17	33.91	2.79	-27.35	29.10
67.08	34.38	-26.49	7.17	34.00	2.18	-33.15	29.08
67.20	34.47	-26.49	7.17	34.10	1.58	-38.19	29.07
67.31	34.50	-26.45	7.14	34.23	1.03	-43.06	29.14
67.40	34.59	-26.49	7.10	34.35	0.47	-46.97	29.15
67.56	34.68	-26.48	7.11	34.45	-0.09	-48.02	29.14
67.65	34.72	-26.45	7.09	34.62	-0.48	-49.12	29.19
67.77	34.80	-26.41	7.09	34.76	-0.95	-51.11	29.19
77.47	34.46	-28.33	10.23	62.08	-19.06	-66.34	22.04
77.46	34.49	-28.31	10.22	62.12	-19.04	-66.29	21.99
77.45	34.47	-28.32	10.19	62.12	-19.10	-66.35	21.96
77.51	34.52	-28.28	10.24	62.22	-19.05	-66.30	21.99
77.47	34.51	-28.32	10.23	62.20	-19.12	-66.34	21.95
77.44	34.48	-28.35	10.19	62.21	-19.12	-66.36	21.95
77.48	34.51	-28.30	10.21	62.27	-19.10	-66.36	21.96
89.31	35.49	-27.04	10.99	93.26	-18.62	-68.40	19.00
89.29	35.49	-27.04	11.00	93.27	-18.61	-68.31	19.00