

**PENGARUH KONSENTRASI CO₂ DALAM REFRIGERAN LPG - CO₂
TERHADAP UNJUK KERJA AC MOBIL**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun Oleh:

**ARIF MUKHLASIN
NIM. 0910621002 - 62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
MALANG
2014**



LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH KONSENTRASI CO₂ DALAM REFRIGERAN CO₂ – LPG TERHADAP UNJUK KERJA AC MOBIL

SKRIPSI KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik



Disusun Oleh:

ARIF MUKHLASIN
NIM. 0910621002 - 62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng
NIP.19740121 199903 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH KONSENTRASI CO₂ DALAM REFRIGERAN LPG-CO₂ TERHADAP UNJUK KERJA AC MOBIL

SKRIPSI KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ARIF MUKHLASIN
NIM. 0910621002-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 28 Januari 2014

Majelis Penguji

Skripsi I

Skripsi II

Ir. Suharto, MT
NIP. 19531030 198212 1 001

Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng
NIP. 19710310 199802 1 001

Skripsi III

Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.
NIP. 19750702 200003 2 001

199903 1 004

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng
NIP. 19740121 199903 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena hanya dengan limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul ” **Pengaruh Konsentrasi CO₂ Dalam Refrigeran LPG-CO₂ Terhadap Unjuk Kerja AC Mobil**”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat bagi mahasiswa jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang untuk memperoleh gelar sarjana Teknik.

Penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu menyelesaikan skripsi ini, terutama kepada :

1. Bapak Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku ketua Jurusan Teknik Mesin sekaligus pembimbing II dan Bapak Purnami, ST.,MT selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin
2. Bapak Agung Sugeng Widodo, ST.,MT.,Ph.D. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi
3. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku dosen pembimbing I atas bantuan, saran dan nasihat dalam menyelesaikan selama ini
4. Seluruh Staf pengajar dan Administrasi Jurusan Teknik Mesin
5. Keluarga besar penulis tercinta, Ayahanda Alm. Imam Mukhlis dan Ibunda Nurus Syamsi, Nenek Syamsiyah, Paman Bahtiar Ahmad serta adik-adikku Ahsin Sidqi, Sufti Nuzula dan Azrul Aiman atas segala doa, kasih sayang, bantuan dan dukungan baik secara materil maupun moril.
6. **Black Mamba (M'09)** yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu serta rekan-rekan Pendingin (Anput, Mika, Ucup, Jedung, Bedus, Mas Afrima) terimakasih atas doa dan dukungannya.
7. Keluarga besar Kerto Raharjo Dalam No.7, Paundra, Tegar, Jedung dan Ihsan yang telah membantu secara moril demi kelancaran skripsi penulis.
8. Keluarga besar Adi Putra Nugraha (Babok) terutama pada tante Edo atas nasihat dan dukungan, kebaikan kalian tidak akan pernah penulis lupakan.

Dengan keterbatasan ilmu yang dimiliki penulis, tentunya skripsi ini banyak membutuhkan masukan. Untuk itu penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Februari 2014

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian - Penelitian Sebelumnya.....	3
2.2 Sistem Refrigerasi dan Pengkondisian Udara	3
2.3 Sifat Termodinamika.....	4
2.4 Psikrometri	6
2.5 Persamaan Aliran Mantap	8
2.6 Mesin Pendingin	9
2.6.1 Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap	10
2.7 Refrigeran	18
2.7.1 Klasifikasi refrigeran	18
2.7.2 Dasar pemilihan refrigeran	20
2.7.3 <i>Liquefield Petroleum Gas (LPG)</i>	21
2.7.4 Karbondioksida (CO ₂).....	21
2.8 Campuran Gas	21
2.9 Hipotesa.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Metode Penelitian.....	27
3.2 Variabel Penelitian	27
3.3 Gambar Instalasi Penelitian.....	28

3.4	Alat-alat yang Digunakan.....	29
3.5	Tempat Penelitian.....	34
3.6	Metode Pengambilan Data	34
3.7	Diagram Alir Proses Penelitian	35

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

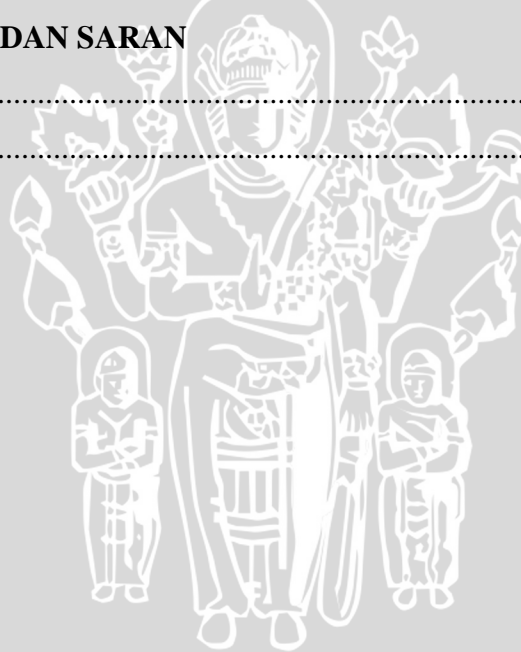
4.1	Analisa Data	37
4.1.1	Data hasil penelitian	37
4.1.2	Perhitungan data	38
4.1.3	Data hasil perhitungan	40
4.2	Hasil dan Pembahasan.....	41
4.2.1	Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Udara terhadap Efek Refrigerasi	43
4.2.2	Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Kerja Kompresi.....	45
4.2.3	Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Koefisien Prestasi	46

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran	47

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Tabel beberapa refrigeran halokarbon	18
Tabel 2.2	Tabel beberapa refrigeran anorganik	19
Tabel 2.3	Tabel beberapa refrigeran hidrokarbon	19
Tabel 4.1	Tabel data hasil pengujian	37
Tabel 4.2	Tekanan <i>absolute</i> campuran gas	38
Tabel 4.3	Tekanan parsial masing-masing gas	39
Tabel 4.4	Tekanan parsial	40

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Daur refrigerasi Carnot	4
Gambar 2.2	Keseimbangan energi pada sebuah volume atur yang sedang mengalami laju aliran mantap	9
Gambar 2.3	Diagram skematik komponen mesin pendingin siklus kompresi uap	10
Gambar 2.4	Diagram tekanan- entalpi siklus kompresi uap	13
Gambar 2.5	Kompresor jenis rotari	13
Gambar 2.6	Kondensor	14
Gambar 2.7	Evaporator	15
Gambar 2.8	Katup ekspansi	17
Gambar 3.1	Skema instalasi penelitian	28
Gambar 3.2	Kompresor	29
Gambar 3.3	Kondensor	29
Gambar 3.4	Katup ekspansi	30
Gambar 3.5	Evaporator	30
Gambar 3.6	<i>Filter drier</i>	30
Gambar 3.7	<i>Blower</i>	31
Gambar 3.8	Ruangan penyekat	31
Gambar 3.9	Pompa vakum refrigeran	31
Gambar 3.10	<i>Manifold</i>	32
Gambar 3.11	Tabung LPG 12 kg	32
Gambar 3.12	Timbangan elektrik	33
Gambar 3.13	Tabung CO ₂	33
Gambar 3.14	<i>Regulator high pressure</i>	33
Gambar 3.15	<i>Pressure gauge</i>	34
Gambar 3.16	Termometer	34
Gambar 3.17	Diagram alir penelitian	36
Gambar 4.1	Diagram P-h gas butan dan propan	41
Gambar 4.2	Diagram P-h gas CO ₂ konsentrasi 15 dan 20%	43
Gambar 4.3	Diagram pengaruh konsentrasi CO ₂ terhadap efek refrigerasi	43
Gambar 4.4	Diagram hubungan antara tekanan dan konsentrasi CO ₂	44

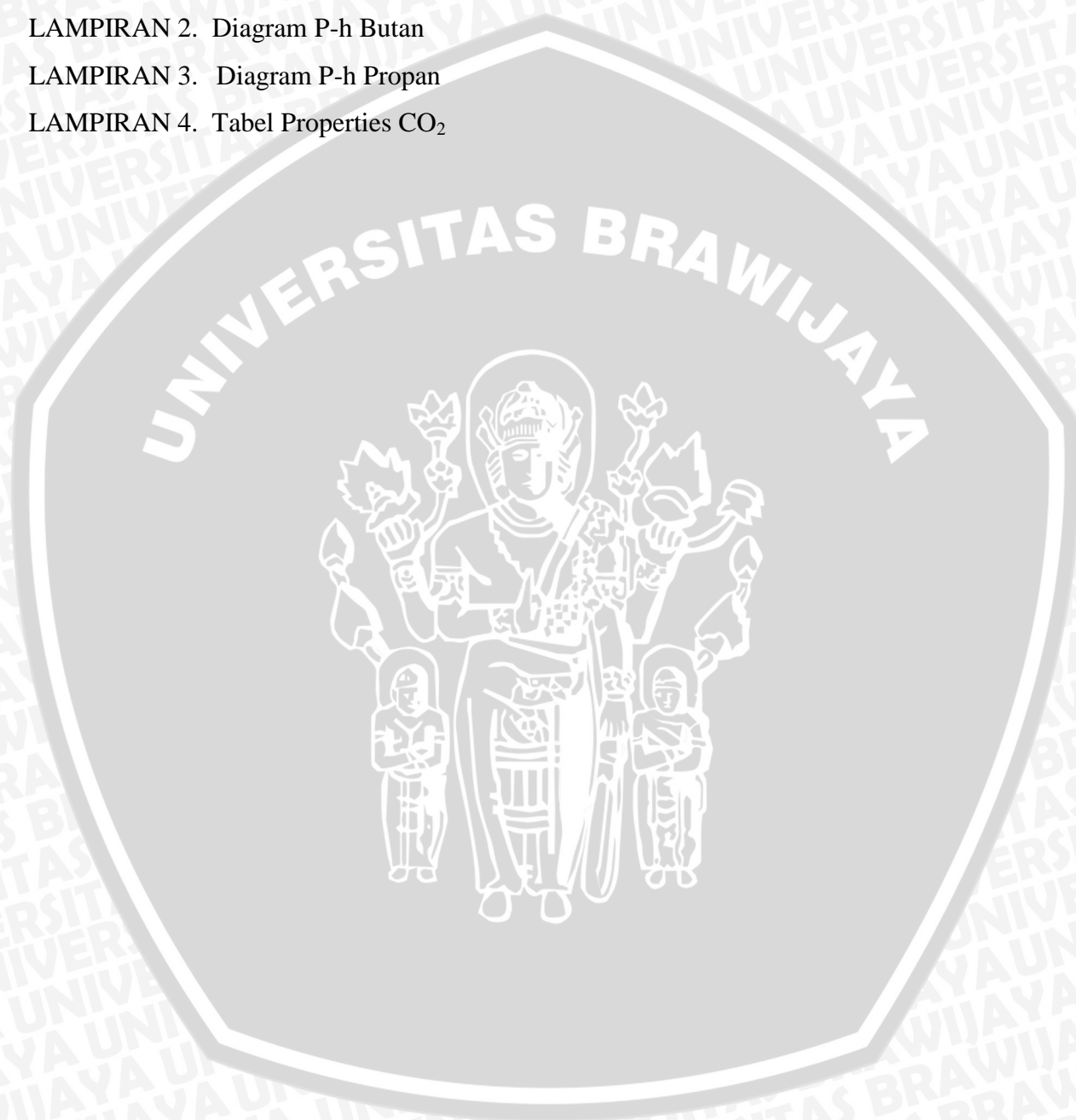
Gambar 4.5 Diagram pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap kerja kompresi 45

Gambar 4.6 Diagram pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap koefisien prestasi 46



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
LAMPIRAN 1.	Hasil Perhitungan Entalpi Campuran
LAMPIRAN 2.	Diagram P-h Butan
LAMPIRAN 3.	Diagram P-h Propan
LAMPIRAN 4.	Tabel Properties CO ₂



RINGKASAN

Arif Mukhlisin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Februari 2014, *Pengaruh Konsentrasi CO₂ Dalam Refrigeran LPG-CO₂ Terhadap Unjuk Kerja AC Mobil*, Dosen Pembimbing: Mega Nur Sasongko dan Nurkholis Hamidi

Refrigeran hidrokarbon pada saat ini merupakan refrigeran alternatif yang sering digunakan sebagai pengganti refrigeran sintetik (halokarbon). Salah satu refrigeran hidrokarbon adalah LPG sebagai pengganti refrigeran yang digunakan pada sistem refrigerasi. Tetapi refrigeran hidrokarbon (LPG) memiliki kekurangan antara lain mudah terbakar (*flammable*). Agar tidak mudah terbakar dibutuhkan zat penghambat laju reaksi pembakaran seperti CO₂ (Karbondioksida) yang merupakan zat penghambat alami yang tidak memberikan efek negatif terhadap lingkungan. Penambahan CO₂ dalam refrigeran LPG berpengaruh terhadap unjuk kerja dari mesin pendingin.

Penelitian ini digunakan instalasi mesin pendingin AC mobil Toyota Kijang HFC 134a, LPG sebagai refrigeran dan CO₂ sebagai zat penghambat laju reaksi pembakaran. Variabel bebas yang digunakan yaitu CO₂ 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% fraksi massa. Sedangkan variabel yang dicari adalah unjuk kerja yang meliputi efek refrigerasi, kerja kompresi dan koefisien prestasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin meningkatnya konsentrasi CO₂ menyebabkan koefisien prestasi semakin menurun, karena kerja kompresor yang diperlukan untuk menaikkan temperatur dan tekanan refrigeran semakin besar dan meningkatnya konsentrasi CO₂ menyebabkan efek refrigerasi menurun karena tekanan dan temperatur di evaporator meningkat pula sehingga jumlah panas yang diserap oleh refrigeran di evaporator semakin sedikit. Koefisien prestasi tertinggi terdapat pada campuran LPG-CO₂ 100:0 % yaitu sebesar 5,625.

Kata kunci : unjuk kerja, AC mobil, refrigeran LPG-CO₂

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di akhir abad ini telah banyak sekali cabang ilmu pengetahuan dan teknologi yang mengalami perkembangan. Salah satu cabang ilmu yang mengalami perkembangan adalah bidang *engineering* atau rekayasa yang memiliki beberapa cabang ilmu lagi, diantaranya adalah mesin pendingin dan pengkondisian udara.

Mesin pendingin merupakan mesin yang dipakai untuk memindahkan panas dari temperatur rendah ke temperatur tinggi dengan cara menambahkan kerja dari luar. Jelasnya mesin pendingin merupakan peralatan yang digunakan dalam proses pendinginan suatu fluida sehingga mencapai temperatur dan kelembaban yang diinginkan, dengan jalan menyerap panas dari suatu reservoir rendah dan diberikan ke reservoir tinggi. Bagian utama mesin pendingin terdiri dari empat bagian yaitu : evaporator, kompresor, kondensor dan alat ekspansi (Arismunandar, 2002:1).

Sistem refrigasi saat ini telah banyak diterapkan pada perumahan, perkantoran dan terutama untuk kendaraan bermotor khususnya mobil, hal ini dapat dibuktikan dengan banyaknya pemakaian *Air Conditioner* (AC) oleh perumahan, perkantoran, maupun mobil yang bertujuan untuk mengkondisikan dan menyegarkan udara ruangnya.

Dalam sistem pengondisian udara salah satu hal yang perlu diperhatikan adalah refrigeran. Refrigeran adalah media pembawa kalor yang mudah berubah bentuk dari cair ke gas atau sebaliknya dengan menyerap atau melepas kalor yang digunakan dalam siklus mesin pendingin.

Hidrokarbon merupakan salah satu refrigeran alternatif yang dikembangkan oleh para ilmuwan untuk meminimalisir terjadinya kerusakan ozon. Kandungan dari LPG (*liquified petroleum gas*) yang terdiri dari senyawa hidrokarbon dapat dijadikan sebagai refrigeran alternatif yang mudah ditemukan di kehidupan kita sehari-hari. Tetapi refrigeran (LPG) ini memiliki kelemahan yaitu diantaranya mudah terbakar atau (*flammability*). Oleh karena itu dibutuhkan zat *inhibitor* (CO_2) untuk menghambat laju reaksi dari hidrokarbon tersebut

Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan jenis mesin pendingin berupa *Air Conditioner* (AC) pada sebuah mobil Toyota Kijang. Diantaranya adalah dengan memodifikasi refrigeran yang biasa dipakai oleh AC mobil pada umumnya yaitu R134a

dengan refrigeran campuran antara *Carbon Dioxide* (CO₂) dan LPG. Perbandingan campuran konsentrasi dari CO₂ dan LPG yang paling optimal yang akan dicari.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

Bagaimanakah pengaruh konsentrasi CO₂ dalam refrigeran LPG - CO₂ terhadap unjuk kerja AC mobil?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas dalam skripsi ini lebih terfokus, maka penulis mengambil beberapa batasan masalah seperti dibawah ini :

1. *Air Conditioner* yang digunakan bermerk Toyota Kijang HFC 134a
2. Unjuk kerja didefinisikan sebagai koefisien prestasi (KP).
3. Ruang sekat pada kondisi *steady state* (tetap/tidak berubah terhadap waktu).
4. Udara di lingkungan sekitar diasumsikan memiliki kelembaban dan temperatur yang konstan.
5. Putaran *blower* evaporator dikondisikan konstan.
6. Tidak membahas kerugian energi sepanjang aliran.
7. Konsentrasi yang dimaksud adalah perbandingan massa antara CO₂ dan LPG.
8. Perhitungan koefisien prestasi adalah perhitungan ideal.
9. Tidak menghitung *flammability*.

1.4 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan ini adalah untuk mengetahui pengaruh konsentrasi CO₂ dalam refrigeran LPG - CO₂ terhadap unjuk kerja AC mobil.

1.5 Manfaat Penulisan

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Mampu mengaplikasikan teori yang telah didapat selama perkuliahan tentang mesin pendingin dan pengkondisian udara.
2. Membantu memecahkan permasalahan-permasalahan yang sering dihadapi dalam melakukan perancangan atau pemilihan alat pengkondisi udara yang optimal.
3. Sebagai refrigeran alternatif yang ramah lingkungan khususnya refrigeran pada AC mobil.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Sistem refrigerasi yang paling sederhana memiliki komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator (Arismunandar, 2002).

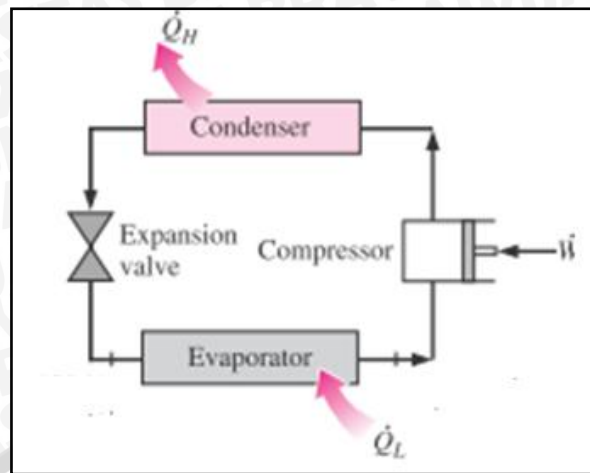
Menurut Suwono (2005) refrigeran hidrokarbon merupakan pilihan yang memiliki keunggulan dibanding dengan refrigeran lain. Hidrokarbon sebagai refrigeran bekerja pada tekanan rendah sehingga energi yang diperlukan dalam sistem refrigerasi lebih rendah sampai 25%. Refrigeran hidrokarbon menurut Mohanraj (2009) merupakan salah satu refrigeran alami yang ramah lingkungan yang menjadi refrigeran alternatif pengganti refrigeran halogen. Penelitian di bidang hidrokarbon masih memiliki peluang riset yang cukup besar.

Fatouh (2006) melakukan evaluasi terhadap LPG sebagai refrigeran untuk aplikasi pada domestik *refrigerator* pengganti R134a. Menurut Mclaine (1995) penggunaan LPG sebagai refrigeran memiliki sifat termodinamika yang lebih baik dan menghemat energi 10-20%.

2.2 Sistem Refrigerasi dan Pengkondisian Udara

Sistem refrigerasi merupakan suatu proses pengkondisian untuk menjaga suatu sistem berada pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur lingkungan sekelilingnya. Pada sistem refrigerasi ini terjadi pemindahan kalor secara terus menerus dari ruangan ke lingkungan. Sedangkan media yang digunakan untuk memindahkan kalor adalah refrigeran, yang bersirkulasi secara tertutup dalam sistem refrigerasi tersebut.

Siklus refrigerasi Carnot merupakan kebalikan dari siklus mesin Carnot atau siklus Carnot, dimana pada siklus ini terjadi penyerapan kalor dari reservoir suhu rendah dan pelepasan kalor pada reservoir suhu tinggi. Daur refrigerasi Carnot bisa kita lihat pada gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1 Daur refrigerasi Carnot
Sumber: Cengel (2002:320)

Sedangkan pengkondisian udara adalah proses perlakuan terhadap udara untuk mengatur suhu, kelembaban, kebersihan, dan pendistribusiannya secara serentak guna mencapai kondisi nyaman yang dibutuhkan oleh penghuni yang berada di dalamnya. Oleh karena itu, teknik pengkondisian udara juga mencakup usaha pemanasan, seperti pengaturan kecepatan, radiasi termal, dan kualitas udara termasuk penyisihan partikel dan uap pengotor (Stoecker, 1996:1).

2.3 Sifat Termodinamika

Bagian penting dalam menganalisis sistem termal adalah penentuan sifat termodinamika yang bersangkutan. Suatu sifat adalah setiap karakteristik atau ciri dari bahan yang dapat dijabari secara kualitatif, seperti suhu, tekanan, dan rapat massa. Oleh karena termodinamika berkisar pada energi maka seluruh sifat-sifat termodinamika berkaitan dengan energi. Sifat-sifat termodinamika yang utama dalam penelitian ini adalah:

1. Temperatur

Temperatur (t) dari suatu bahan menyatakan keadaan termalnya dan kemampuannya untuk bertukar energi dengan bahan lain yang bersentuhan dengannya. Jadi, suatu bahan yang bersuhu lebih tinggi akan memberikan energi kepada bahan lain yang temperaturnya lebih rendah. Temperatur absolut (T) adalah derajat di atas temperatur nol absolut yang dinyatakan dengan Kelvin (K), yaitu $T = t^{\circ}\text{C} + 273$.

2. Tekanan

Tekanan (P) adalah gaya normal (tegak lurus) yang diberikan oleh suatu fluida per satuan luas benda yang terkena gaya tersebut. Tekanan absolut adalah ukuran tekanan diatas nol (tekanan yang sebenarnya yang berada diatas nol). Sedangkan tekanan pengukuran (*gauge pressure*) adalah tekanan yang diukur di atas tekanan atmosfer suatu tempat (nol tekanan pengukuran sama dengan tekanan atmosfer di tempat tersebut). Tekanan atmosfer standar adalah $101.325 Pa$.

3. Rapat massa dan volume spesifik

Rapat massa (ρ) dari suatu fluida adalah massa yang mengisi satu satuan volume, sebaliknya volume spesifik (ν) adalah volume yang diisi oleh satu satuan massa. Rapat massa dan volume spesifik saling berkaitan satu sama lain. Rapat massa udara pada tekanan atmosfer standar dengan suhu $25^\circ C$ mendekati $1,2 kg/m^3$.

4. Kalor spesifik

Kalor spesifik dari suatu bahan adalah jumlah energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu satuan massa bahan tersebut sebesar $1^\circ K$. Oleh karena besaran ini dipengaruhi oleh cara proses berlangsung, maka cara kalor ditambahkan atau dilepaskan harus disebutkan. Dua besaran yang umum adalah kalor spesifik pada volume tetap (c_v) dan kalor spesifik pada tekanan tetap (c_p). Besaran yang kedua (c_p) lebih banyak berguna bagi kita karena banyak dipakai pada proses pemanasan dan pendinginan dalam teknik refrigerasi dan pengkondisian udara.

Nilai pendekatan untuk kalor spesifik dari beberapa bahan yang penting adalah sebagai berikut:

$$C_p = \left\{ \begin{array}{ll} 1.0 & kJ .kg^{-1} .K^{-1} \quad \text{udara kering} \\ 4.19 & kJ .kg^{-1} .K^{-1} \text{air} \\ 1.88 & kJ .kg^{-1} .K^{-1} \quad \text{uap air} \end{array} \right\}$$

5. Entalpi

Entalpi (h) adalah energi kalor yang dimiliki suatu bahan per satuan massa (kJ/kg). Suatu perubahan entalpi (Δh) dalam (kJ/kg) adalah energi kalor yang ditambahkan atau diambil per satuan massa melalui proses-proses tertentu. Sifat entalpi dapat juga menyatakan efek pemindahan kalor untuk proses penguapan dan pengembunan. Dapat dtuliskan dengan rumus 2-1 berikut.

$$h = C_p . T \quad (2-1)$$

dengan:

h = Entalpi (kJ/kg) / (kJ/kg)

C_p = kalor jenis (kJ/kg°C)

T = Temperatur (°C)

6. Entropi

Entropi (s) adalah energi kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan 1° temperatur setiap satuan massa (kJ/kg.°K) . Dua sifat dari entropi adalah sebagai berikut:

- Jika suatu gas atau uap ditekan atau diekspansikan tanpa gesekan dan tanpa penambahan atau pelepasan kalor selama proses berlangsung maka entropi bahan tersebut tetap.
- Dalam proses yang disebutkan dalam butir a, perubahan entalpi menyatakan jumlah kerja per satuan massa yang diperlukan oleh proses penekanan atau yang dilepaskan oleh proses ekspansi tersebut.

2.4 Psikrometri

Psikrometri adalah ilmu yang membahas tentang sifat-sifat udara lembab. Sifat termal dari udara basah pada umumnya ditunjukkan dengan mempergunakan diagram psikrometri. Psikrometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air. Psikrometri mempunyai arti penting dalam teknik pengkondisian udara, karena udara atmosfer tidak kering betul melainkan merupakan campuran antara udara dan uap air. Dalam hal tersebut dipakai beberapa istilah dan simbol sebagai berikut:

1. Temperatur bola kering

Temperatur bola kering dapat dibaca pada termometer dengan sensor kering dan terbuka. Namun, penunjukannya tidaklah tepat karena adanya pengaruh radiasi panas, kecuali jika sensornya memperoleh ventilasi yang cukup baik.

2. Temperatur bola basah

Dalam hal ini digunakan termometer dengan sensor yang dibalut dengan kain basah untuk menghilangkan pengaruh radiasi panas. Namun perlu diperhatikan bahwa melalui sensor harus terjadi aliran udara sekurang-kurangnya 5 m/s. Temperatur bola basah kadang-kadang dinamai temperatur jenuh adiabatik (*adiabatic saturated temperature*).

3. Rasio kelembaban (*humidity ratio*)

Rasio kelembaban (W) adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Dalam teknik pengkondisian udara, untuk menghitung rasio kelembaban dapat digunakan persamaan gas ideal. Jadi uap air dan udara dapat dianggap sebagai gas ideal, sehingga mengikuti persamaan $pV = RT$ serta memiliki kalor spesifik yang tetap. Dengan demikian untuk rasio kelembaban diperoleh persamaan 2-2 sebagai berikut:

$$W = 0,622 \frac{P_s}{p_t - p_s} \quad (\text{Stoecker; 1996:41}) \quad (2-2)$$

dengan:

W = Rasio kelembaban (*kg udara/kg udara kering*)

p_t = Tekanan atmosfer, dimana $p_t = p_a + p_s$ (Pa)

p_s = Tekanan parsial uap air (Pa)

p_a = Tekanan parsial udara kering (Pa)

4. Kelembaban relatif (ϕ)

Kelembaban relatif (ϕ) didefinisikan sebagai perbandingan fraksi molekul uap air di dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh pada suhu dan tekanan yang sama. Kelembaban relatif (ϕ) dapat dinyatakan dengan persamaan 2-3:

$$\phi = \frac{P_s}{P_w} \quad (\text{Stoecker; 1996:40}) \quad (2-3)$$

dengan:

ϕ = Kelembaban relatif (%)

p_s = Tekanan uap air parsial (Pa)

P_w = Tekanan jenuh air murni pada suhu yang sama (Pa)

5. Volume spesifik

Volume spesifik adalah volume udara campuran dengan satuan meter kubik per kilogram udara kering. Dapat juga dikatakan sebagai meter kubik udara kering atau meter kubik campuran per kilogram udara kering, karena volume yang diisi oleh masing-masing substansi sama. Dari persamaan gas ideal, volume spesifik (v) sesuai persamaan 2-4 di bawah ini:

$$v = \frac{R_a T}{p_t - p_s} \quad (\text{Stoecker; 1996:43}) \quad (2-4)$$

dengan:

v	= Volume spesifik	$(\text{m}^3/\text{kg}$ udara kering)
R_a	= Tetapan gas untuk udara kering	$(\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$
p_t	= Tekanan atmosfer	(Pa)
p_s	= Tekanan parsial uap air	(Pa)

6. Titik embun

Titik embun adalah temperatur air pada keadaan dimana tekanan uapnya sama dengan tekanan uap dari udara (lembab). Jadi, pada temperatur tersebut uap air dalam udara mulai mengembun dan hal tersebut terjadi apabila udara (lembab) didinginkan.

2.5 Persamaan Energi Aliran Mantap

Pada sistem refrigerasi laju aliran massa cenderung tetap sehingga laju aliran dapat dianggap mantap. Keseimbangan energi pada Gambar 2.2 dapat dinyatakan sebagai berikut :

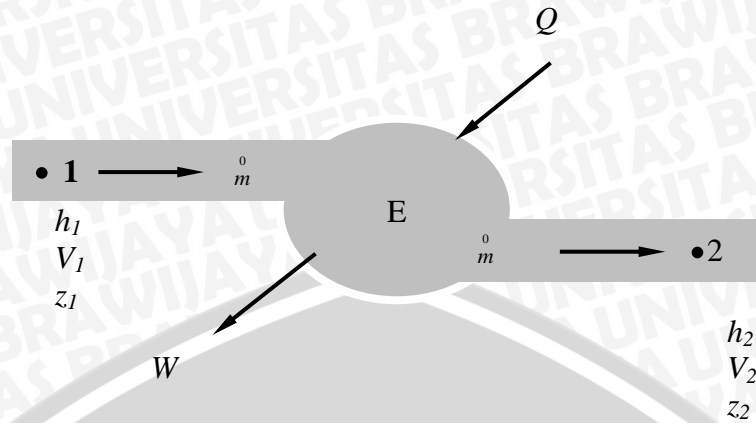
Besarnya energi yang masuk bersama aliran dititik 1 ditambah dengan besarnya energi yang ditambahkan berupa kalor yang dikurangi dengan besarnya energi dalam bentuk kerja dan dikurangi dengan energi yang meninggalkan sistem pada titik 2 sama dengan besarnya perubahan energi di dalam volume kendali (Stoecker; 1996:20).

Ungkapan matematika untuk keseimbangan energi tersebut sesuai dengan persamaan 2-5:

$$m \left[h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q - m \left[h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] - W = \frac{dE}{d\theta} \quad (\text{Stoecker; 1996:20}) \quad (2-5)$$

Oleh karena perhatian dibatasi pada masalah proses aliran mantap, maka tak ada perubahan harga E terhadap waktu, karena itu $dE/d\theta = 0$, dan persamaan energi aliran mantap sesuai dengan persamaan 2-6:

$$m \left[h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q = m \left[h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] + W \quad (\text{Stoecker; 1996:21}) \quad (2-6)$$



Gambar 2.2 Keseimbangan energi pada sebuah volume atur yang sedang mengalami laju aliran mantap
 Sumber: Stoecker (1996:20)

dengan:

- \dot{m} = Laju aliran massa (kg/det)
- h = Entalpi (J/kg)
- v = Kecepatan (m/det)
- z = Ketinggian (m)
- g = Percepatan gravitasi = 9,81 ($\frac{m}{det^2}$)
- Q = Laju aliran energi dalam bentuk kalor (W)
- W = Laju aliran energi dalam bentuk kerja ($\frac{J}{det}$)
- E = Energi dalam sistem (J)

2.6 Mesin Pendingin

Mesin pendingin adalah mesin konversi energi yang menyerap panas (Q_1) dari reservoir dingin (*low temperature region*) dan memberikan panas (Q_2) ke reservoir panas (*high temperature region*) dengan menambah kerja dari luar. Jelasnya mesin pendingin merupakan peralatan yang digunakan dalam proses pendinginan suatu materi sehingga mencapai temperatur dan kelembaban yang diinginkan, dengan cara menyerap kalor dari materi yang akan dikondisikan.

Menurut cara kerjanya mesin pendingin dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap
2. Mesin pendingin dengan siklus absorpsi.

Siklus kompresi uap disebut sebagai siklus yang dioperasikan oleh kerja (*work-operated cycle*), karena kenaikan tekanan refrigeran dilakukan oleh kompresor yang memerlukan kerja dari luar. Sedangkan siklus absorpsi disebut sebagai siklus yang dioperasikan oleh kalor (*heat-operated cycle*) karena sebagian besar biaya operasi berkaitan dengan pemberian kalor pada generator yang diperlukan untuk melepaskan uap (refrigeran) dari zat cair bertekanan tinggi. Siklus kompresi uap menggunakan satu jenis fluida, yaitu refrigeran. Sedangkan siklus absorpsi menggunakan dua jenis fluida, yaitu refrigeran dan zat cair penyerap (*absorbing liquid*).

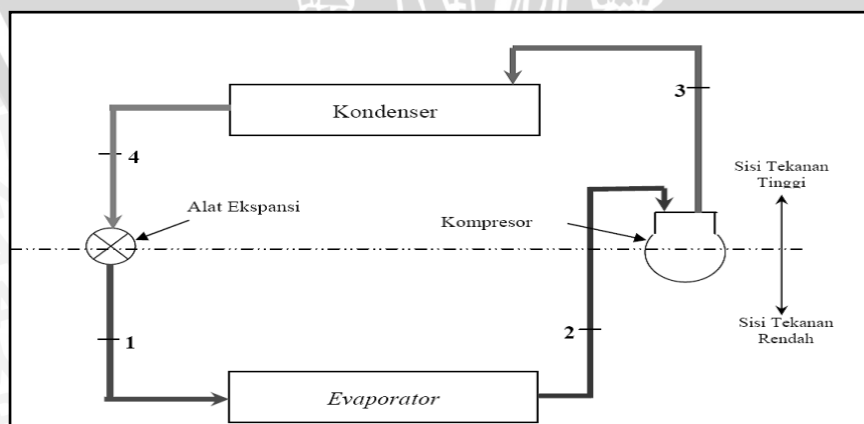
2.6.1 Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap

Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap merupakan mesin yang banyak dipakai untuk aplikasi mesin pendingin. Pada siklus ini penyerapan panas dilakukan dalam evaporator dengan temperatur dan tekanan rendah. Di dalam evaporator, refrigeran berubah dari fase cair menjadi fase gas, lalu masuk ke kompresor. Karena kerja kompresor, refrigeran menjadi gas bertemperatur dan bertekanan tinggi. Untuk melepaskan panas yang diserap oleh evaporator, refrigeran diembunkan di dalam kondensor sehingga refrigeran menjadi cair. Sebelum refrigeran memasuki evaporator, refrigeran diekspansikan melalui katup ekspansi terlebih dahulu.

Pertimbangan pemilihan mesin pendingin siklus kompresi uap adalah:

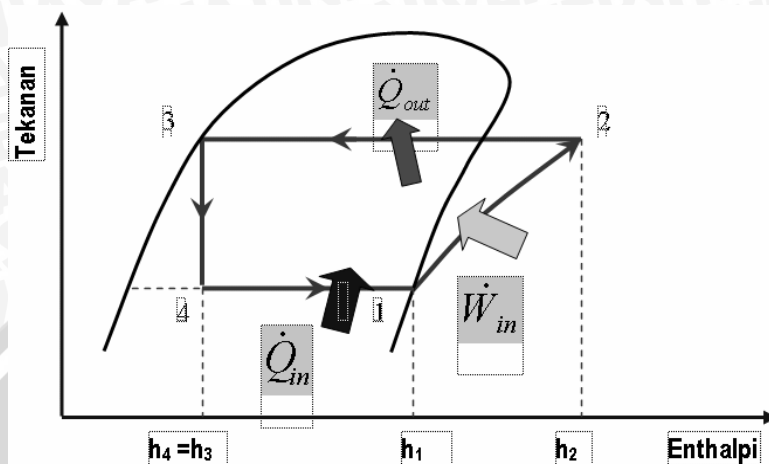
1. Konstruksinya sederhana
2. Pengoperasiannya mudah dan tahan lama
3. Bila terjadi kerusakan mudah diperbaiki.

Instalasi mesin pendingin kompresi uap ditunjukkan pada gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2.3 Diagram skematik komponen mesin pendingin siklus kompresi uap
Sumber : Stoecker (1996:187)

Siklus kompresi uap pada diagram tekanan-entalpi (p-h diagram) dan diagram skematik mesin pendingin siklus kompresi uap ditunjukkan oleh gambar 2.4 sebagai berikut:



Gambar 2.4 Diagram tekanan-entalpi siklus kompresi uap
Sumber : Stoecker (1996:187)

Keterangan gambar:

- Proses 1-2: Proses kompresi secara isentropik pada kompresor. Pada proses ini tekanan, temperatur dan entalpi refrigeran naik. Refrigeran mengalami perubahan fase dari uap jenuh kering menjadi uap panas lanjut.
- Proses 2-3: Proses pelepasan kalor secara isobarik, menyebabkan penurunan panas lanjut (*desuperheating*) dan pengembunan refrigeran. Pada proses ini temperatur dan entalpi refrigeran turun dan refrigeran mengalami perubahan fase dari uap panas lanjut menjadi cair.
- Proses 3-4: Proses ekspansi secara isoentalpi, dari cairan jenuh menuju tekanan evaporator. Pada proses ini tekanan dan temperatur refrigeran turun dan refrigeran mengalami perubahan fase dari cair menjadi uap jenuh. Proses pengecilan (*throttling process*) pada sistem pendingin terjadi di dalam pipa kapiler atau katup ekspansi. Proses di sini berlangsung pada proses adiabatik, sehingga dapat dilihat di persamaan 2.7 berikut:

$$h_3 = h_4 \quad (\text{Stoecker; 1996:186}) \quad (2-7)$$

- Proses 4-1: Proses penyerapan kalor dan penguapan pada tekanan konstan (*isobarik*). Pada proses ini temperatur dan entalpi refrigeran naik dan refrigeran mengalami perubahan fase dari uap jenuh menjadi uap jenuh kering.

Unjuk kerja pada mesin pendingin meliputi:

a. Efek refrigerasi

Efek refrigerasi adalah banyaknya kalor yang diserap oleh evaporator setiap satuan massa refrigeran untuk menghasilkan efek pendinginan.

$$q = (h_1 - h_4) \quad (2-8)$$

b. Kerja kompresi

Kerja kompresi adalah banyaknya kalor yang dikompresikan kompresor setiap satuan massa refrigeran.

$$W = (h_2 - h_1) \quad (2-9)$$

c. Koefisien prestasi

Istilah prestasi di dalam siklus refrigerasi disebut dengan koefisien prestasi (KP) atau *COP* (*Coefficient Of Performance*), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$KP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (\text{Stoecker; 1996 :187}) \quad (2-10)$$

Dengan:

h_1 = entalpi keluar evaporator

h_2 = entalpi masuk kondensor

h_3 = entalpi keluar kondensor

h_4 = entalpi masuk evaporator

\dot{m}_{ref} = laju aliran massa refrigeran

Dalam mesin refrigerasi siklus kompresi uap ini terdapat empat komponen mesin utama yang merupakan penunjang bekerjanya sistem refrigerasi, yaitu:

1. Kompresor

Kompresor mempunyai klasifikasi yang bermacam-macam, akan tetapi pada umumnya dapat dibagi menjadi dua jenis utama yaitu :

a. Kompresor langkah positif, dimana gas diisap masuk ke dalam silindernya dan dikompresikan .

b. Kompresor dinamis, dimana gas yang dihisap masuk dipercepat oleh sebuah impeller yang kemudian mengubah energikinetik untuk menaikkan tekanan.

Fungsi kompresor antara lain :

a. Mensirkulasikan bahan pendingin (*refrigerant*).

b. Menaikkan tekanan agar bahan pendingin dapat berkondensasi pada kondisi ruangan.

- c. Mempertahankan tekanan yang konstan pada evaporator.
- d. Menghisap gas bertekanan dan bertemperatur rendah dari evaporator, kemudian menekan/memampatkan gas tersebut, sehingga menjadi gas yang bertekanan dan suhu tinggi, lalu dialirkan ke kondensor. Pada pengujian ini menggunakan AC dengan kompresor jenis hermatik, dimana pada kompresor hermatik, motor dan kompresor dimasukkan bersama dalam rumah kompresor. Rumah kompresor ini terbuat dari baja seperti terlihat pada gambar 2.5 dibawah ini:



Gambar 2.5 Kompresor jenis rotari

Sumber: http://www.mesmarket.com/main/samsung_rotary_kompresor.html

Efisiensi kompresor dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya kompresi teoritik dengan daya kompresi sebenarnya. Daya kompresi teoritik ialah selisih antara entalpi sisi keluar dan sisi masuk refrigeran dikali dengan laju aliran massa refrigeran, sedangkan daya aktual dapat dilihat pada mesin. Efisiensi kompresi pada umumnya mengalami penurunan dari keadaan idealnya. Hal ini dikarenakan adanya gesekan pada permukaan yang bersentuhan dengan bagian-bagian yang bergerak dan penurunan tekanan melalui katup-katupnya. Kerja kompresi dari kompresor (w) adalah kerja yang dilakukan kompresor untuk meningkatkan tekanan refrigeran dari tekanan evaporator (p_1) menuju tekanan kondensor (p_2). Nilainya sebesar selisih entalpi antara sisi keluar kompresor (h_2) dan sisi masuknya (h_1). Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan 2-11 berikut :

$$h_1 + q = h_2 + w \quad (\text{Stoecker; 1996:186})(2-11)$$

Karena proses berjalan secara adiabatik maka q bernilai nol sehingga persamaan 2-12 menjadi :

$$w = (h_2 - h_1) \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]} \quad (\text{Stoecker; 1994:186})(2.12)$$

dengan:

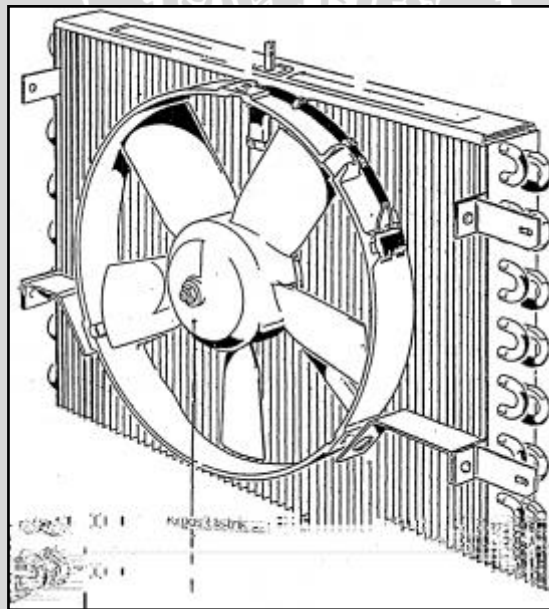
$$h_1 = \text{Entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap} \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$h_2 = \text{Entalpi refrigeran pada daerah panas lanjut} \quad \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

Dengan bertambahnya massa refrigeran yang masuk kedalam ruang silinder yang melalui katup isap menyebabkan semakin bertambahnya massa refrigeran dalam silinder. Akibatnya, tekanan untuk mengeluarkan massa refrigeran semakin besar. Hal ini menyebabkan daya kompresor yang dibutuhkan semakin besar. Untuk menghasilkan daya kompresor yang besar diperlukan torsi yang besar dan putaran lengan torak yang semakin besar.

2. Kondensor

Kondensor merupakan suatu komponen sistem refrigerasi yang dapat melepaskan kalor yang dikandung oleh refrigeran sehingga refrigeran yang mula-mula berbentuk uap akan menjadi cair. Kondensor ditunjukkan pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Kondensor

Sumber: <http://httpsekawan-servis-pendingin.blogspot.com>

Untuk meningkatkan jumlah kalor yang dilepas maka diperlukan bantuan hembusan udara dengan menggunakan kipas atau *blower*. Dalam kondensor dibutuhkan pelepasan kalor untuk mencairkan refrigeran yang bertekanan dan bertemperatur tinggi setelah keluar dari kompresor. Jumlah kalor yang dilepaskan

tiap detiknya oleh uap refrigeran ke udara yang dihembuskan melalui kondensor sama dengan selisih entalpi refrigeran pada sisi masuk dan pada sisi keluar kondensor dikali dengan laju aliran massanya. Pelepasan kalor dalam kilo joule per kilogram adalah perpindahan kalor dari refrigeran pada proses 2-3, sesuai persamaan berikut:

$$h_3 + q_c = h_2 + w \quad (\text{Stoecker; 1996:186})(2-13)$$

karena tidak dilakukan kerja maka:

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (\text{Stoecker; 1996:187}) (2-14)$$

dengan:

$$q_c = \text{Pelepasan kalor terjadi dari kondensor} \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

$$h_3 = \text{Entalpi refrigeran pada daerah saturasi cair} \quad \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

3. Evaporator

Evaporator merupakan komponen yang berfungsi menguapkan bahan pendingin atau refrigeran dimana terjadi penyerapan panas dari media yang didinginkan. Pada evaporator biasanya digunakan sirip-sirip untuk memudahkan terjadinya perpindahan panas dari refrigeran yang diuapkan dengan cara diturunkan tekanannya pada siklus sehingga terjadi penurunan suhu pada refrigeran tersebut. Bentuk dan konstruksi evaporator tidak berbeda dari kondensor, tapi fungsi kedua alat ini berlainan. Bentuk dan konstruksi evaporator dapat dilihat pada gambar 2.7 dibawah ini:



Gambar 2.7 Evaporator

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

Pada kondensor panas zat pendingin harus dikeluarkan agar terjadi perubahan bentuk zat pendingin dari gas ke cair. Prinsip ini berlaku sebaliknya pada evaporator.

Zat pendingin cair dari kondensor harus dirubah kembali menjadi gas dalam evaporator, dengan demikian evaporator harus menyerap panas. Agar penyerapan panas ini dapat berlangsung dengan sempurna, pipa-pipa evaporator juga diperluas permukaannya dengan memberi kisi-kisi (elemen) dan kipas listrik (*blower*), supaya udara dingin juga dapat dihembuskan ke dalam ruangan.

Pada rumah evaporator bagian bawah dibuat saluran atau pipa untuk keluarnya air yang mengumpul disekitar evaporator akibat udara yang lembab. Air ini juga akan membersihkan kotoran-kotoran yang menempel pada kisi-kisi evaporator, karena kotoran itu akan turun bersama air.

Pada evaporator besar nilai kalor yang diserap oleh refrigeran merupakan selisih entalpi refrigeran pada sisi keluar evaporator dan sisi masuk evaporator. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan aliran energi mantap, dimana energi kinetik, energi potensial dan kerja diabaikan sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut:

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (\text{Stoecker; 1996:187}) \quad (2-15)$$

dengan:

q_e = Penyerapan kalor oleh refrigeran dalam evaporator $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

h_1 = Entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

h_4 = Entalpi refrigeran pada daerah campuran $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

Di dalam evaporator perbedaan temperatur rata-rata digunakan untuk menghitung perpindahan kalor, dimana makin besar perbedaan temperatur rata-rata makin kecil ukuran permukaan luas perpindahan kalor. Namun dalam hal tersebut temperatur penguapan menjadi semakin rendah, sehingga kemampuan kompresor akan berkurang. Oleh karena itu perbedaan temperatur rata-rata ditetapkan dengan memperhatikan pertimbangan faktor penukar kalor. Pada evaporator terjadi dampak atau efek pendinginan yang apabila dikalikan dengan laju aliran masa refrigeran akan merupakan nilai dari kapasitas refrigerasi atau pendinginan untuk AC.

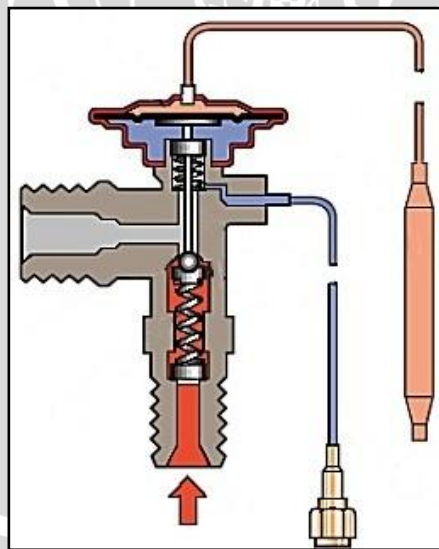
4. Alat Ekspansi

Alat ekspansi adalah alat yang digunakan untuk menurunkan tekanan refrigeran sehingga refrigeran cair berubah menjadi uap jenuh. Pipa kapiler dibuat dari tembaga dengan diameter lubang dalam yang sangat kecil. Panjang dan lubang pipa kapiler dapat mengontrol jumlah bahan pendingin yang masuk evaporator. Karena tekanan dan temperatur cairan dari kondensor terlalu tinggi untuk

terjadinyapenguapan dalam kondisi ruangan, maka digunakan pipa kapiler (*liquidcontrol device*) yang bekerja sebagai suatu tahanan aliran fluida (*bahanpendingin cair*). Dengan adanya tahanan tersebut, tekanan fluida akan turun dan sebagian kecil cairan pendingin menguap (*flash gas*). Penguapan ini akan menyerap kalor dari cairan pendingin, sehingga temperatur cairan berkurang sampai temperatur jenuh pada tekanan yang berkurang tersebut. Pipa kapiler (*capillary tube*) berguna untuk :

- Menurunkan tekanan bahan pendingin cair yang mengalir didalamnya.
- Mengatur jumlah tekanan bahan pendingin cair yang mengalir melaluinya.
- Membangkitkan tekanan bahan pendingin dikondensor .

Alat ekspansi yang sering digunakan adalah katup ekspansi termostatik dan pipa kapiler. Katup ekspansi termostatik merupakan katup ekspansi berkendali panas lanjut yang berfungsi agar refrigeran yang masuk evaporator sesuai dengan beban pendingin yang harus dilayani. Pipa kapiler berfungsi sebagai alat ekspansi dengan memanfaatkan tahanan gesek refrigeran terhadap pipa, sehingga tekanannya turun. Pipa kapiler biasanya mempunyai diameter yang kecil (0,031 – 0,054 inch) dengan panjang 5 – 20 ft. Pipa kapiler digunakan karena kemudahan dan murah. Alat ekspansi ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.8 Alat ekspansi

Sumber: <http://bluekuthuq.blogspot.com>

2.7 Refrigeran

Refrigeran adalah fluida kerja dari mesin pendingin yang disirkulasikan untuk memindahkan panas dari media yang didinginkan kepada media penyerap panas. Untuk

mesin pendingin siklus kompresi uap, refrigeran menyerap panas didalam evaporator pada temperatur dan tekanan rendah serta melepaskan panas pada kondensor pada tekanan dan temperatur tinggi.

2.7.1 Klasifikasi refrigeran

Secara umum refrigeran dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. Refrigeran primer

Merupakan fluida kerja yang utama, yaitu media pemindah panas yang disirkulasikan secara langsung melalui komponen-komponen utama mesin pendingin.

2. Refrigeran sekunder

Merupakan fluida kerja perantara, yaitu media pemindah panas dari refrigeran primer ke media lain atau lingkungan. Refrigeran sekunder yang umum digunakan adalah air dan brine.

Sedangkan refrigeran primer yang biasa digunakan dapat digolongkan menjadi:

a. Refrigeran halokarbon

Refrigeran halokarbon adalah refrigeran yang termasuk dalam kelompok yang mempunyai satu atau lebih dari salah satu atom halogen, yaitu: klorin, flourin, dan bromin. Sistem penomoran dalam kelompok halokarbon mengikuti pola berikut:

- Angka pertama dari kanan adalah jumlah atom flourin dalam ikatan.
- Angka kedua dari kanan adalah jumlah atom hidrogen ditambah angka satu.
- Angka ketiga dari kanan adalah jumlah atom karbon dikurangi satu, bila angka ketiga berharga nol diperbolehkan.

Tabel 2.1 Beberapa refrigeran halokarbon

Ketentuan penomoran	Nama kimia	Rumus kimia
11	<i>Trikloromonofluorometana</i>	CCl_3F
12	<i>Diklorodifluorometana</i>	CCl_2F_2
13	<i>Monoklorotrifluorometana</i>	CClF_3
22	<i>Monoklorodifluorometana</i>	CHClF_2
40	<i>Metil klorida</i>	CH_3Cl
113	<i>Triklorotrifluoroetana</i>	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$
114	<i>Diklorotetrafluoroetana</i>	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$

Sumber: Stoecker dan Jones (1996: 279)

Refrigeran halokarbon ini dalam perdagangan biasa disebut dengan nama freon, genetron, isotron dan lain-lain yang merupakan merk dari perusahaan yang membuatnya.

b. Refrigeran anorganik

Senyawa anorganik banyak dipakai sebagai refrigeran sebelum ditemukannya refrigeran halokarbon. Namun sampai saat ini masih dipergunakan meskipun dalam jumlah yang terbatas bila dibandingkan dengan pemakaian jenis freon.

Sistem penomeran refrigeran dalam kelompok ini mengikuti pola:

- Angka pertama dari kiri merupakan kode dari senyawa anorganik yaitu angka 7.
- Dua angka terakhir dari kiri menyatakan berat molekulnya.

Tabel 2.2 Beberapa refrigeran anorganik

Ketentuan penomeran	Nama kimia	Rumus kimia
717	Amonia	NH ₃
718	Air	H ₂ O
729	Udara	
744	Karbon dioksida	CO ₂
764	Sulfur dioksida	SO ₂

Sumber: Stoecker dan Jones (1996: 280)

c. Refrigeran hidrokarbon

Banyak senyawa hidrokarbon yang cocok digunakan sebagai refrigeran. Pemakaian refrigeran hidrokarbon ini yang paling banyak adalah untuk industri perminyakan dan industri kimia. Sistem penomeran kelompok refrigeran ini mengikuti pola yang sama pada kelompok refrigeran halokarbon.

Tabel 2.3 Beberapa refrigeran hidrokarbon

Ketentuan penomeran	Nama kimia	Rumus kimia
50	Metana	CH ₄
170	Etana	C ₂ H ₆
290	Propana	C ₃ H ₈

Sumber: Stoecker dan Jones (1996: 280)

d. Azeotop

Azeotrop adalah campuran dari beberapa refrigeran yang tidak dapat dipisahkan secara destilasi dan memiliki sifat yang berbeda dengan senyawa pembentuknya. Azeotrop menguap dan mengembun sebagai senyawa tunggal. Azeotrop yang banyak dikenal adalah refrigeran 502, yang merupakan campuran 48,8 % R-22 dan 51,2 % R-115.

2.7.2 Dasar Pemilihan Refrigeran

Didalam menentukan refrigeran yang akan digunakan, maka harus dilakukan pertimbangan terhadap beberapa sifat refrigeran, yaitu:

1. Tekanan penguapan harus cukup tinggi

Sebaiknya refrigeran menguap pada tekanan sedikit lebih tinggi dari tekanan atmosfer. Dengan demikian dapat dicegah terjadinya kebocoran udara luar masuk sistem refrigeran karena kemungkinan adanya vakum pada sisi masuk kompresor (bagian tekanan rendah).

2. Tekanan pengembunan yang tidak terlampau tinggi

Apabila tekanan pengembunannya rendah, maka perbandingan kompresinya menjadi lebih rendah sehingga penurunan prestasi kompresor dapat dihindarkan. Selain itu dengan tekanan kerja yang lebih rendah, mesin dapat bekerja lebih aman karena kemungkinan terjadinya kebocoran, ledakan, dan sebagainya menjadi lebih kecil.

3. Kalor laten penguapan harus tinggi

Refrigeran yang memiliki kalor laten penguapan yang tinggi lebih menguntungkan karena untuk kapasitas refrigerasi yang sama, jumlah refrigeran yang bersirkulasi menjadi lebih kecil.

Kalor laten penguapan adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguapkan satu kilogram cairan jenuh pada temperatur atau tekanan tertentu.

4. Konduktivitas termal yang tinggi

Konduktivitas termal sangat penting untuk menentukan karakteristik perpindahan panas refrigeran.

5. Viskositas yang rendah dalam fase cair maupun fase gas

Dengan turunnya tahanan aliran refrigeran dalam pipa, kerugian tekanannya akan berkurang.

6. Refrigeran hendaknya tidak bereaksi dengan material yang dipakai

7. Refrigeran tidak boleh beracun dan berbau merangsang

8. Refrigeran tidak boleh mudah terbakar dan meledak
9. Harganya tidak mahal dan mudah diperoleh

2.7.3 *Liquefied Petroleum Gas (LPG)*

LPG adalah salah satu jenis refrigeran hidrokarbon yang merupakan campuran dari propana dan butana. LPG yang dijual di Indonesia memiliki konsentrasi 50% propana dan 50% butana. Sebagai refrigeran hidrokarbon maka LPG tidak mempunyai *Ozone Depleting Substance (ODS)* yaitu zat yang dapat menyebabkan kerusakan ozon. Dan juga tidak mempunyai potensi sebagai zat yang dapat menyebabkan efek pemanasan global karena tidak memiliki *Global Warming Potential (GWP)*. Yang perlu diperhatikan di sini adalah LPG mempunyai kekurangan apabila digunakan sebagai refrigeran, yaitu LPG mudah terbakar sehingga berbahaya jika digunakan sebagai refrigeran. Penggunaan hidrokarbon termasuk LPG sebagai refrigeran harus memperhatikan keamanan karena sifatnya yang dapat terbakar (*flammable*). Hammad (1999) membandingkan sifat termodinamika dari R12 dan hidrokarbon ditunjukkan bahwa temperatur kritis dari propane adalah 97°C, Butane 152°C, dan Isobutane 135°C.

2.7.4 *Karbondioksida (CO₂)*

Karbondioksida atau nama kimianya CO₂ merupakan salah satu jenis refrigeran anorganik. Salah satu alasan kenapa CO₂ sekarang jarang digunakan yaitu karena CO₂ membutuhkan tekanan kompresor yang tinggi yang mengakibatkan daya yang dibutuhkan untuk mengalirkan CO₂ dalam sistem refrigerasi sangat besar. Tetapi CO₂ sama dengan LPG yang tidak mempunyai *Ozone Depleting Substance (ODS)* dan *Global Warming Potential (GWP)*.

2.8 *Campuran Gas*

Untuk mengetahui sifat-sifat suatu campuran gas, kita perlu mengetahui komposisi dari campuran dan sifat-sifat komponen penyusunnya. Ada dua cara dalam menyatakan komposisi campuran: yang pertama adalah berdasarkan jumlah mol tiap komponen (*molar analysis*), yang kedua berdasarkan jumlah massa tiap komponen (*gravimetric analysis*).

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \text{ dan } N_m = \sum_{i=1}^k N_i$$

Rasio antara massa sebuah komponen dengan massa campuran disebut dengan massa (mf_i) dan rasio antara jumlah mol sebuah komponen dengan mol campuran disebut fraksi mol (y_i), sebagai catatan jumlah total fraksi mol atau fraksi massa adalah 1.

$$mf_i = \frac{m_i}{m_m} \text{ dan } y_i = \frac{N_i}{N_m}$$

Untuk mendapatkan rata-rata berat molekul campuran (massa molar) M_m :

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i = \sum_{i=1}^k N_i M_i = N_m M_m \quad \text{sehingga}$$

$$M_m = \frac{m_m}{N_m} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_m} M_i = \sum_{i=1}^k y_i M_i \quad (\text{kg/kmol})$$

Rata-rata nilai konstanta gas campuran dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$R_m = \frac{R_u}{M_m} \quad (\text{kJ/kg.K})$$

R_m bisa juga dinyatakan dengan :

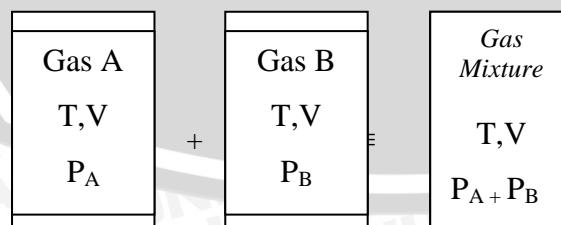
$$R_m = \sum_{i=1}^k mf_i R_i$$

Fraksi mol dapat dirubah ke fraksi massa atau sebaliknya, dengan hubungan

$$mf_m = \frac{y_i M_i}{\sum_{i=1}^k y_i M_i} \quad \text{dan} \quad y_i = \frac{mf_i / M_i}{\sum_{i=1}^k mf_i / M_i}$$

1. Gas ideal

Dalton's law of additive pressure states that's the volume of a gas mixture is equal to the sum of the each gas would exert if it existed alone at the mixture temperature and volume.



Hukum Dalton dapat dituliskan :

$$P_m = \sum_{i=1}^k P_i(T_m, V_m)$$

Dengan P_i = tekanan tiap komponen

P_m = tekanan total campuran gas ideal

Untuk gas ideal :

$$\frac{P_i(T_m, V_m)}{P_m} = \frac{N_i R_u T_m / V_m}{N_m R_u T_m / V_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i$$

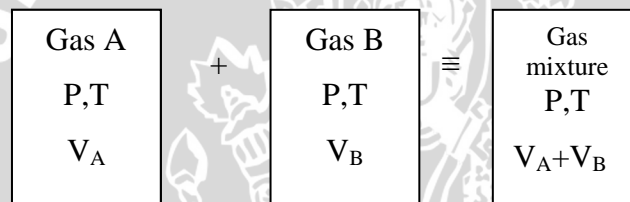
Untuk gas ideal, tekanan parsial dan tekanan komponen adalah sama, dan sama dengan fraksi mol

$$\frac{P_i}{P_m} = \frac{V_i}{V_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i \quad (P_i = y_i P_m; V_i = y_i V_m; N_i = y_i N_m)$$

$y_i P_m$ = tekanan parsial

$y_i V_m$ = volume parsial

Amagat's Law of additive volumes states that the volume of a gas mixture is equal to the sum of the volumes each gas would if it existed alone at the mixture temperature and pressure.



Hukum Amagat dapat dituliskan:

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i(T_m, P_m)$$

Dengan V_i = volume tiap komponen

V_m = volume total campuran gas ideal

Untuk gas ideal :

$$V_i = \frac{N_i R_u T_m}{P_m} \quad \text{dan} \quad \sum_{i=1}^k v f_i = 1$$

Untuk gas ideal, fraksi volume sama dengan fraksi mol.

$$v f_i = \frac{V_i}{V_m} = \frac{N_i}{N_m} = y_i$$

2. Gas Riil

Hukum Dalton dan Amagat dapat juga digunakan untuk gas riil. Dalam gas riil, komponen tekanan dan volume harus dievaluasi dari hubungan yang memperhitungkan deviasi atau simpangan perilaku dari gas ideal. Salah satu caranya adalah menggunakan persamaan-persamaan keadaan selain persamaan keadaan gas

ideal (seperti van der Wall, Beattie-Bridgemen, dll), atau dengan menggunakan kompresibilitas faktor;

$$PV = ZNR_u T$$

Kompresibilitas faktor campuran gas Z_m dapat dinyatakan dengan kompresibilitas faktor komponen Z_i

$$Z_m = \sum_{i=1}^k y_i Z_i$$

Nilai Z_i ditentukan baik pada T_m dan V_m (Hk. Dalton) ataupun pada T_m dan P_m (Hk. Amagat). Pendekatan kompresibilitas faktor umumnya lebih akurat ketika dievaluasi dengan Hk. Amagat. Pendekatan lain untuk memprediksi perilaku P-v-T suatu campuran gas sebagai zat murni tersamar. Metode yang disarankan oleh aturan W.B Kay dan Kay adalah penggunaan tekanan kritis tersamar $P'_{cr,m}$ dan temperatur kritis tersamar $T'_{cr,m}$

$$P'_{cr,m} = \sum_{i=1}^k y_i P'_{cr,i} \quad \text{dan} \quad T'_{cr,m} = \sum_{i=1}^k y_i T'_{cr,i}$$

Nilai Z_m ditentukan dengan menggunakan sifat (*property*) *pseudocritical*

Cara lain menganalisa campuran gas sebagai zat tersamar adalah menggunakan persamaan keadaan yang lebih akurat seperti van der Walls, Beattie-Bridgeman, dll. Konstanta dapat dievaluasi dengan contoh seperti dibawah ini

$$a_m = \left(\sum_{i=1}^k y_i a_i^{1/2} \right)^2 \quad \text{dan} \quad b_m = \sum_{i=1}^k y_i b_i$$

3. Sifat dari Campuran Gas

Sifat ekstensif dari campuran gas, secara umum dapat dihitung dengan menjumlahkan kontribusi dari masing-masing komponen. Misalkan, 2 kmol gas A dicampur dengan 3 kmol gas B maka jumlah mol campuran gas tersebut adalah 5 kmol. Akan tetapi evaluasi untuk sifat intensif dari campuran gas melibatkan rata-rata dalam fraksi massa atau fraksi mol. Sebagai contoh 2 kmol gas A yang memiliki energi dalam spesifik molar ($\bar{u}_A = 500$ kJ/mol) dicampur dengan 3 kmol gas B yang memiliki energi dalam spesifik ($\bar{u}_B = 600$ kJ/mol), maka nilai energi dalam spesifik molar campuran adalah ($\bar{u}_m = 560$ kJ/mol)

$$U_m = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k m_i u_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{u}_i \quad (\text{kJ})$$

$$H_m = \sum_{i=1}^k H_i = \sum_{i=1}^k m_i h_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{h}_i \quad (\text{kJ})$$

$$S_m = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k m_i s_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{s}_i \quad (\text{kJ/K})$$

Untuk nilai spesifiknya

$$u_m = \sum_{i=1}^k m f_i u_i \quad \text{dan} \quad \bar{u}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{u}_i$$

$$h_m = \sum_{i=1}^k m f_i h_i \quad \text{dan} \quad \bar{h}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{h}_i$$

$$s_m = \sum_{i=1}^k m f_i s_i \quad \text{dan} \quad \bar{s}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{s}_i$$

Panas spesifik campuran dapat dinyatakan dalam

$$C_{v,m} = \sum_{i=1}^k m f_i C_{v,i} \quad \text{dan} \quad \bar{C}_{v,m} = \sum_{i=1}^k y_i \bar{C}_{v,i}$$

$$C_{p,m} = \sum_{i=1}^k m f_i C_{p,i} \quad \text{dan} \quad \bar{C}_{p,m} = \sum_{i=1}^k y_i \bar{C}_{p,i}$$

Hubungan-hubungan tersebut diatas dapat diaplikasikan baik untuk gas ideal dan gas riil. Perubahan sifat-sifat termodinamika dari komponen-komponen dapat ditentukan dengan persamaan-persamaan gas ideal dan gas riil yang telah dibahas sebelumnya.

Suatu campuran gas sering pada keadaan temperatur yang relatif tinggi dan tekanan yang relatif rendah disbanding dengan titik kritisnya. Pada tekanan seperti ini, campuran gas dan juga komponen-komponennya dapat dianggap sebagai gas ideal. Dengan pendekatan ini, sifat-sifat gas tidak dipengaruhi oleh sifat-sifat lainnya, dan tiap-tiap komponen gas dalam campuran berperilaku seakan berdiri sendiri pada temperatur campuran T_m dan volume campuran V_m . Prinsip ini yang disebut dengan hukum Gibbs-Dalton. Campuran gas yang berperilaku seperti gas ideal juga memiliki nilai h , u , cv dan cp yang hanya tergantung kepada temperatur dan tidak tergantung pada tekanan dan volume campuran. Tekanan parsial dapat dinyatakan dalam hubungan sederhana $P_i = y_i \cdot P_m$, dimana P_m merupakan tekanan campuran.

$$k_m = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}} = \frac{\bar{C}_{p,m}}{\bar{C}_{v,m}}$$

Evaluasi untuk Δu dan Δh dapat ditentukan dengan mudah berdasarkan data temperatur yang diketahui pada awal dan akhir proses. Akan tetapi, untuk evaluasi Δs

perlu dilakukan lebih cermat karena entropi merupakan fungsi temperatur dan tekanan atau volume. Perubahan entropi campuran gas akibat proses dapat dinyatakan

$$\Delta s_i = C_{p,i} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_i \ln\left(\frac{P_{i,2}}{P_{i,1}}\right)$$

Perubahan entropi campuran gas per unit massa

$$\begin{aligned} \Delta s_m &= \frac{\Delta s_m}{m_m} = \sum_{i=1}^2 mf_i \Delta s_i \\ &= \sum_{i=1}^2 mf_i \left(C_{p,i} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_i \ln\left(\frac{P_{i,2}}{P_{i,1}}\right) \right) \end{aligned}$$

Perubahan entropi per unit mol

$$\begin{aligned} \bar{\Delta s}_m &= \frac{\Delta s_m}{m_m} = \sum_{i=1}^2 mf_i \bar{\Delta s}_i \\ &= \sum_{i=1}^2 mf_i \left(\bar{C}_{p,i} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R_u \ln\left(\frac{P_{i,2}}{P_{i,1}}\right) \right) \end{aligned}$$

Dengan

$$P_{i,1} = y_{i,1} P_{m,1}$$

$$P_{i,2} = y_{i,2} P_{m,2}$$

Ketika campuran gas tidak berlaku seperti gas ideal, analisisnya menjadi lebih kompleks, sebab sifat-sifat termodinamika dari gas riil seperti u , h , cp dan cv tidak hanya merupakan fungsi dari temperatur tetapi juga fungsi dari tekanan. Sehingga dalam analisisnya perlu memperhitungkan pengaruh perilaku yang tidak ideal pada campuran gas, salah satu cara adalah menggunakan faktor kompresibilitas.

2.9 Hipotesa

Untuk mengetahui campuran dengan koefisien prestasi tertinggi, maka perlu bervariasi konsentrasi campuran LPG dan CO₂. Semakin tinggi konsentrasi CO₂ maka koefisien prestasinya akan menurun, begitu juga sebaliknya jika konsentrasi CO₂ rendah maka koefisien prestasi dari mesin pendingin tersebut akan meningkat.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk memperoleh data sebab akibat melalui eksperimen guna mendapatkan data empiris. Dalam hal ini obyek penelitian yang diamati adalah pengaruh variasi komposisi CO₂ terhadap unjuk kerja AC mobil Kijang Toyota.

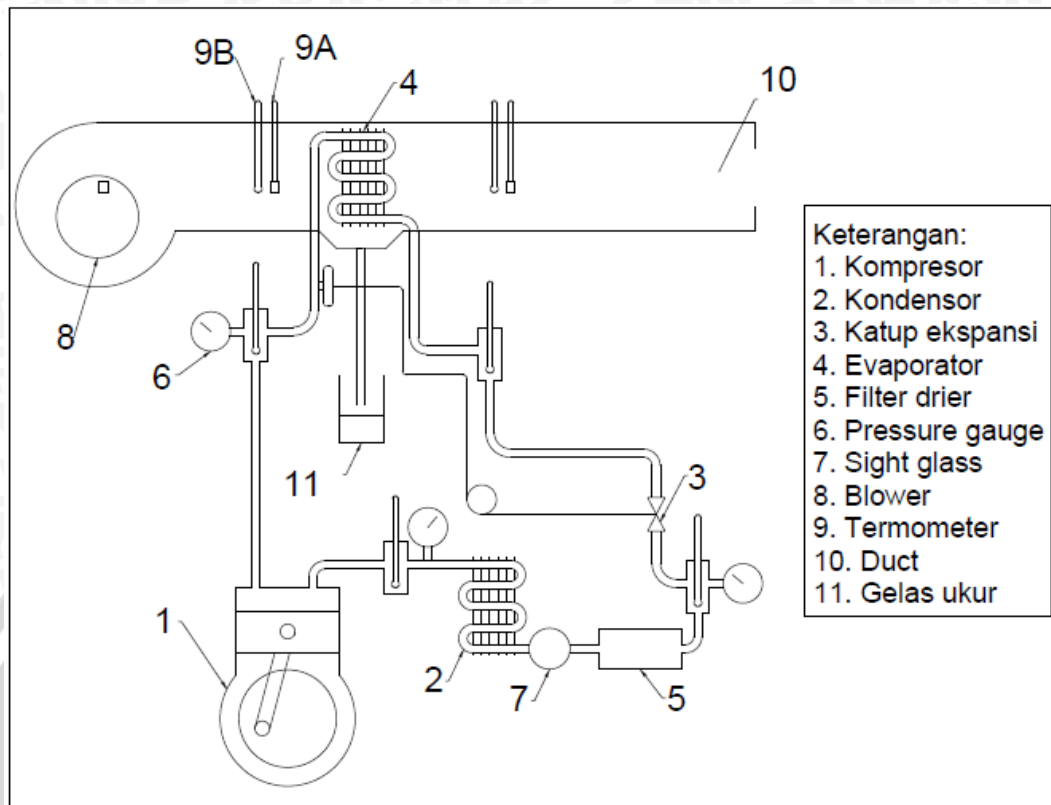
3.2 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Variabel bebas (*independent variabel*) adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya diubah-ubah dengan metode tertentu untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari obyek penelitian sehingga diperoleh hubungan antara keduanya. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi komposisi CO₂ dan LPG yang dilakukan pencampuran secara manual. Adapun variasi campuran CO₂ adalah 0%, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % fraksi massa.
2. Variabel terikat (*dependent variabel*) adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah *COP (coefficient of performance)* AC mobil.
3. Variabel terkontrol (*control variable*) adalah variabel yang telah ditentukan nilainya sebelum penelitian dan variabel yang nilainya dikonstantakan. Dalam penelitian ini yang bernilai konstan adalah putaran *blower*.



3.3. Gambar Instalasi Penelitian



Gambar 3.1 Skema instalasi penelitian

Gambar 3.1 merupakan gambar skema instalasi penelitian kami yang terdiri dari empat komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator. Refrigeran yang digunakan adalah LPG-CO₂ dengan massa maksimum 300 gram pada setiap variasi isi refrigeran. Pada alat penelitian ini terdapat beberapa alat ukur yaitu *pressure gauge* dan termometer berfungsi untuk mengukur tekanan dan temperatur yang diletakkan pada saluran keluar evaporator, saluran keluar kompresor, saluran keluar kondensor dan saluran keluar katup ekspansi. Selain itu termometer juga diletakkan di sekat (*duct*) sebelum masuk evaporator dan setelah keluar evaporator. Sekat (*duct*) yang dimaksud adalah ruangan yang akan dikondisikan dan terdapat *blower* untuk menghembuskan udara melewati *duct*. Diantara kompresor dan katup ekspansi diletakkan alat *filter drier* yang berfungsi sebagai penyaring kotoran yang terbawa refrigeran. Sedangkan gelas ukur digunakan untuk menampung air kondesat yang keluar dari evaporator hasil proses kondensasi.

3.4. Alat-alat yang digunakan :

1. 1 set AC mobil merk Kijang HFC-134a

a. Kompresor AC

Kompresor digunakan untuk mengkompresikan refrigeran, seperti pada gambar 3.2 dibawah ini :

PANASONIC 2K 32S 225AUB

1120 WATT; 220 VOLT; 50 Hz.



Gambar 3.2 Kompresor

b. Kondensor.

Kondesor berfungsi untuk melepas kalor refrigeran kelingkuangan. Dimensi kondensor adalah 60 cm x 30 cm x 3 cm seperti pada gambar 3.3 dibawah ini :



Gambar 3.3 Kondensor

c. Katup Ekspansi.

Katup ekspansi digunakan untuk menurunkan tekanan dari kompresor hingga mencapai tekanan evaporator. Katup ekspansi yang digunakan adalah katup ekspansi otomatis refrigeran R22 seperti pada gambar 3.4 dibawah ini :



Gambar 3.4 Katup ekspansi

d. Evaporator

Evaporator berfungsi untuk menyerap panas atau untuk proses evaporasi. Dimensinya adalah 41 cm x 10 cm x 12 cm seperti pada gambar 3.5 dibawah ini :



Gambar 3.5 Evaporator

e. *Filter Drier*

Digunakan untuk menyaring kotoran halus agar tidak menyumbat katup ekspansi seperti pada gambar 3.6 dibawah ini :



Gambar 3.6 *Filter drier*

f. *Blower*

Digunakan untuk menghembuskan udara didalam *duct*. Kecepatan putaran *blower* maksimal 3000 *rpm* dan dimensinya adalah 32 cm x 14 cm x 16 cm seperti pada gambar 3.7 dibawah ini :



Gambar 3.7 *Blower*

2. Ruang Penyekat (*duct*)

Agar waktu yang dibutuhkan untuk pendingin ruangan lebih cepat maka perlunya ruangan terbatas. Ruang dibuat dari *acrylic* tebal 5cm. Dimensi *duct* adalah 80cm x 34cm x 12cm seperti pada gambar 3.8 dibawah ini :



Gambar 3.8 Ruang penyekat

4. Pompa Vakum Refrigeran

Berfungsi untuk mengosongkan kompresor dari refrigeran seperti pada gambar 3.9 dibawah ini :

Tipe : VE115N

Voltage : 230V-/50-60 Hz

Motor : ¼ HP

Dimensi : 290 x 124 x 224 mm



Gambar 3.9 Pompa vakum refrigeran

5. Manifold

Berfungsi untuk mengetahui tekanan rendah dan tinggi dalam pengisian refrigeran seperti pada gambar 3.10 dibawah ini :



Gambar 3. 10 Manifold

6. Tabung LPG 12 kg



Gambar 3.11 LPG 12 kg

7. Timbangan elektrik

Type : 9010A Simline Electronic Scale
Range : 0,000 kg to 55,000 kg
Accuracy : +/- 0,5% of reading +/- 1 digit
Weight : 2,79 kg

Dimension : 38,7 cm x 26,7cm x 6,35 cm



Gambar 3.12 Timbangan elektrik

8. Tabung gas *carbondioxide* (CO₂)



Gambar 3.13 Tabung gas CO₂

9. *Regulator high pressure*



Gambar 3.14 *Regulator high pressure*

10. Alat Ukur sebagai berikut :

- a. Pengukur tekanan (*pressure gauge*)



Untuk mengukur tekanan refrigeran pada instalasi AC mobil seperti pada gambar 3.15 dibawah ini :



Gambar 3.15 Pressure gauge

b. Termometer

Termometer digunakan untuk mengukur suhu pada ruang laboratorium, suhu refrigeran pada operasi mesin AC seperti pada gambar 3.16 :



Gambar 3.16 Termometer

3.5 Tempat Penelitian

Pengambilan data dilakukan di Laboratorium Mesin Pendingin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

3.6 Metode Pengambilan Data

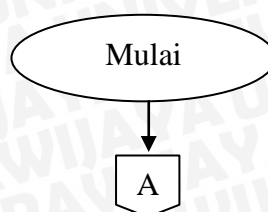
Langkah-langkah yang diambil dalam penelitian ini adalah :

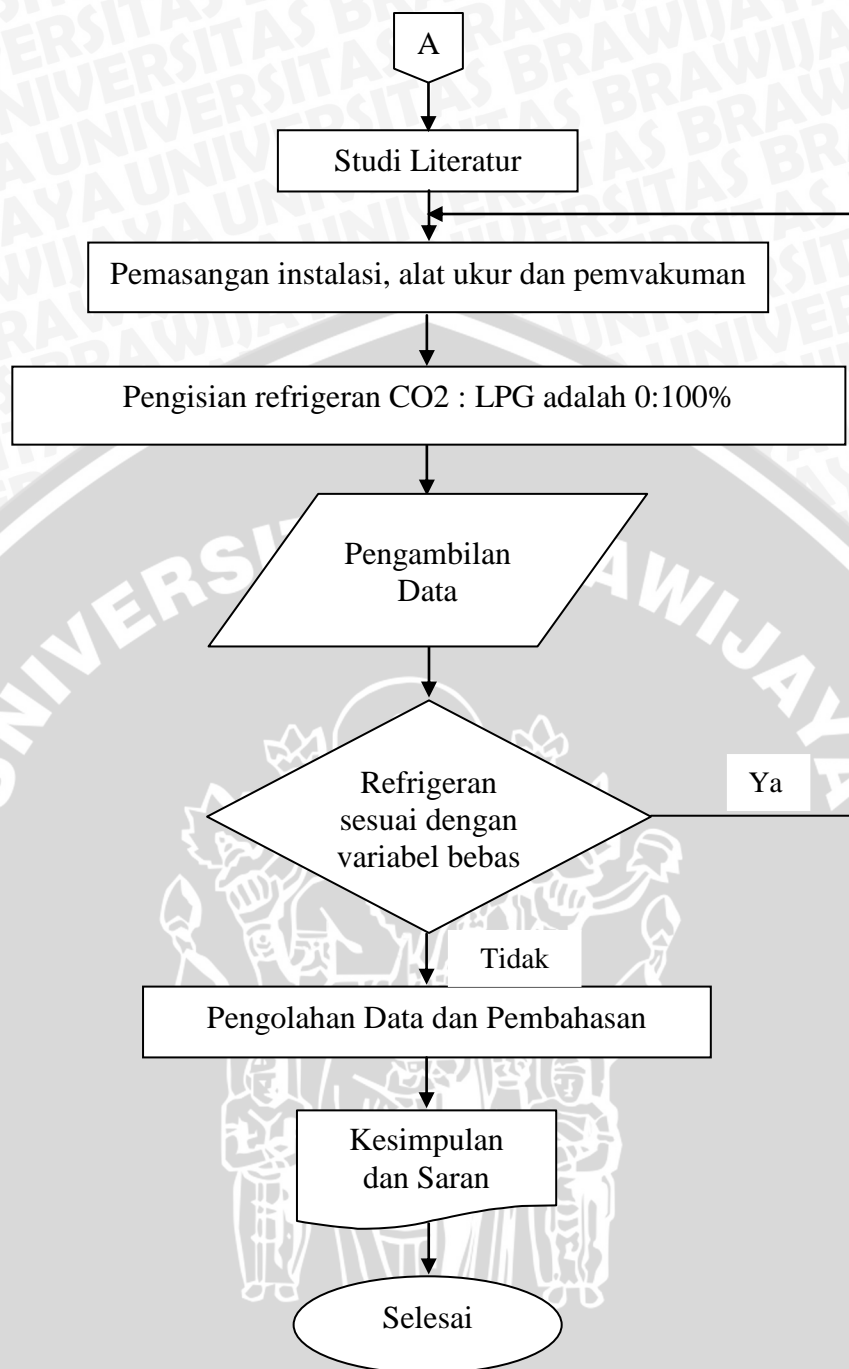
1. 1 set AC mobil merk Kijang HFC-134a, alat pendukung seperti ruang penyekat , motor listrik, mesin vakum refrigeran, refrigeran dan alat ukur yang telah dikalibrasi, dirakit seperti diagram gambar instalasi penelitian.
2. Pevakuman pada instalasi *air conditioner* dengan memasang selang manifold berwarna kuning pada mesin vakum dan selang manifold berwarna biru pada *air conditioner*. Katup manifold berwarna biru dibuka, kemudian mesin vakum dinyalakan sampai tekanan pada manifold -30 psi, tutup katup kembali.

3. Pengisian refrigeran dengan memindahkan selang manifold berwarna kuning ke tabung LPG, buka katup manifold berwarna biru sampai tidak ada suara gas yang bersirkulasi, kemudian tutup katup manifold berwarna biru. Menghidupkan mesin *air conditioner*, isi gas LPG sampai massa tertentu, kemudian katup manifold berwarna biru ditutup. Mengisi CO₂ dengan memindahkan selang berwarna kuning ke tabung CO₂, buka katup manifold berwarna biru sampai massa tertentu kemudian tutup kembali.
4. Pada saat memindahkan selang berwarna kuning, udara masuk ke dalam selang warna kuning. Untuk menghilangkan udara pada selang berwarna kuning, buka manifold berwarna merah sampai gas keluar dari selang berwarna merah kemudian tutup kembali.
5. Menghidupkan mesin kompresor, *fan* dan *blower*. Sampai terjadinya sirkulasi dengan aliran *steady state* yang ditandai dengan menetesnya air kondensat.
6. Data-data yang dicatat yaitu suhu masuk kondensor (T₂), suhu keluar kondensor (T₃), suhu masuk evaporator (T₄), suhu keluar evaporator (T₁), tekanan keluar kondensor (P₃), tekanan keluar evaporator (P₁). Untuk membuat variasi konsentrasi refrigeran campuran CO₂-LPG dilakukan dengan melakukan beberapa perubahan konsentrasi CO₂. Variasi konsentrasi refrigeran 0% – 20 % dan pengambilan data dilakukan selama 30 menit tiap variasi.
7. Pengambilan data berikutnya kembali lagi seperti proses no.2 dengan variasi konsentrasi CO₂ yang berbeda yaitu 5%, 10 %, 15 % dan 20 %.
8. Hasil pengolahan data ditampilkan dalam grafik
9. Menarik kesimpulan

3.7 Diagram Alir Proses Penelitian

Diagram alir penelitian dapat dilihat dari gambar 3.17 dibawah ini :





Gambar 3.17 Diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Data

4.1.1 Data hasil penelitian

Data-data diambil dengan melakukan variasi konsentrasi campuran LPG-CO₂. Adapun besarnya yaitu : 100:0; 95:5; 90:10; 85:15; 80:20% dan data penelitian yang diperoleh sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data hasil pengujian

waktu	variasi CO ₂	T1	T2	T3	T4	P1	P3
(menit)	(%)	°C				kPa	
10	0	6.4	49	34.5	4.5	250	700
	5	7.9	59.5	34.3	5.2	470	1300
	10	8.2	61.5	35.8	5.3	480	1450
	15	8.3	68.2	35.5	5.6	540	1550
	20	8.5	71.2	33.5	5.7	550	1700
20	0	6.4	49	34.5	4.5	250	700
	5	7.9	59.3	34.5	5.2	470	1300
	10	8.2	62.4	35.4	5.3	480	1450
	15	8.3	67.6	35.5	5.6	520	1550
	20	8.5	70.9	33.4	5.7	550	1700
30	0	6.4	49	34.5	4.5	250	700
	5	7.9	59.7	34.8	5.2	470	1300
	10	8.2	61.8	35.2	5.3	480	1450
	15	8.3	68.6	35.2	5.6	520	1550
	20	8.5	71.2	33.4	5.7	550	1700

Dimana :

% CO₂ = prosentase campuran CO₂ dalam LPG

T₁ = temperatur refrigeran setelah dari evaporator (°C)

T₂ = temperatur refrigeran setelah dari kompresor (°C)

T₃ = temperatur refrigeran setelah dari kondensor (°C)

T₄ = temperatur refrigeran setelah dari katup ekspansi (°C)

P₁ = tekanan refrigeran setelah dari evaporator (kPa)

P₃ = tekanan refrigeran setelah dari kondensor (kPa)

4.1.2 Perhitungan data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai besaran-besaran yang diperlukan untuk menentukan unjuk kerja dari mesin pendingin. Disini akan ditunjukkan perhitungan data dari hasil eksperimen dengan variasi konsentrasi CO₂ 5%.

- Temperatur refrigeran setelah dari evaporator, $T_1 = 7,9 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Temperatur refrigeran setelah dari kompresor, $T_2 = 59,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Temperatur refrigeran setelah dari kondensor, $T_3 = 34,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Temperatur refrigeran setelah dari katup ekspansi, $T_4 = 5,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Tekanan refrigeran setelah dari evaporator, $P_1 = 470 \text{ kPa}$
- Tekanan refrigeran setelah dari kondensor, $P_3 = 1300 \text{ kPa}$
- Tekanan atmosfer, $P_o = 723 \text{ mmHg}$

Proses perhitungan :

- Tekanan atmosfer (P_o)

$$P_o = \frac{723}{760} \times 101,325$$

$$P_o = 96,392 \text{ (kPa)}$$

- Tekanan absolute (P_{abs})

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_o$$

$$P_{abs} = 470 + 96,392$$

$$= 566,392 \text{ (kPa)}$$

Tabel 4.2 Tekanan *absolute* campuran gas

campuran % CO ₂	MOL			P _{tot}		P _{abs}	
	CO ₂	Propan	Butan	P1	P3	P1	P3
0	0	3,409	2,586	250	700	346,392	796,392
5	0,34	3,238	2,456	470	1300	566,392	1396,392
10	0,681	3,068	2,327	480	1450	576,392	1546,392
15	1,022	2,897	2,198	540	1550	636,392	1646,392
20	1,363	2,727	2,068	550	1700	646,392	1796,392

- Tekanan parsial

P(1)

$$P_{CO_2} = \frac{\text{molCO}_2}{\text{jumlahmol}} \times P_{total}$$

$$= \frac{0,34}{(0,34 + 3,238 + 2,456)} \times 566,392$$

P(3)

$$P_{CO_2} = \frac{\text{molCO}_2}{\text{jumlahmol}} \times P_{total}$$

$$= \frac{0,34}{(0,34 + 3,238 + 2,456)} \times 1396,392$$

$$= 31,915 \text{ (kPa)}$$

$$P_{\text{propan}} = \frac{\text{molpropan}}{\text{jumlahmol}} \times P_{\text{total}}$$

$$= \frac{3,238}{(0.34 + 3,238 + 2,456)} \times 566,392$$

$$= 303,941 \text{ (kPa)}$$

$$P_{\text{butan}} = \frac{\text{molbutan}}{\text{jumlahmol}} \times P_{\text{total}}$$

$$= \frac{2,456}{(0.34 + 3,238 + 2,456)} \times 566,392$$

$$= 230,537 \text{ (kPa)}$$

$$= 78,683 \text{ (kPa)}$$

$$P_{\text{propan}} = \frac{\text{molpropan}}{\text{jumlahmol}} \times P_{\text{total}}$$

$$= \frac{3,238}{(0.34 + 3,238 + 2,456)} \times 1396,392$$

$$= 749,340 \text{ (kPa)}$$

$$P_{\text{butan}} = \frac{\text{molbutan}}{\text{jumlahmol}} \times P_{\text{total}}$$

$$= \frac{2,456}{(0.34 + 3,238 + 2,456)} \times 1396,392$$

$$= 568,369 \text{ (kPa)}$$

Tabel 4.3 Tekanan parsial masing-masing gas

% CO ₂	GAS	P1	P3
0	CO ₂	0	0
	Propan	196,973	452,861
	Butan	149,419	343,531
5	CO ₂	31,915	78,683
	Propan	303,941	749,340
	Butan	230,537	568,369
10	CO ₂	64,602	173,320
	Propan	291,042	780,831
	Butan	220,748	582,240
15	CO ₂	106,325	275,072
	Propan	301,394	789,728
	Butan	228,672	591,592
20	CO ₂	143,071	397,610
	Propan	286,247	795,512
	Butan	217,074	603,270

1. Perhitungan entalpi campuran

Entalpi campuran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$h_m = \sum_{i=1}^k m f_i h_i \text{ (kJ/kg)}$$

Dimana:

$$h_m = \text{entalpi campuran (kJ/kg)}$$

$$m f_i = \text{fraksi massa campuran}$$

$$h_i = \text{entalpi zat yang akan dicampur (kJ/kg)}$$

Setelah menentukan tekanan parsial masing-masing gas, maka didapatkan entalpi CO₂, Propan dan Butan dalam diagram P-h masing-masing gas tersebut.

$$h_{\text{CO}_2} = 8,73 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_{\text{propan}} = 885 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_{\text{butan}} = 320 \text{ (kJ/kg)}$$

Sehingga entalpi campuran :

$$\begin{aligned} h_m &= (0,5 \times 8,73) + (0,475 \times 885) + (0,475 \times 320) \quad \text{(kJ/kg)} \\ &= 572,812 \quad \text{(kJ/kg)} \end{aligned}$$

Tabel 4.4 Entalpi campuran

CO ₂ (%)	Titik	Temperatur (°C)	Entalpi			
			Propan	Butan	CO ₂	Campuran
0	1	6,4	884	300	0	592
	2	49	952	360	0	656
	3	34,5	480	-16	0	232
	4	4,5	480	-16	0	232
5	1	7,9	885	320	8,73	572,812
	2	59,5	970	375	10,667	639,408
	3	34,5	530	38	9,713	270,286
	4	5,2	530	38	8,632	270,232
10	1	8,2	890	318	8,741	544,474
	2	61,5	980	378	10,745	612,175
	3	35,5	540	39	9,749	261,525
	4	5,3	540	39	8,635	261,414
15	1	8,3	895	319	8,745	517,262
	2	68,1	990	384	11,006	585,601
	3	35,4	545	39	9,747	249,662
	4	5,6	545	39	8,646	249,497
20	1	8,5	900	316	8,752	488,150
	2	71,1	1000	391	11,124	558,625
	3	33,4	549	42	9,672	238,334
	4	5,7	549	42	8,65	238,130

2. Perhitungan efek refrigerasi

$$q = h_1 - h_4 \quad \text{(kJ/kg)}$$

Dimana:

$$h_1 = \text{entalpi keluar evaporator} \quad \text{(kJ/kg)}$$

$$h_4 = \text{entalpi masuk evaporator} \quad \text{(kJ/kg)}$$

Diketahui :

$$h_1 = 572,812 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_4 = 270,232 \text{ (kJ/kg)}$$

Sehingga

$$q = 572,812 \text{ kJ/kg} - 270,232 \text{ kJ/kg} \\ = 302,580 \quad (\text{kJ/kg})$$

3. Kerja kompresi

Kerja kompresi adalah banyaknya kalor yang dikompresikan kompresor setiap satuan massa refrigeran (kJ/kg).

$$W = h_2 - h_1 \quad (\text{kJ/kg})$$

Dimana:

$$h_1 = \text{Entalpi keluar evaporator} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$h_2 = \text{Entalpi masuk evaporator} \quad (\text{kJ/kg})$$

Diketahui:

$$h_1 = 572,812 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_2 = 639,408 \text{ (kJ/kg)}$$

Sehingga :

$$W = 639,408 \text{ kJ/kg} - 572,812 \text{ kJ/kg} \\ = 66,597 \quad (\text{kJ/kg})$$

4. Perhitungan koefisien prestasi

$$KP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \text{ atau } KP = \frac{q}{W}$$

Diketahui:

$$q = 302,580 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 66,597 \text{ kJ/kg}$$

$$KP = 4,543$$

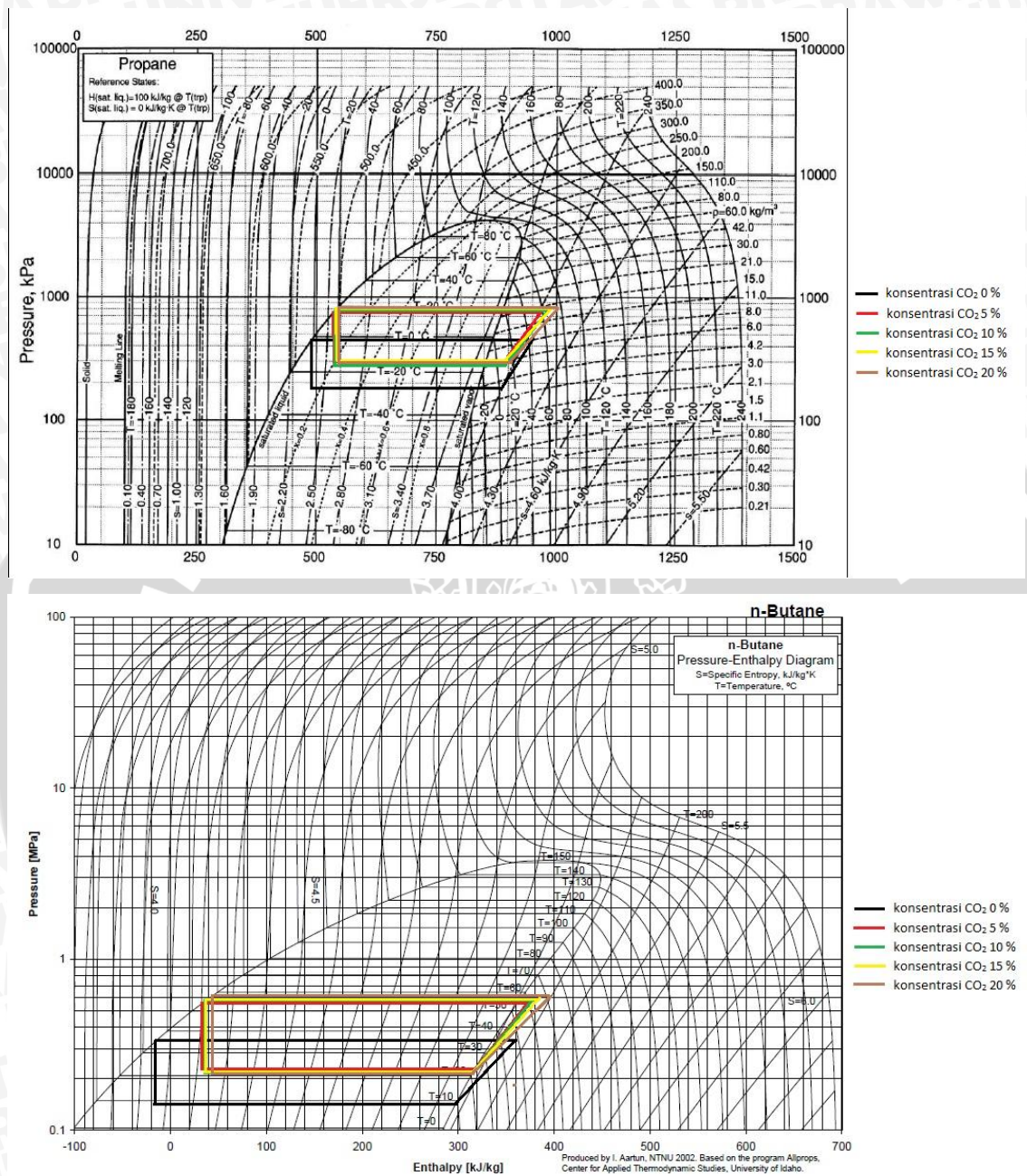
4.1.3 Data hasil perhitungan

Data hasil perhitungan selengkapnya ditunjukkan pada Tabel Data Hasil Perhitungan di Lampiran 1.

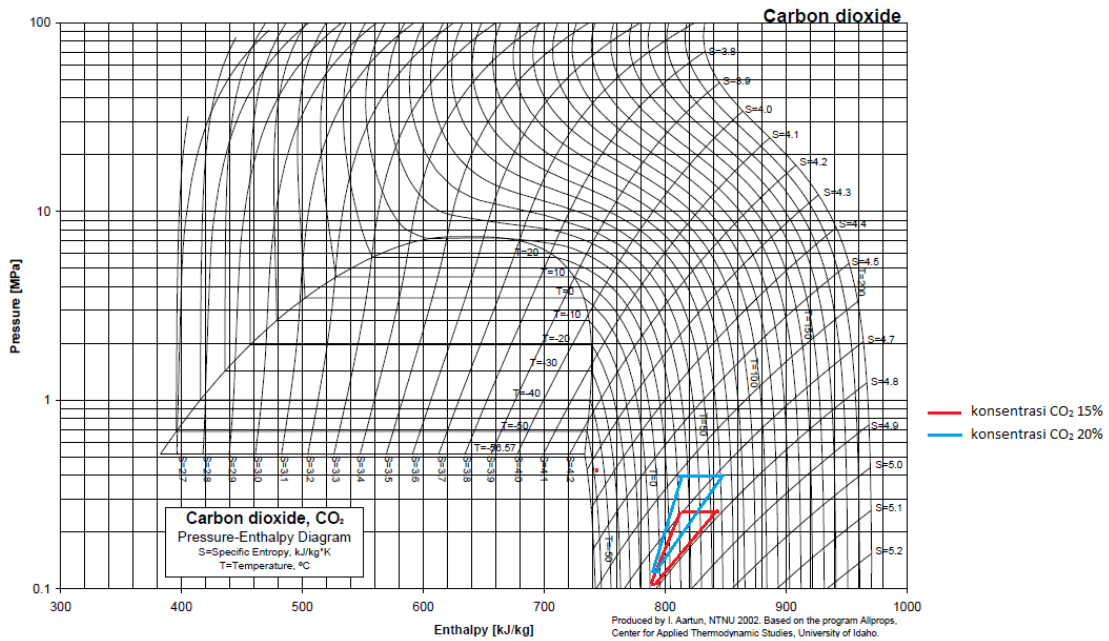
4.2. Hasil dan Pembahasan

Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi konsentrasi CO₂, sedangkan variabel terikatnya yaitu efek refrigerasi, kerja kompresi dan koefisien prestasi. Hasil penelitian ditunjukkan dengan adanya unjuk kerja yang meliputi efek refrigerasi, kerja kompresi dan koefisien prestasi. Gambar 4.1 merupakan diagram

tekanan-entalpi pada gas butan dan propan. Diagram menunjukkan entalpi bertambah besar seiring bertambahnya konsentrasi CO₂.

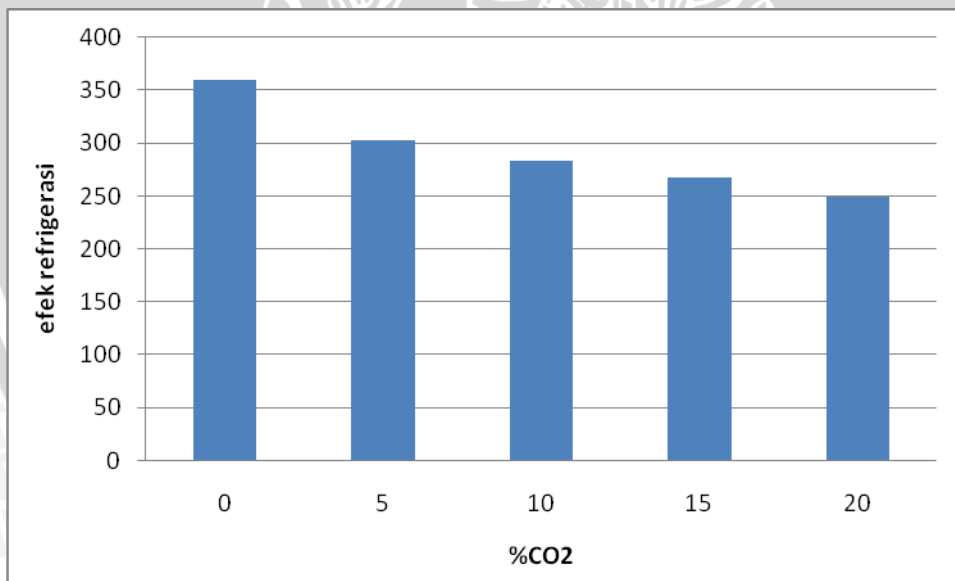


Gambar 4.1 Diagram P-h gas propan dan butan



Gambar 4.2 Diagram P-h gas CO₂ konsentrasi 15% dan 20%

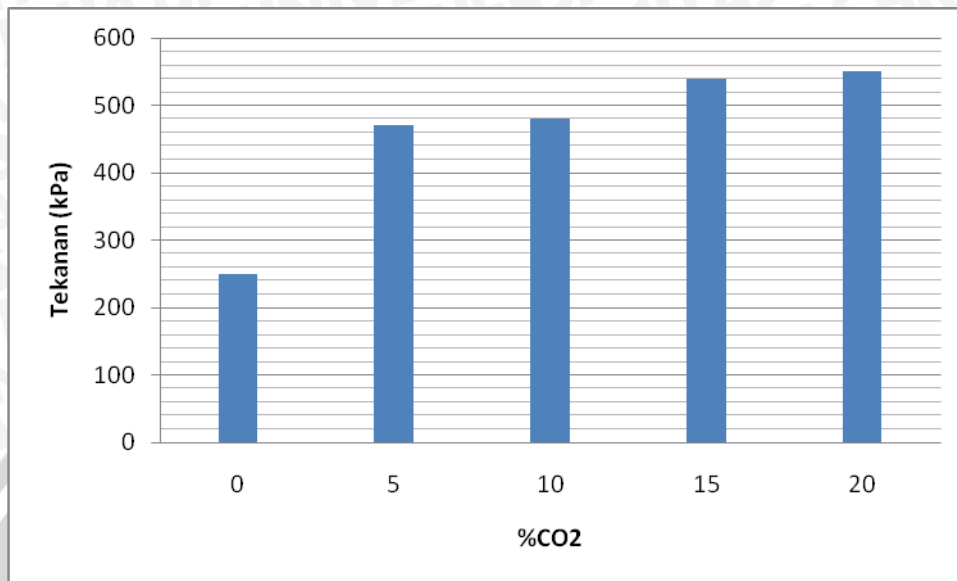
4.2.1 Pengaruh Konsentrasi CO₂ Terhadap Efek Refrigerasi



Gambar 4.3 Diagram pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap efek refrigerasi

Gambar 4.3 menunjukkan adanya pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap efek refrigerasi yang terjadi di evaporator. Diagram memiliki kecenderungan menurun seiring bertambahnya konsentrasi CO₂. Hal ini disebabkan karakteristik CO₂ yang memiliki tekanan tinggi sehingga tekanan dan temperatur refrigeran didalam evaporator juga meningkat seperti pada gambar 4.4 dan semakin tinggi konsentrasi CO₂ massa

refrigeran LPG (propan dan butan) juga semakin sedikit. Semakin tinggi temperatur di evaporator dan berkurangnya massa LPG, penyerapan panas yang dilakukan evaporator terhadap udara lingkungan semakin sedikit, sehingga efek refrigerasi semakin menurun.



Gambar 4.4 Diagram hubungan antara tekanan dengan konsentrasi CO₂

Rumus efek refrigerasi :

$$q = h_1 - h_4$$

Dimana q = efek refrigersi (kJ/kg).

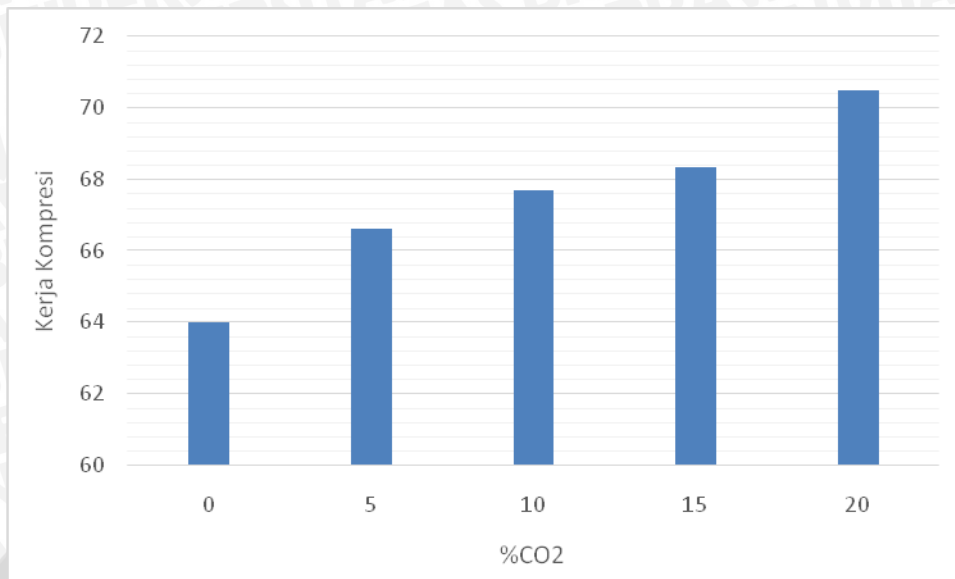
h_1 = entalpi refrigeran keluar evaporator (kJ/kg).

h_4 = entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg).

Pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 100:0% mempunyai efek refrigerasi sebesar 360 kJ/kg. Ketika pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 95:5% mempunyai efek refrigerasi sebesar 302,580 kJ/kg (penurunan sebesar 15,95%). Sedangkan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 90:10% mempunyai efek refrigerasi sebesar 283,061 kJ/kg (penurunan sebesar 21,37%). Dan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 85:15% mempunyai efek refrigerasi sebesar 267,765 kJ/kg (penurunan sebesar 25,62%). Sedangkan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 80:20% mempunyai efek refrigerasi sebesar 247,234 kJ/kg (penurunan sebesar 30,55%).

Selama sirkulasi refrigeran berlangsung didalam mesin pendingin, CO₂ tidak mengalami perubahan fase yaitu pada fase gas, sehingga bisa dipastikan CO₂ tidak berperan dalam proses penyerapan kalor karena beda entalpi sebelum masuk evaporator dengan entalpi keluar evaporator sangat kecil. Hal ini bisa dilihat dari gambar 4.2.

4.2.2 Pengaruh Konsentrasi CO₂ Terhadap Kerja Kompresi



Gambar 4.5 Diagram pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap kerja kompresi

Gambar 4.5 menunjukkan adanya pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap kerja kompresi yang terjadi di kompresor. Diagram memiliki kecenderungan meningkat seiring bertambahnya konsentrasi CO₂. Hal ini disebabkan karakteristik CO₂ yang memiliki tekanan tinggi sehingga dapat meningkatkan tekanan pada kompresor. Semakin tinggi tekanan di kompresor, kerja kompresor yang dibutuhkan untuk menaikkan tekanan dan temperatur refrigeran semakin besar. Sehingga kerja kompresi seiring bertambahnya CO₂ semakin meningkat. Rumus kerja kompresi :

$$W = h_2 - h_1$$

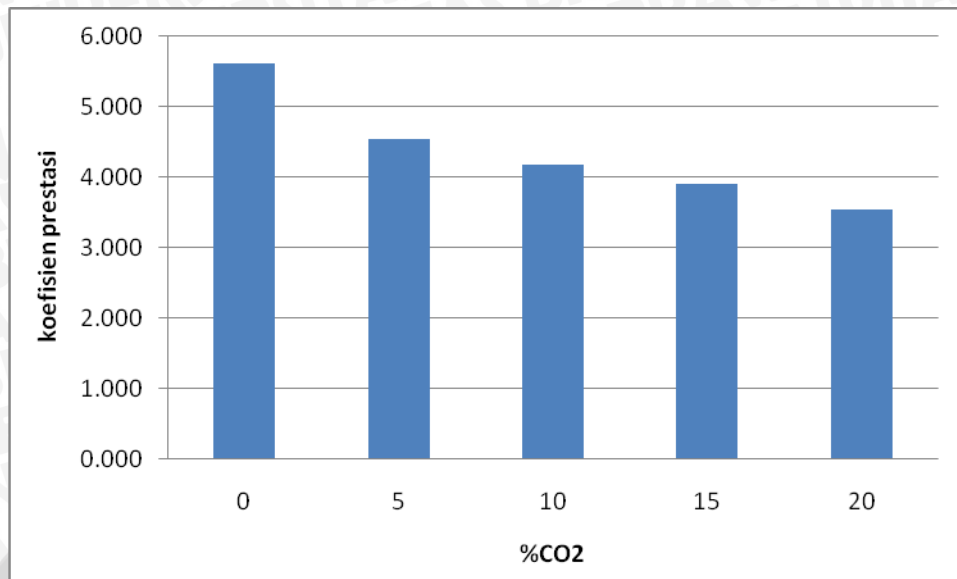
Dimana q = kerja kompresi (kJ/kg).

h_1 = entalpi refrigeran masuk kompresor (kJ/kg).

h_2 = entalpi refrigeran keluar kompresor (kJ/kg).

Pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 100:0% mempunyai kerja kompresi sebesar 64 kJ/kg. Ketika pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 95:5% mempunyai kerja kompresi sebesar 66,597 kJ/kg (kenaikan sebesar 4,058%). Sedangkan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 90:10% mempunyai kerja kompresi sebesar 67,7 kJ/kg (kenaikan sebesar 5,872%). Dan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 85:15% mempunyai kerja kompresi sebesar 68,339 kJ/kg (kenaikan sebesar 6,78%). Sedangkan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 80:20% mempunyai kerja kompresi sebesar 70,474 kJ/kg (kenaikan sebesar 10,116%).

4.2.3 Pengaruh Konsentrasi CO₂ Terhadap Koefisien Prestasi



Gambar 4.6 Diagram pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap koefisien prestasi

Gambar 4.6 menunjukkan adanya pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap koefisien prestasi. Diagram memiliki kecenderungan menurun seiring bertambahnya konsentrasi CO₂. Hal ini disebabkan semakin tinggi konsentrasi CO₂ efek refrigerasinya semakin menurun sedangkan kerja kompresinya semakin meningkat.

Rumus koefisien prestasi:

$$KP = \frac{q}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Dimana KP = koefisien prestasi.

q = efek refrigerasi (kJ/kg).

W = kerja kompresi (kJ/kg).

Pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 100:0% mempunyai koefisien prestasi sebesar 5,625. Ketika pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 95:5% mempunyai koefisien prestasi sebesar 4,543 (penurunan 19,227%). Sedangkan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 90:10% mempunyai kerja kompresi sebesar 4,181 (penurunan 25,67%). Dan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 85:15% mempunyai kerja kompresi sebesar 3,198 (penurunan 30,344%). Sedangkan pada konsentrasi LPG:CO₂ sebesar 80:20% mempunyai kerja kompresi sebesar 3,548 (penurunan 36,93%).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian tentang pengaruh konsentrasi CO₂ dalam refrigeran LPG-CO₂ terhadap unjuk kerja AC mobil yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa penambahan konsentrasi CO₂ akan mempengaruhi unjuk kerja AC mobil.

- a. Semakin bertambahnya konsentrasi CO₂, menyebabkan tekanan dan temperatur refrigeran pada evaporator meningkat sehingga penyerapan panas dari lingkungan semakin sedikit dan menyebabkan efek refrigerasi semakin turun.
- b. Penambahan konsentrasi CO₂ menyebabkan tekanan pada kompresor meningkat sehingga kerja kompresor untuk menaikkan tekanan dan temperatur refrigeran semakin besar dan kerja kompresi semakin meningkat.
- c. Penambahan konsentrasi CO₂ menyebabkan koefisien prestasi menurun.
- d. Penurunan koefisien prestasi seiring penambahan konsentrasi CO₂ kurang lebih 36,93%.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, peneliti menyarankan untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan:

1. Penambahan *sight glass* pada tiap titik agar fase refrigeran yang melewati tiap komponen terlihat.
2. Pemeriksaan kebocoran pipa (koil) harus dilakukan secara teratur.
3. Penggunaan *inhibitor* yang lain selain CO₂.

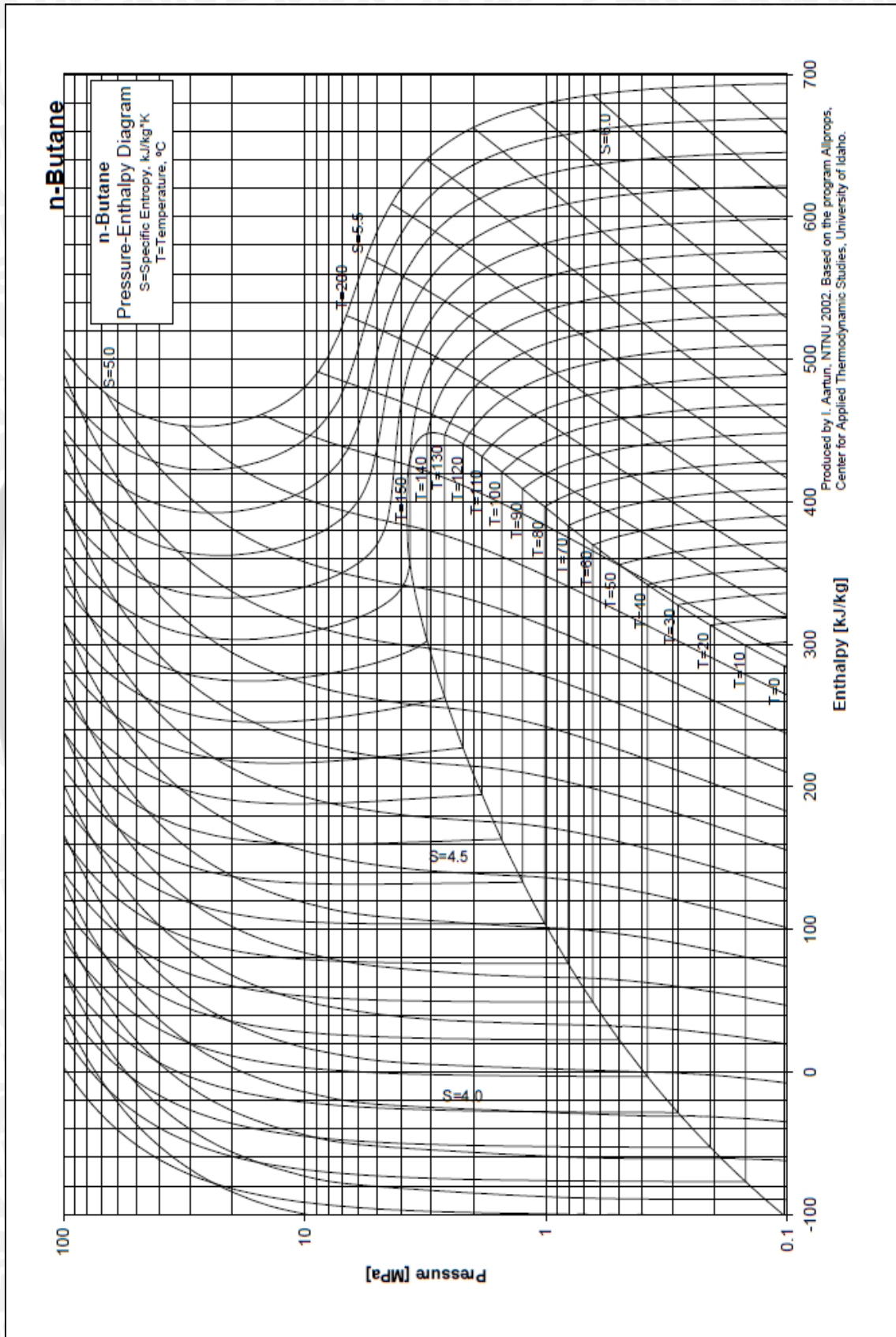
DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, W. & Saito, H.; 2002: *Penyegaran Udara*; P.T. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Anonymous ; 2010 : Evaporator: <http://anekapasar.blogspot.com/2010/07/evaporator> (diakses tanggal 25 Agustus 2013)
- Anonymous ; 2013 : Kompresor: <http://www.blog.qualitytechnic.com/2011/06/kompres> (diakses tanggal 25 Agustus 2013)
- Anonymous ; 2013 : Kondensor: <http://forum.otomotifnet.com/otoweb/include> (diakses tanggal 25 Agustus 2013)
- Anonymous ; 2013 : Katup ekspansi: jempolsemua.blogspot.com/2010/02/ac-mesin (diakses tanggal 25 Agustus 2013)
- Cengel, Yunus A. 1998: *Heat Transfer Practical Approach*; Mc. Grow Hill Ltd, New York.
- Fatouh M., M. El Kafafy. 2006. *Experimental evaluation of a domestic refrigerator working with LPG, El Seiver*, Applied Thermal Engineering 26 1593–1603
- I. Aartun. NTNU. 2002. *Based on the program all prop*, Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho
- Maclaine-Cross IL, Leonardi E. 1995. *Performance and Safety of LPG Refrigerant, Proceedings of the 'Fuel of Change' conference of the Australian Liquefied Petroleum Gas Association Ltd, ISBN 0 646 24884 7*, Surfers Paradise Queensland , pp 149-168, 28th February to 2nd March 1995.
- McGraw-Hill. Appendix 1, Property Tabel and Chart (SI UNITS), A-20
- Mohanraj M., et.all. 2009. *Environment Friendly Alternative to Halogenated Refrigerants-A Review*, www.elsevier.com/locate/ijggc, International Journal of Greenhouse Gas Control 3 108-119.
- Nurkholis Hamidi, Nasrul Ilminafik, ING Wardana, Akhmad Sabaruddin. 2011. *An Experimental Study of the Flammability Limits of LPG-CO2-Air Mixture*, Internasional Symposium on Advance Engineering, Korea.
- Stoecker, W. F. & Jones, J. W.; 1996: *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*; Terj. Supratman Hara; Erlangga, Jakarta.
- Suwono Aryadi, 2008, *Experience in Conversion of Various HCFC 22 System to Hydrocarbon*, International Conference, Bangkok, Thailand.
- Vetra Etranto, *Refrigeration System*, P-h diagram of propane

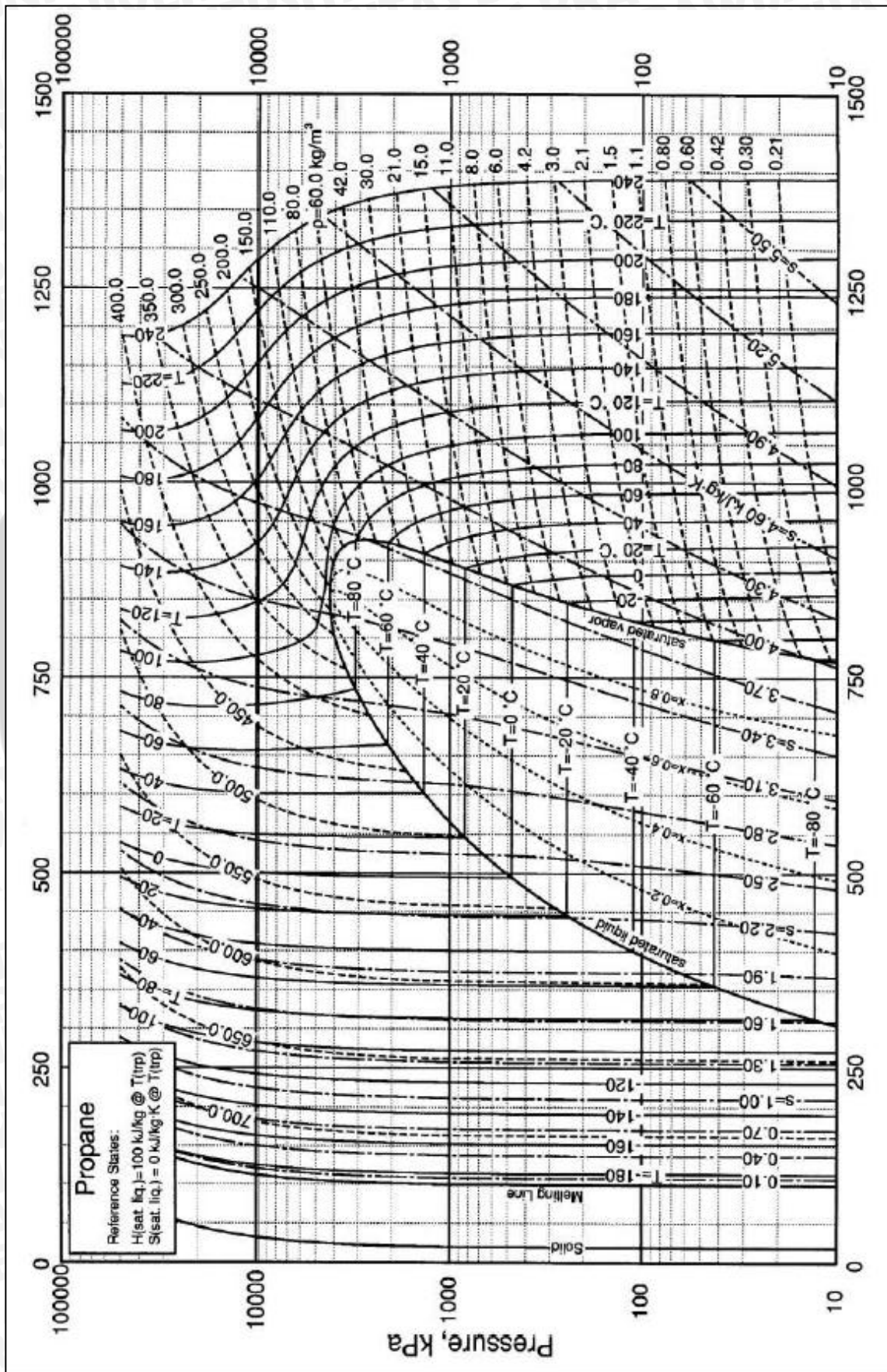
Lampiran 1

CO ₂ (%)	Titik	Temperatur (°C)	Entalpi				Parameter		
			Propane	Butane	CO ₂	Campuran	q	W	KP
0	1	6.4	884	300	0	592	360	64	5.625
	2	49	952	360	0	656			
	3	34.5	480	-16	0	232			
	4	4.5	480	-16	0	232			
5	1	7.9	885	320	8.73	572.812	302.580	66.597	4.543
	2	59.5	970	375	10.667	639.408			
	3	34.5	530	38	9.713	270.286			
	4	5.2	530	38	8.632	270.232			
10	1	8.2	890	318	8.741	544.474	283.061	67.700	4.181
	2	61.5	980	378	10.745	612.175			
	3	35.5	540	39	9.749	261.525			
	4	5.3	540	39	8.635	261.414			
15	1	8.3	895	319	8.745	517.262	267.7649	68.339	3.918
	2	68.1	990	384	11.006	585.601			
	3	35.4	545	39	9.747	249.662			
	4	5.6	545	39	8.646	249.497			
20	1	8.5	900	316	8.752	488.150	250.020	70.474	3.548
	2	71.1	1000	391	11.124	558.625			
	3	33.4	549	42	9.672	238.334			
	4	5.7	549	42	8.65	238.130			

Lampiran 2



Lampiran 3



Lampiran 4

TABLE A-20

Ideal-gas properties of carbon dioxide, CO₂

<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K	<i>T</i> K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,522	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	30,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670