

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Yunianto (2005), dalam penelitiannya mendapatkan kesimpulan bahwa besar beban pendinginan berpengaruh pada koefisien prestasi mesin pendingin. Penelitian dilakukan dengan memberikan variasi temperatur evaporator dari -4°C hingga 10°C dengan temperatur dikondisikan konstan pada 31°C . Hasilnya, terjadi peningkatan koefisien prestasi mesin pendingin seiring dengan semakin meningkatnya temperatur evaporator.

Anwar (2010a) melakukan penelitian tentang pengaruh temperatur pipa kapiler terhadap kerja mesin pendingin. Pemasangan pipa kapiler bertujuan untuk mendinginkan refrigeran sebelum masuk ke evaporator. Proses pendinginan tersebut menyebabkan nilai entalpi refrigeran sebelum memasuki evaporator semakin kecil, sehingga terjadi peningkatan pada kapasitas refrigerasi sistem mesin pendingin. **Anwar (2010b)** juga melakukan penelitian tentang pengaruh beban pendinginan terhadap kerja mesin pendingin. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental dengan variasi beban pendingin yang diperoleh dengan menempatkan bola lampu 60, 100, 200, 300 dan 400 W di dalam ruang pendingin. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan beban pendingin menyebabkan koefisien prestasi sistem pendingin akan membentuk kurva parabola. Performa optimum pada pengujian selama 30 menit diperoleh pada bola lampu 200 W dengan COP sebesar 2.64. Sedangkan untuk waktu pendinginan diperoleh paling lama pada beban pendingin yang paling tinggi (bola lampu 400 W).

Pramana (2014) melakukan pengujian dengan menggunakan refrigeran LPG- CO_2 dengan beban pendinginan dari uap *boiler* yang mengalir di *duct* sebelum melewati evaporator guna mengetahui pengaruh beban pendinginan terhadap unjuk kerja AC mobil. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa semakin besar beban pendinginan dapat menyebabkan temperatur refrigeran masuk ke kompresor semakin besar yang mengakibatkan kerja dari kompresor semakin meningkat, sehingga akan mempengaruhi nilai dari koefisien prestasi *air conditioner* yang semakin menurun.

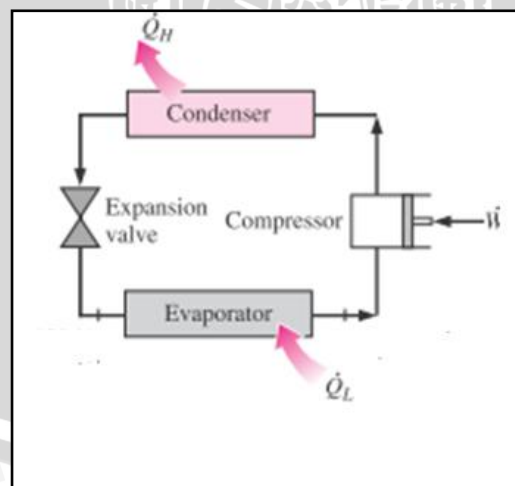
Menurut **Suwono (2005)**, refrigeran hidrokarbon memiliki keunggulan dibandingkan refrigeran lain. Hidrokarbon sebagai refrigeran bekerja pada tekanan rendah sehingga energi yang diperlukan dalam sistem refrigerasi lebih rendah sampai

25%. Sedangkan menurut **Mohanraj, et.all (2009)**, refrigeran hidrokarbon merupakan refrigeran alami yang ramah lingkungan, yang menjadi refrigeran alternatif pengganti refrigeran halogen.

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. Sedangkan pengkondisian udara adalah proses perlakuan 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 pemanasan seperti pengaturan kecepatan, radiasi termal dan kualitas udara termasuk penyisihan partikel dan uap pengotor.

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. Siklus refrigerasi Carnot bisa dilihat pada gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1. Siklus refrigerasi Carnot
Sumber: Cengel (1998: 320)

2.3 Sifat-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 dijangkau 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 tekanan yang mempunyai titik referensi nol di daerah vakum sempurna. Sedangkan tekanan pengukuran (*gauge pressure*) adalah tekanan yang mempunyai titik referensi nol pada daerah tekanan atmosfer. 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 (v) 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°C mendekati $1,2 \text{ kg/m}^3$.

4. Kalor spesifik

Kalor spesifik dari suatu bahan adalah jumlah energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu satuan massa bahan tersebut sebesar 1°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:

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

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 dituliskan dengan persamaan 2-1 berikut.

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

dengan:

h = entalpi (kJ/kg)

C_p = kalor spesifik (kJ/kg $^{\circ}$ K)

T = temperatur ($^{\circ}$ K)

6. Entropi

Entropi (s) adalah energi kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan 1 $^{\circ}$ temperatur setiap satuan massa [kJ/kg. $^{\circ}$ 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:

$$W = 0,622 \frac{P_s}{P_t - P_s} \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992: 41}) \quad (2-2)$$

dengan:

W = rasio kelembaban (kg udara/kg udara kering)

p_t = tekanan atmosfer, dimana $P_t = P_s + P_a$ (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 berikut :

$$\phi = \frac{p_s}{P_w} \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992:40}) \quad (2-3)$$

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:

$$v = \frac{R_a T}{p_t - p_s} \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992:43}) \quad (2-4)$$

dengan:

v = volume spesifik (m^3/kg udara kering)

R_a = tetapan gas untuk udara kering ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

p_t = tekanan atmosfer (Pa)

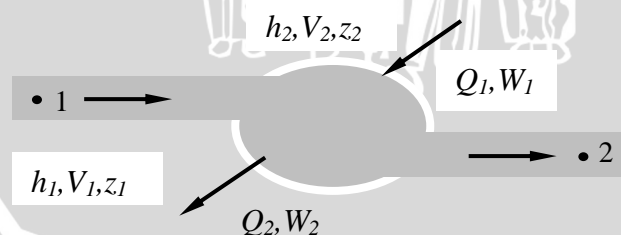
p_s = tekanan parsial uap air (Pa)

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 :



Gambar 2.2. Keseimbangan energi pada sebuah volume atur yang sedang mengalami laju aliran mantap

Sumber : Stoecker & Jones (1992:20)

dengan:

\dot{m} = laju aliran massa (kg/s)

h = entalpi (kJ/kg)

v = kecepatan (m/s)

z = ketinggian (m)

g = percepatan gravitasi = $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Q = energi dalam bentuk kalor (kJ/s)
 W = energi dalam bentuk kerja (kJ/s)
 E = energi dalam sistem (kJ)

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 & Jones; 1992: 20).

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

$$m \left[h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q - m \left[h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] - W = \frac{dE}{d\theta} \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992: 20}) \quad (2-5)$$

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 berikut :

$$m \left[h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q = m \left[h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] + W \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992: 21}) \quad (2-6)$$

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*).

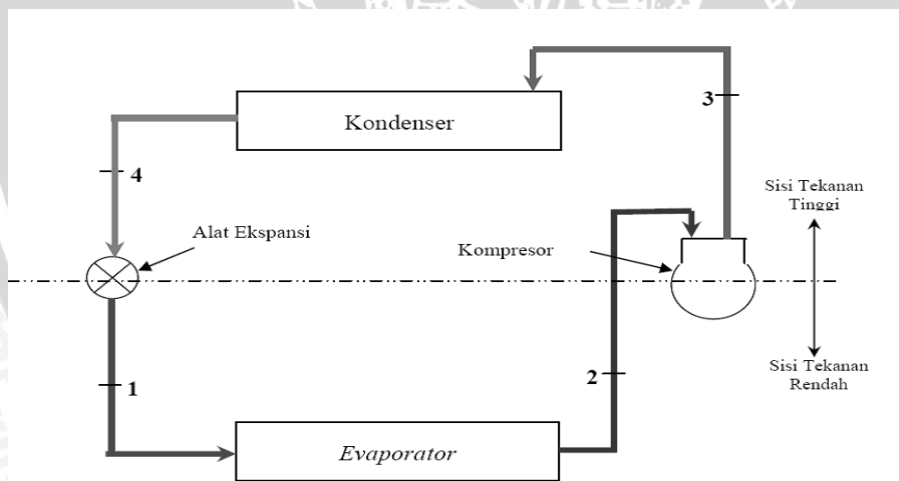
2.6.1 Mesin Pendingin Dengan Siklus Kompresi Uap

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:

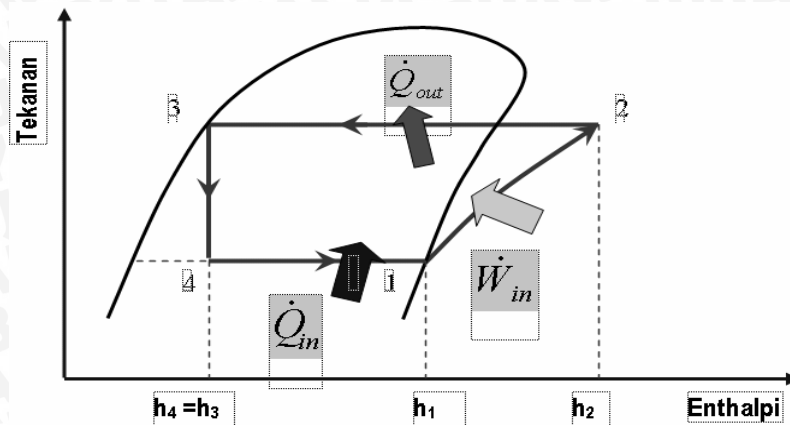
1. Konstruksinya sederhana
2. Pengoperasiannya mudah dan tahan lama
3. Bila terjadi kerusakan mudah diperbaiki.

Instalasi mesin pendingin kompresi uap ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut ini:



Gambar 2.3. Diagram skematik komponen mesin pendingin siklus kompresi uap
Sumber : Stoecker & Jones (1992: 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 & Jones (1992: 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 :

$$h_3 = h_4 \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992:186}) \quad (2-7)$$

- 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.

Pada mesin pendingin ini terdapat beberapa istilah penting sebagai berikut:

- Beban pendinginan

Beban pendinginan adalah banyaknya kalor yang harus diserap oleh refrigeran di evaporator tiap satuan waktu dengan tujuan untuk menghasilkan efek pendinginan.

b. Efek refrigerasi

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

Kapasitas refrigerasi atau kapasitas pendinginan adalah kemampuan mesin pendingin untuk menyerap kalor per satuan waktu, besarnya kapasitas pendinginan sesuai dengan persamaan 2-8 berikut:

$$Q_1 = \dot{m}_A \cdot h_A - (\dot{m}_B \cdot h_B + \dot{m}_{con} \cdot h_{con}) \quad (2-8)$$

dengan :

Q_1 = kapasitas refrigerasi (kW)

\dot{m}_A = massa alir udara sebelum memasuki evaporator (kg/s)

h_A = entalpi udara sebelum masuk ke evaporator (kJ/kg)

\dot{m}_B = massa alir udara setelah keluar dari evaporator (kg/s)

h_B = entalpi udara setelah keluar dari evaporator (kJ/kg)

\dot{m}_{con} = massa alir air kondensasi (kg/s)

h_{con} = entalpi air kondensasi (kJ/kg)

c. Koefisien prestasi

Istilah prestasi di dalam siklus refrigerasi disebut dengan koefisien prestasi (KP) atau *coefficient of performance (COP)*. *COP* adalah ukuran efisiensi dari mesin pendingin yang dinyatakan pada persamaan 2-9 berikut:

$$COP = \frac{\text{refrigerasi bermanfaat}}{\text{kerja bersih}} \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992: 178}) \quad (2-9)$$

Perbandingan itu bisa dinyatakan dengan laju energi, dengan melakukan modifikasi terhadap rumus *COP* menggunakan laju alir massa refrigeran yang ditunjukkan pada persamaan 2-10 berikut:

$$COP = \frac{q_1 \cdot \dot{m}}{w \cdot \dot{m}} = \frac{Q_1}{W_{comp}} \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992: 178}) \quad (2-10)$$

Unjuk kerja mesin pendingin meliputi:

Siklus mesin pendingin dapat dijelaskan pada gambar 2.3 dan gambar 2.4 dimana proses dimulai dari kompresor dimana terjadi kompresi cairan refrigeran dan dalam waktu yang bersamaan terjadi penurunan tekanan pada saluran masuk refrigeran ke kompresor. Selanjutnya terjadi siklus kompresi dan tercipta proses penguapan pada evaporator dan pengembunan pada kondensor. Dengan kata lain proses 1-2 adalah kompresi isentropik di sepanjang garis entropi konstan, mulai dari uap jenuh kering hingga tekanan pengembunan. Proses 2-3 merupakan penurunan panas lanjut dan pengembunan dengan tekanan tetap, yang merupakan garis lurus mendatar pada diagram tekanan-entalpi. Proses trotel 3-4 berlangsung pada entalpi tetap, karena tegak

lurus pada diagram tekanan-entalpi. Proses 4-1 merupakan garis lurus mendatar karena aliran refrigeran melalui evaporator dianggap mempunyai tekanan tetap. 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 silinder dan dikompresikan .
- b. Kompresor dinamis, dimana gas yang dihisap masuk dipercepat alirannya oleh sebuah impeller yang kemudian mengubah energi kinetik untuk menaikkan tekanan.

Fungsi kompresor antara lain :

- a. Mensirkulasikan bahan pendingin (refrigeran).
- 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 :

$$h_1 + q = h_2 + w \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992: 186}) \quad (2-11)$$

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

$$w = (h_2 - h_1) \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992: 186}) \quad (2-12)$$

dengan:

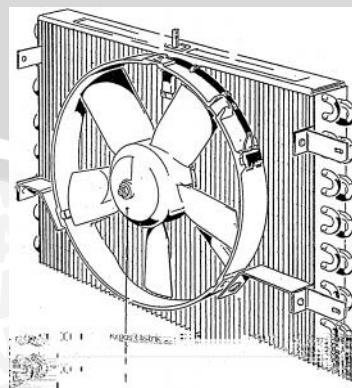
h_1 = entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap (kJ/kg)

h_2 = entalpi refrigeran pada daerah panas lanjut (kJ/kg)

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 melepas kalor yang dikandung oleh refrigeran sehingga refrigeran yang mula-mula berbentuk uap akan menjadi cair. Kondensor ditunjukkan pada gambar 2.6 berikut :



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 2-13 berikut:

$$h_3 + q_c = h_2 + w \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992:186}) \quad (2-13)$$

karena tidak dilakukan kerja maka persamaannya menjadi seperti persamaan 2-14 berikut :

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992:187}) \quad (2-14)$$

dengan:

q_c = pelepasan kalor terjadi dari kondensor (kJ/kg)

h_3 = entalpi refrigeran pada daerah saturasi cair (kJ/kg)

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 seperti persamaan 2-15 berikut:

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (\text{Stoecker \& Jones; 1992:187}) \quad (2-15)$$

dengan:

- q_e = penyerapan kalor oleh refrigeran dalam evaporator (kJ/kg)
- h_1 = entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap (kJ/kg)
- h_4 = entalpi refrigeran pada daerah campuran (kJ/kg)

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.

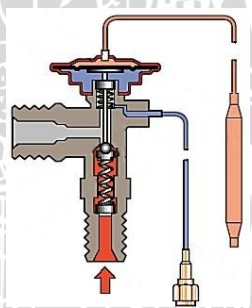
4. Alat Ekspansi

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 terjadinya penguapan dalam kondisi ruangan, maka digunakan pipa kapiler (*liquid control device*) yang bekerja sebagai suatu tahanan aliran fluida (*bahan pendingin 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 .

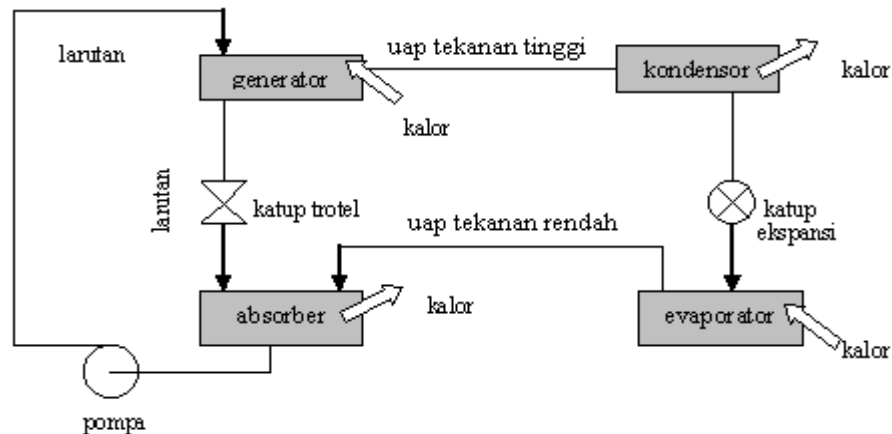
Alat ekspansi yang sering digunakan adalah katup ekspansi termostatik dan pipa kapiler. Katup ekspansi termostatik merupakan katup ekspansi berkendali panas lanjut yang berfungsi agar refrigeran yang masuk evaporator sesuai dengan beban pendingin yang harus dilayani. Pipa kapiler berfungsi sebagai alat 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>

2.6.2 Mesin Pendingin Dengan Siklus Absorbsi

Dalam beberapa hal siklus absorpsi hampir sama dengan siklus kompresi uap. Uap tekanan rendah dari evaporator dapat ditransformasikan menjadi uap tekanan tinggi dan dialirkan ke kondensor. Pada siklus kompresi uap menggunakan kompresor untuk keperluan tersebut, sedangkan pada siklus absorpsi menggunakan absorber, pompa, katup trotel dan generator untuk keperluan tersebut. Mesin pendingin absorpsi disebut juga sebagai mesin pendingin yang dioperasikan oleh kalor (*heat operated cycle*). Skema mesin pendingin absorpsi ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut :



Gambar 2.9. Diagram skematik komponen mesin pendingin siklus absorpsi
Sumber: Stoecker & Jones (1992: 309)

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.

Untuk setiap mesin pendingin, refrigeran yang digunakan berbeda-beda tergantung penggunaannya (kapasitas refrigerasi) ataupun jenis kompresornya. Kadang-kadang satu tipe refrigeran cocok untuk digunakan beberapa penggunaan.

- *Domestic refrigerator* : R-12, R-22
- *Domestic food freezer* : R-12, R-22, R-502
- *Automobile air conditioning* : R-12
- *Home air conditioning* : R-22, R-500
- *Ship board air conditioning* : R-11, R-12, R-22
- *Frozen food delivery service* : R-22
- *Industrial process* : R-11
- *Public building air conditioning*
 - Kapasitas rendah : R-12, R-22
 - Kapasitas medium : R-11, R-12, R-22
 - Kapasitas tinggi : R-11, R-12

Pemilihan jenis refrigeran yang digunakan pada mesin pendingin sudah ditentukan oleh pabrik dengan beberapa pertimbangan. Selain pertimbangan mengenai

penggunaan atau kapasitas refrigerasi seperti yang telah dijelaskan diatas, juga harus dipertimbangkan jenis kompresor yang dipakai.

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 & Jones (1992: 279)

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 & Jones (1992: 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 & Jones (1992: 280)

d. Azeotrop

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 (C_3H_8) dan 50% butana (C_4H_{10}). 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*). Hidrokarbon termasuk kelompok refrigeran A3, yaitu refrigeran tidak beracun yang memiliki batas nyala bawah atau *Low Flammability Limit* (LFL) kurang dari 3,5 %. Hidrokarbon dapat terbakar jika berada di antara ambang batas nyala 2-10 % volume. Sifat *flammable* hidrokarbon dapat diantisipasi dengan memperhatikan prosedur dan standar kerja, diantaranya Standar Nasional Indonesia (SNI) serta standar Inggris BS : 4434 tahun 1995.

Tabel 2.4 Sifat fisik dan termodinamik beberapa refrigeran

No.	Parameter	R-11	R-12	R-22	R-290	R-600
1	<i>Normal boiling point</i> (°C)	23,7	-29,8	-40,8	-42,1	-11,73
2	Temperatur kritis (°C)	197,78	112,04	96,02	96,8	135
3	Tekanan kritis (Bar)	43,7	41,15	96,02	42,56	36,45
4	Tekanan operasi refrigeran (Bar)					
	P_{evap} pada 5°C	0,4967	3,62	5,836	5,478	1,88
	P_{kond} pada 40°C	1,748	9,6	15,331	13,664	5,361
5	Kalor laten penguapan (kJ/kg)	148,5	108,4	108,4	252,4	226,5
6	Viskositas cairan (Pa-s x 106)	271,1	248,7	236	137	199,3
7	Konduktivitas termal cairan (W/mK)	0,067	0,07585	0,1	0,104	0,1068

Sumber : <http://sidiqbudy.wordpress.com/2012/01/23/refrigerant/>

2.8 Campuran Gas

Untuk menentukan properti dari suatu campuran kita harus mengetahui komposisi dari campuran sebaik mungkin pada tiap-tiap komponen. Ada dua cara untuk mengetahui komposisi dari suatu campuran dengan penetapan nilai mol pada tiap-tiap komponen atau disebut dengan *molar analysis* atau dengan menetapkan massa tiap-tiap komponen *gravimetric analysis*.

Suatu campuran gas terdiri dari k komponen. Massa campuran m_m adalah jumlah dari massa masing-masing komponen dan mol campuran N_m adalah jumlah dari mol tiap-tiap komponen. Sesuai dengan persamaan 2-16 berikut :

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \quad \text{dan} \quad N_m = \sum_{i=1}^k N_i \quad (\text{Cengel, 1998: 682}) \quad (2-16)$$

Perbandingan antara massa suatu komponen dengan massa campuran disebut fraksi massa m_f dan perbandingan antara mol suatu komponen dengan mol campuran disebut fraksi mol y . Seperti dijelaskan pada persamaan 2-17 dibawah ini:

$$m_{f_i} = \frac{m_i}{m_m} \quad \text{dan} \quad y_i = \frac{N_i}{N_m} \quad (\text{Cengel, 1998: 682}) \quad (2-17)$$

Sebuah campuran gas yang terdiri dari 2 kg N_2 dan 3 kg CO_2 . Total massa dari campuran ini adalah 5 kg. Contoh ini memberikan cara yang mudah untuk mendapatkan properti dari suatu campuran gas, hanya menambahkan kontribusi dari tiap-tiap komponen dalam campuran kemudian total energi dalam, entalpi, dan entropi campuran gas dapat ditemukan, sesuai dengan persamaan 2-18, 2-19 dan 2-20 berikut :

$$U_m = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k m_i u_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{u}_i \quad (\text{kJ}) \quad (\text{Cengel, 1998: 689}) \quad (2-18)$$

$$H_m = \sum_{i=1}^k H_i = \sum_{i=1}^k m_i h_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{h}_i \quad (\text{kJ}) \quad (\text{Cengel, 1998: 689}) \quad (2-19)$$

$$S_m = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k m_i s_i = \sum_{i=1}^k N_i s_i \quad (\text{kJ/kg}^\circ\text{K}) \quad (\text{Cengel, 1998: 689}) \quad (2-20)$$

Dengan campuran yang sama diasumsikan bahwa baik N_2 maupun CO_2 bertemperatur 30 °C, begitu juga campurannya. Perlu diingat bahwa kita tidak memperoleh temperatur campuran ini dengan cara menambahkan temperatur tiap-tiap komponen. total energi dalam, entalpi, dan entropi campuran per unit massa atau per unit mol dari suatu campuran dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2-21, 2-22 dan 2-23 dibawah ini:

$$u_m = \sum_{i=1}^k m_{f_i} u_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{dan} \quad \bar{u}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{u}_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (2-21)$$

$$h_m = \sum_{i=1}^k m_{f_i} h_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{dan} \quad \bar{h}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{h}_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (2-22)$$

$$s_m = \sum_{i=1}^k m_{f_i} s_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{dan} \quad s_m = \sum_{i=1}^k y_i s_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (2-23)$$

2.9 Hipotesa

Dengan meningkatnya temperatur dan kelembaban udara sebelum memasuki evaporator menyebabkan jumlah kalor yang harus diserap oleh refrigeran semakin besar sehingga beban pendinginan pada evaporator semakin meningkat dan unjuk kerja mesin pendingin akan mengalami penurunan.