

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian – penelitian sebelumnya

Sistem refrigerasi yang paling sederhana memiliki komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator (Arismunandar, 2002). Penelitian mengenai mesin pendingin telah banyak dilakukan seperti diantaranya, Gunadiarta (2006) melakukan penelitian bahwa kecepatan aliran beserta kelembaban sebagai parameter kondisi mula udara atmosfer akan mempengaruhi perpindahan panas sisi udara pada deret pipa-pipa evaporator. Pada instalasi AC, fenomena demikian akan merubah kapasitas pendinginan, sehingga menyebabkan prestasi instalasi yang dinyatakan *COP* juga ikut berubah.

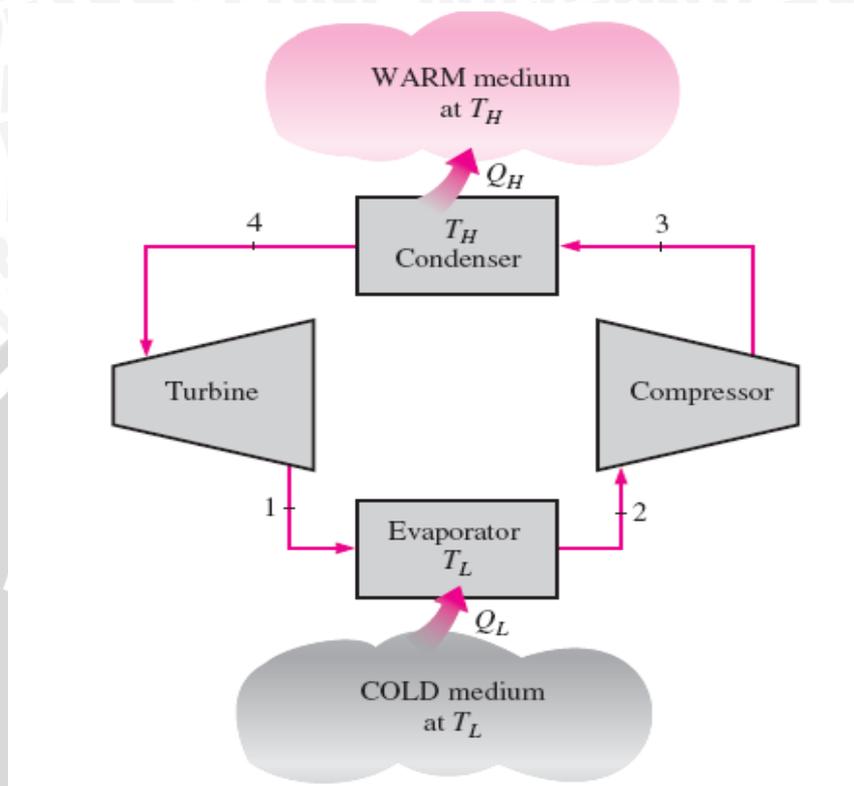
Mohanraj (2009) menyatakan bahwa refrigeran hidrokarbon merupakan salah satu refrigeran alami yang ramah lingkungan yang bisa menjadi refrigeran alternatif pengganti refrigeran halogen. Menurut Suwono (2005) refrigeran hidrokarbon merupakan pilihan yang memiliki keunggulan dibanding dengan refrigeran lain. Hidrokarbon sebagai refrigeran bekerja pada tekanan rendah sehingga energi yang diperlukan dalam sistem refrigerasi lebih rendah sampai 25%.

Mclaine (1995) penggunaan LPG sebagai refrigeran memiliki sifat termodinamika yang lebih baik dan menghemat energi 10-20%. Fujitaka (2004) telah mematenkan sejumlah komposisi refrigeran campuran antara R744 dengan beberapa refrigeran hidrokarbon. Fatouh (2006) melakukan evaluasi terhadap LPG sebagai refrigeran untuk aplikasi pada domestik *refrigerator* pengganti R134a. Niu (2007) melakukan eksperimen terhadap *performance* dari siklus refrigerasi dengan refrigeran campuran R744 (karbondioksida) dan R290 (propane).

2.2 Sistem Refrigerasi dan Pengkondisian Udara

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

Yang digunakan pada mesin pendingin adalah siklus refrigerasi Carnot. 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 (2005: 609)

Pengkondisian udara merupakan suatu proses perlakuan terhadap udara dengan cara mengatur suhu, kelembaban, kebersihan, dan pendistribusiannya secara serentak guna mencapai kondisi yang dibutuhkan. 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 Persamaan Energi Aliran Mantap

Persamaan energi aliran mantap digunakan pada mesin pendingin karena pada suatu sistem refrigerasi laju aliran massa cenderung tetap sehingga laju aliran dapat dianggap mantap dalam gambar 2.2 keseimbangan energi 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

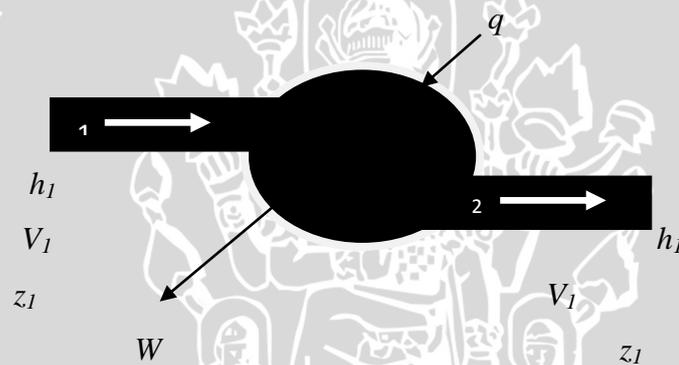
kerja dan dikurangi dengan energi yang meninggalkan sistem pada titik 2 sama dengan besarnya perubahan energi di dalam volume kendali”

Dalam pengertian diatas bisa diuraikan secara matematik yang dapat dilihat pada persamaan 2-1 dibawah ini :

$$\dot{m} \left[h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] + q - \dot{m} \left[h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] - W = \frac{dE}{d\theta} \quad (\text{Stoecker, 1996: 21}) \quad (2-1)$$

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 menjadi persamaan 2-2 dibawah ini :

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



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 ⁻¹)
	h	= Entalpi	(J.kg ⁻¹)
	V	= Kecepatan	(m.det ⁻¹)
	z	= Ketinggian	(m)
	g	= Percepatan gravitasi	(9,81 m.det ⁻²)
	q	= Laju aliran energi dalam bentuk kalor	(W)
	W	= Laju aliran energi dalam bentuk kerja	(J.det ⁻¹)
	E	= Energi dalam sistem	(J)

2.4 Psikrometri

Ilmu yang membahas tentang sifat-sifat udara lembab dan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air adalah psikrometri. Sifat termal dari udara basah ditunjukkan dengan mempergunakan diagram psikrometri. Udara atmosfer tidak seluruhnya kering melainkan merupakan campuran antara udara dan uap air oleh karena itu psikrometri mempunyai arti penting dalam teknik pengkondisian udara. Dalam psikrometri terdapat beberapa istilah dan simbol sebagai berikut:

1. Temperatur bola kering

Temperatur bola kering bisa dilihat dari termometer dengan sensor kering dan terbuka. Namun, penunjukannya tidaklah akurat karena adanya pengaruh radiasi panas, kecuali jika sensornya memperoleh ventilasi yang cukup baik.

2. Temperatur bola basah

Temperatur bola basah dapat dilihat dengan menggunakan 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 $5 \frac{m}{s}$.

3. Rasio kelembaban (*humidity ratio*)

Rasio kelembaban (W) merupakan 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 $p_v = RT$ serta memiliki kalor spesifik yang tetap. Dengan demikian diperoleh persamaan untuk rasio kelembaban seperti pada persamaan 2-3 dibawah ini:

$$W = 0,622 \frac{P_s}{P_t - P_s} \quad (\text{Stoecker; 1996: 41}) \quad (2-3)$$

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) adalah perbandingan antara tekanan parsial uap air dalam suatu campuran terhadap tekanan jenuhnya pada temperatur yang sama.

Kelembaban relatif (ϕ) dapat dinyatakan pada rumus 2-4 dibawah ini:

$$\phi = \frac{P_s}{P_w} \quad (\text{Stoecker; 1996: 40}) \quad (2-4)$$

keterangan:

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 udara campuran dengan satuan meter kubik per kilogram udara kering disebut volume spesifik. Dapat dikatakan juga 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) ditunjukkan pada rumus 2-5 dibawah ini:

$$v = \frac{R_a T}{P_t - P_s} \quad (\text{Stoecker; 1996: 43}) \quad (2-5)$$

keterangan:

v = Volume spesifik

R_a = Tetapan gas untuk udara kering

P_t = Tekanan atmosfer

P_s = Tekanan parsial uap air

$\left(\frac{m^3}{Kg \text{ udara kering}} \right)$

$\left(\frac{J}{Kg.K} \right)$

(Pa)

(Pa)

6. Titik embun

Titik embun adalah temperatur pada saat udara menjadi jenuh, artinya udara mulai berubah menjadi kondensat (mengembun) setelah mengalami proses pendinginan pada tekanan konstan dan kelembapan absolut yang konstan. Jadi, pada temperatur tersebut uap air dalam udara mulai mengembun dan hal tersebut terjadi apabila udara (lembab) didinginkan.

2.5 Sifat Termodinamika

Sifat termodinamika ialah setiap karakteristik atau ciri dari bahan yang dijajaki secara kuantitatif, seperti suhu, tekanan, dan rapat massa. Sifat-sifat termodinamika yang utama dan penting dalam penelitian ini ialah :

- Suhu.

Suhu dari suatu bahan menyatakan keadaan termal dan kemampuannya untuk bertukar energi dengan bahan lain yang bersentuhan dengannya. Dengan kata lain bahan yang bersuhu tinggi dapat memberikan energinya kepada bahan lain yang bersuhu rendah. Suhu absolut (T) yaitu derajat diatas nol absolut yang dinyatakan dengan Kelvin (K), dimana $T = t^{\circ}\text{C} + 273$.

- Tekanan.

Gaya normal yang diberikan oleh suatu fluida persatuan luas permukaan benda yang terkena gaya tersebut disebut tekanan (P). Tekanan absolut ialah ukuran tekanan diatas nol absolut. Satuannya ialah Newton per luasan meter kuadrat atau N.m^{-2} yang setara dengan 1 Pascal (Pa) sedangkan $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$.

- Volume spesifik.

Volume spesifik (v) ialah volume yang diisi oleh satu satuan massa.

- Rapat massa.

Massa yang mengisi satu satuan volume disebut rapat massa (ρ). Untuk massa udara dengan tekanan 1 atm dan suhu 25°C memiliki rapat massa $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$.

- Kalor spesifik.

Kalor spesifik (c) dari suatu bahan adalah jumlah energi yang diperlukan untuk menaikkan suhu tiap satu satuan berat bahan tersebut sebesar 1 Kelvin. Dua besaran yang berkaitan pada kalor spesifik ialah c_p yaitu pada tekanan tetap dan c_v kalor spesifik pada volume tetap. Pada sistem refrigerasi kalor spesifik pada tekanan tetap banyak digunakan pada proses pemanasan dan pendinginan. Nilai pendekatan dari kalor spesifik dari beberapa bahan yang penting ialah sebagai berikut :

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

- Entalpi.

Entalpi adalah energi yang dikandung suatu zat per satuan massanya. Suatu perubahan entalpi Δh dalam kJ/kg suatu bahan ialah jumlah kalor yang ditambahkan atau diambil per-satuan massa melalui proses tekanan konstan bahan tersebut. Sifat entalpi dapat juga menyatakan laju pemindahan kalor untuk proses penguapan dan pengembunan.

- Entropi.

Entropi memiliki sifat yang hanya digunakan dalam hal khusus dan terbatas. Sifat dalam entropi dapat diterangkan berikut :

- a. Jika suatu gas atau uap ditekan atau diekspansikan tanpa gesekan.
- b. Dalam proses diatas, perubahan entalpi menyatakan jumlah kerja persatuan massa yang diperlukan oleh proses penekanan atau yang dilepaskan oleh proses ekspansi tersebut.

2.6 Teori Mekanika Fluida

Proses perubahan parameter aliran fluida akan lebih mudah diselesaikan dengan mempelajari teori Mekanika Fluida. Pengertian dari fluida adalah zat yang dapat berubah bentuk secara terus menerus bila terkena tegangan geser, berapapun kecilnya tegangan geser tersebut. Untuk mempermudah menyelesaikan masalah maka diperlukan rumus-rumus dasar, yaitu:

1. Hukum Kontinuitas

Persamaan kontinuitas didasarkan dari asas-asas umum kekalannya massa, yang menyatakan bahwa massa di dalam suatu sistem adalah tetap konstan terhadap waktu. Persamaan kontinuitas yang diterapkan pada dua penampang di sepanjang sebuah tabung aliran dalam keadaan *steady*, sehingga:

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (\text{Steeter, 1985:94}) \quad (2-6)$$

Dengan : ρ = massa jenis $[\text{kg/m}^3]$

A = luas penampang pipa $[\text{m}^2]$

V = kecepatan aliran fluida dalam pipa $[\text{m/s}]$

2. Hukum Bernoulli

Dalam mendapatkan persamaan *Bernoulli* terdapat asumsi-asumsi yang harus diperhatikan yaitu alirannya tidak mengalami perubahan kecepatan (*steady*), tanpa

gesekan antara fluida dengan permukaan saluran atau pipa, tak mampu mampat (*incompressible*), dan massa jenis fluida (ρ) konstan.

$$W = m \cdot g \cdot Z + m \cdot \frac{P}{\rho} + m \cdot \frac{V^2}{2} \quad (\text{Streeter, 1985:4}) \quad (2-7)$$

Dari dua hukum diatas kita dapat menghitung kecepatan suatu fluida jika diketahui suhu bola basah dan suhu bola keringnya yaitu:

- Mencari kelembaban, entalpi, dan volume spesifik Dari data empiris pada saat pengamatan serta data-data yang diolah, maka dengan tabel psikometri
- Perhitungan debit aliran yang keluar dari evaporator pada ujung *air duct*. Untuk menghitung debit aliran lewat alat ukur, menggunakan rumus gabungan kontinuitas dengan *Bernoulli*, yaitu:

$$\dot{m} = C \cdot A \cdot \sqrt{\frac{P}{v}} \quad (\text{kg/s})$$

Dimana:

P = beda tekanan yang terjadi saat udara mengalir lewat orifice (mmH₂O)

v = volume spesifik udara ; dicari dari diagram psikometri berdasarkan nilai dari T_D dan T_W (m³/kg)

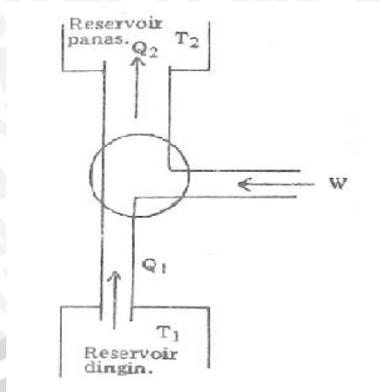
C = Konstanta orifice

- Untuk menghitung kecepatan aliran udara menggunakan rumus kontinuitas seperti yang dijelaskan pada rumus 2-6.

2.7 Mesin Pendingin

2.7.1 Pengertian mesin pendingin

Mesin pendingin adalah mesin konversi energi yang menyerap panas (Q_1) dari reservoir bertemperatur rendah (*low temperatur region*) dan memberikan panas (Q_2) ke reservoir bertemperatur lebih tinggi (*high temperatur region*) dengan menambah kerja dari luar. Mesin pendingin adalah suatu peralatan yang digunakan untuk mendinginkan suatu materi sehingga mencapai temperatur dan kelembaban yang diinginkan, dengan jalan menyerap kalor dari materi yang akan dikondisikan. Diagram alir mesin pendingin dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3. Diagram alir mesin pendingin Carnot
Sumber: Nainggolan (1994: 109)

Dari diagram alir diatas dapat dibuat hubungan seperti rumus 2-7 berikut:

$$W = Q_2 - Q_1 \quad (\text{Cengel, 2005: 517}) \quad (2-7)$$

keterangan:

Q_1 : panas yang diserap dari Reservoir Dingin (*Low temperature region*)

Q_2 : panas yang diberikan ke Reservoir Panas (*High temperature region*)

W : kerja dari luar

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*) yang dilakukan oleh kompresor. Sedangkan siklus absorpsi disebut sebagai siklus yang dioperasikan oleh kalor (*heat-operated cycle*) karena sebagian besar kerja operasi mesin ini berkaitan dengan pemberian kalor pada generator yang digunakan 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*).

2.7.2 Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap

Mesin pendingin dengan siklus kompresi adalah jenis mesin pendingin yang kerjanya berasal dari kompresor. Penyerapan panas dilakukan dalam evaporator yang mempunyai temperatur dan tekanan rendah. Didalam evaporator, refrigeran berubah dari fase cair menjadi fase gas, lalu masuk ke kompresor. Karena kerja kompresor, refrigeran menjadi gas yang bertemperatur dan bertekanan tinggi. Untuk melepaskan

panas yang diserap oleh evaporator, refrigeran diembunkan didalam kondensor sehingga refrigeran menjadi cair. Sebelum refrigeran memasuki evaporator, refrigeran diekspansikan melalui katup ekspansi terlebih dahulu.

Beberapa keunggulan dari mesin pendingin siklus kompresi uap adalah:

- Pengoperasiannya mudah dan tahan lama
- Konstruksinya sederhana
- Bila terjadi kerusakan mudah diperbaiki

2.7.2.1 Bagian-bagian utama mesin pendingin kompresi uap

1. Unit Kompresor

Unit kompresor terdiri dari motor penggerak dan kompresor. Kompresor merupakan alat yang digunakan untuk memampatkan udara atau gas. Kompresor berperan untuk menghisap dan menekan refrigeran, sehingga refrigeran beredar dalam unit mesin refrigerasi. Untuk mengkompresikan dan memampatkan refrigeran yang berwujud uap jenuh kering dari evaporator menuju ke kondensor sehingga pada saat memasuki kondensor refrigeran tersebut berwujud uap panas lanjut. Proses ini berlangsung secara *adiabatic reversible* dalam istilah lainya disebut *isentropic*. Sedangkan motor penggerak berfungsi memutar kompresor itu sendiri. Rumah kompresor ini terbuat dari baja seperti terlihat pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4. Kompresor jenis rotari

Sumber : <http://www.blog.qualitytechnic.com/2011/06/kompresor-ac-split.html>

2. Kondensor

Pada siklus refrigerasi, kondensor berfungsi melepaskan panas dari refrigeran yang dihisap pada evaporator secara *isobarik*. Pada kondensor terjadi perubahan fase

refrigeran dari uap panas lanjut menjadi fase cair. Kondensor adalah satu dari dua buah alat pada sistem mesin pendingin yang merupakan sebuah *heat exchanger* (alat penukar kalor). Kondensor yang paling banyak digunakan adalah tipe tabung dan pipa (*shell and tube*). Gambar kondensor tampak pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Kondensor

Sumber : http://forum.otomotifnet.com/otoweb/include/print.php?ar_id=10425

3. Evaporator

Evaporator pada mesin pendingin berfungsi untuk 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 2.6 dibawah ini:



Gambar 2.6. Evaporator

Sumber : http://cnfg.en.alibaba.com/product/258563607-209445664/ac_evaporator

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 *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 disebut air kondensat. Air ini juga akan membersihkan kotoran-kotoran yang menempel pada kisi-kisi evaporator, karena kotoran itu akan turun bersama air. Pada evaporator terjadi dampak atau efek pendinginan yang apabila dikalikan dengan laju aliran masa refrigeran akan merupakan nilai dari kapasitas pendinginan pada mesin pendingin.

4. Alat Ekspansi

Elemen dasar yang terakhir dalam daur refrigerasi kompresi uap yaitu alat ekspansi. Alat ekspansi ini memiliki dua kegunaan yaitu menurunkan tekanan refrigeran cair dan mengatur aliran refrigeran ke evaporator agar dapat menguap semua pada proses evaporasi. Selain itu terjadi penurunan suhu refrigeran dan kenaikan entropi refrigeran secara *isoenthalpi*. Dan terjadi perubahan fase refrigeran dari fase cair menjadi uap jenuh.

Jenis alat ekspansi yang paling populer untuk sistem refrigerasi berukuran sedang adalah katup ekspansi termostatik. Namun pengendaliannya tidak digerakkan oleh suhu didalam evaporator tetapi oleh besarnya panas lanjut gas hisap yang meninggalkan evaporator. Katup ekspansi panas lanjut mengatur laju aliran refrigeran cair yang besarnya sebanding dengan laju penguapan di dalam evaporator. Gambar katup ekspansi dapat dilihat pada gambar 2.7.

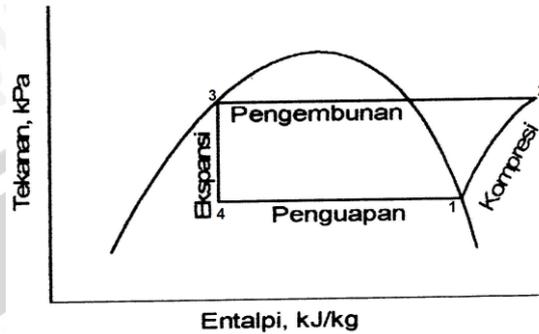


Gambar 2.7. Alat ekspansi

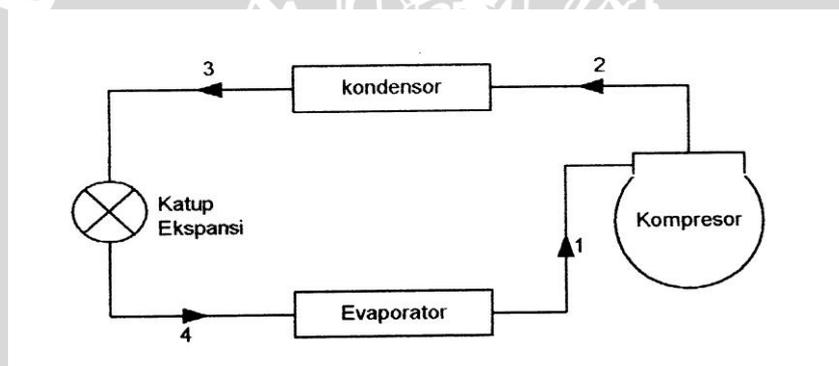
Sumber : <http://jempolsemua.blogspot.com/2010/02/ac-mobil.html>

2.7.2.2 Siklus pada mesin pendingin kompresi uap

Siklus kompresi uap pada diagram tekanan-entalpi (p-h diagram) dan diagram skematik komponen mesin pendingin siklus kompresi uap dapat dilihat pada gambar 2.8 dan 2.9 sebagai berikut:



Gambar 2.8. Diagram tekanan-entalpi (p-h diagram)
Sumber: Stoecker (1992: 187)



Gambar 2.9. Diagram skematik komponen mesin pendingin siklus kompresi uap
Sumber: Stoecker (1996: 187)

keterangan gambar:

- 1 – 2 : kompresi secara isentropik pada kompresor.
 - 2 – 3 : pelepasan kalor dan pengembunan secara isobarik pada kondensor.
 - 3 – 4 : ekspansi secara isoentalpi pada katup ekspansi.
 - 4 – 1 : penyerapan kalor dan penguapan secara isobarik pada evaporator.
- pada proses itu terjadi perubahan-perubahan, yaitu:

- Pada kompresor (1 – 2)
 - Tekanan, temperatur, dan entalpi naik.
 - Perubahan fase dari uap jenuh kering menjadi uap panas lanjut.
- Pada kondensor (2 – 3)

- Tekanan konstan, temperatur dan entalpi turun.
- Terjadi perubahan fase dari uap panas lanjut menjadi cair.
- Pada katup ekspansi (3 – 4)
 - Entalpi konstan, tekanan dan temperatur turun.
 - Terjadi perubahan fase dari cair menjadi uap jenuh.
- Pada evaporator (4 – 1)
 - Tekanan konstan, temperatur dan entalpi naik.
 - Terjadi perubahan fase dari uap jenuh menjadi uap jenuh kering.

Unjuk Kerja mesin pendingin meliputi:

Pada mesin pendingin ini terdapat beberapa istilah penting sebagai berikut:

a. Efek refrigerasi

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

$$q_1 = h_1 - h_4 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.8)$$

b. Kerja kompresi

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

$$W = h_2 - h_1 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.9)$$

c. Koefisien prestasi

Istilah prestasi di dalam siklus refrigerasi disebut dengan koefisien prestasi (KP) atau *COP (coefficient of performance)*, yang dirumuskan sebagai berikut:

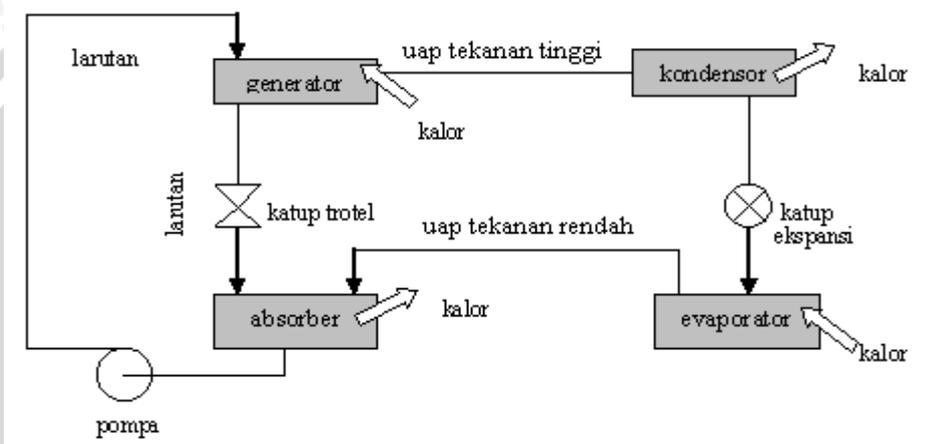
$$KP = \frac{Q_1}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (\text{Stoecker; 1996:178}) \quad (2.10)$$

dengan:

- h_1 = Entalpi keluar evaporator (kJ/kg)
- h_2 = Entalpi masuk kondensor (kJ/kg)
- h_3 = Entalpi keluar kondensor (kJ/kg)
- h_4 = Entalpi masuk evaporator (kJ/kg)

2.7.3 Mesin pendingin dengan siklus absorpsi

Pada mesin pendingin 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 dapat dilihat pada gambar 2.10. berikut:



Gambar 2.10. Diagram skematik komponen mesin pendingin siklus absorpsi
Sumber: Stoecker (1996: 309)

2.8 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.

2.8.1 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 penomeran	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 (1996: 279)

Refrigeran halokarbon seperti pada tabel 2.1 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.

Beberapa refrigeran anorganik dapat dilihat pada tabel 2.2 dibawah ini:

Tabel 2.2 Beberapa Refrigeran Anorganik

Ketentuan penomeran	Nama kimia	Rumus kimia
717	Amonia	NH_3
718	Air	H_2O
729	Udara	
744	Karbon dioksida	CO_2
764	Sulfur dioksida	SO_2

Sumber: Stoecker (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. Dapat dilihat pada tabel 2.3 dibawah ini

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 (1996: 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.

2.8.2 Dasar pemilihan refrigeran

Di dalam 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.

2.9 Campuran Gas

Untuk menentukan propertis 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 dibawah ini:

$$m_m = \sum_{i=1}^k m_i \quad \text{dan} \quad N_m = \sum_{i=1}^k N_i \quad (\text{Cengel, 2005: 682}) \quad (2.11)$$

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 dibawah ini:

$$m_f_i = \frac{m_i}{m_m} \quad \text{dan} \quad y_i = \frac{N_i}{N_m} \quad (\text{Cengel, 2005: 682}) \quad (2.12)$$

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 propertis 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:

$$U_m = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k m_i u_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{u}_i \quad (\text{kJ}) \quad (2.13)$$

$$H_m = \sum_{i=1}^k H_i = \sum_{i=1}^k m_i h_i = \sum_{i=1}^k N_i \bar{h}_i \quad (\text{kJ}) \quad (2.14)$$

$$S_m = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k m_i s_i = \sum_{i=1}^k N_i s_i \quad (\text{kJ/K}) \quad (\text{Cengel, 2005: 689}) \quad (2.15)$$

Berdasarkan logika diatas perubahan energi dalam, entalpi, dan entropi dari campuran gas selama proses berlangsung dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta U_m = \sum_{i=1}^k \Delta U_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta u_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{u}_i \quad (\text{kJ}) \quad (2.16)$$

$$\Delta H_m = \sum_{i=1}^k \Delta H_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta h_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta \bar{h}_i \quad (\text{kJ}) \quad (2.17)$$

$$\Delta S_m = \sum_{i=1}^k \Delta S_i = \sum_{i=1}^k m_i \Delta s_i = \sum_{i=1}^k N_i \Delta s_i \quad (\text{kJ/K}) \quad (\text{Cengel, 2005: 689}) \quad (2.18)$$

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 dibawah ini:

$$u_m = \sum_{i=1}^k m f_i u_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{dan} \quad \bar{u}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{u}_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (2.19)$$

$$h_m = \sum_{i=1}^k m f_i h_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{dan} \quad \bar{h}_m = \sum_{i=1}^k y_i \bar{h}_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (2.20)$$

$$s_m = \sum_{i=1}^k m f_i s_i \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{dan} \quad s_m = \sum_{i=1}^k y_i s_i \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (\text{Cengel, 2005:690}) \quad (2.21)$$

2.9.1 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). Tetapi

LPG mempunyai kekurangan jika digunakan sebagai refrigeran, yaitu LPG mudah terbakar sehingga berbahaya jika digunakan sebagai refrigeran. Penggunaan hidrokarbon termasuk LPG sebagai refrigeran harus memperhatikan *safety* karena sifatnya yang *flammable*. Hammad (1999) membandingkan sifat termodinamika dari R12 dan hidrokarbon yaitu temperatur kritis dari *propane* adalah 97°C, Butane 152°C, dan *Isobutane* 135°C.

2.9.2 Karbondioksida (CO₂)

Karbondioksida atau nama kimianya CO₂ merupakan salah satu jenis refrigeran anorganik. Salah satu alasan mengapa CO₂ sekarang jarang digunakan yaitu karena CO₂ membutuhkan tekanan kompresor yang tinggi yaitu berkisar antara 30-60 bar 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).

2.10 Inhibitor

Inhibitor adalah zat yang menghambat atau menurunkan laju reaksi kimia. Sifat *inhibitor* berlawanan dengan katalis, yang mempercepat laju reaksi (Wikipedia, 2010). Di bidang kimia reaksi, Missen (1999) mendefinisikan *inhibitor* sebagai sebuah senyawa yang mampu menurunkan aktifitas enzim yang tampak. Dengan kata lain *inhibitor* adalah bahan yang mampu menghambat atau menurunkan laju reaksi kimia. Molekul-molekul *inhibitor* akan terurai dan bekerja mengganggu rantai reaksi kimia pembakaran, sehingga reaksi kimia pembakaran akan terhambat. Tingkat penguraian molekul *inhibitor* dan konsentrasi *inhibitor* pada campuran pembakaran akan mempengaruhi laju kecepatan reaksi pembakaran. Makin tinggi tingkat penguraian molekul *inhibitor* dan konsentrasi *inhibitor* akan makin memperlambat laju reaksi pembakaran (Chakraborty et.al, 1975).

LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) adalah salah satu refrigeran hidrokarbon yang mempunyai kekurangan yaitu mudah terbakar (*flammable*) oleh karena itu agar refrigeran ini aman digunakan dan tidak mudah terbakar maka dicampur dengan salah satu *inhibitor* yang sekaligus salah satu refrigeran yaitu karbondioksida (CO₂). Karbondioksida merupakan salah satu refrigeran alami yang memiliki kemampuan bersifat sebagai *inhibitor* (Sunil, 1974).

2.11 Hipotesa

Berdasarkan teori yang telah disampaikan diatas, semakin besar penambahan campuran *inhibitor* gas CO₂ dalam LPG menyebabkan menurunnya nilai entalpi dan meningkatnya kerja kompresor, maka unjuk kerja yang dihasilkan oleh mesin pendingin menurun pula.

