

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian-Penelitian Sebelumnya

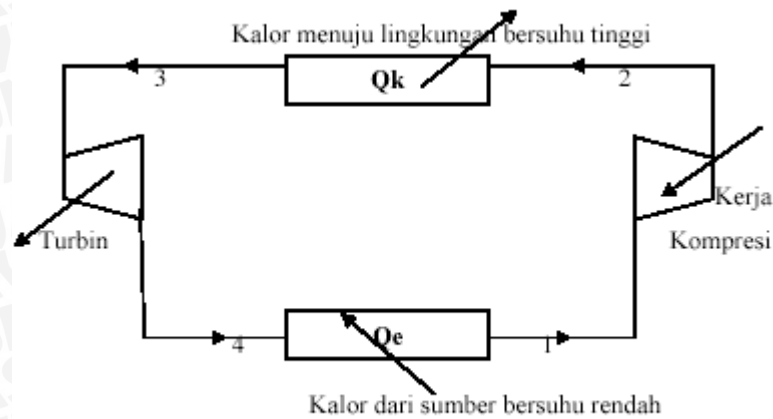
Yunianto (2005), melakukan penelitian tentang “Pengaruh Perubahan Temperatur Evaporator Terhadap Prestasi *Air Cooled Chiller*, Pada Temperatur Kondensor Tetap”. Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan data prestasi sistem pendingin (*air cooled chiller*) akibat perubahan beban pendinginan. Setiap perubahan beban pendinginan akan menimbulkan perubahan temperatur evaporator sementara temperatur kondensor dipertahankan tetap. Temperatur evaporator diatur dari  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  hingga  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan temperatur kondensor dipertahankan  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hasil pengujian menunjukkan terjadinya perubahan prestasi pendinginan (kapasitas refrigerasi, kerja kompresi dan COP), yaitu dengan kenaikan temperatur evaporator tersebut didapat peningkatan prestasi sistem (COP) sebesar 31,4%.

I Made Gunadiarta (2006), melakukan penelitian tentang “Pengaruh Kondisi Mula Udara Atmosfer Terhadap Prestasi Instalasi AC”. Bagian utama dari penelitian ini adalah 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.

### 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 (1998:618)

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, 1992:1).

### 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 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  $T = t$  °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 ( $\rho$ ) 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 [kg/m<sup>3</sup>].

## 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:

$$c_p = \begin{cases} 1,0 \text{ [kJ/kg.K]} & \text{udara kering} \\ 4,19 \text{ [kJ/kg.K]} & \text{air} \\ 1,88 \text{ [kJ/kg.K]} & \text{uap air} \end{cases}$$

## 5. Entalpi

Entalpi ( $h$ ) adalah energi kalor yang dimiliki suatu bahan per satuan massa [kJ/kg]. Suatu perubahan entalpi ( $\Delta h$ ) 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.

## 6. Entropi

Entropi ( $s$ ) adalah energi kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan  $1^\circ$  temperatur setiap satuan massa [ $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{K}$ ]. Dua sifat dari entropi adalah sebagai berikut:

- a. Jika suatu gas atau uap ditekan atau diekspansikan tanpa gesekan dan tanpa penambahan atau pelepasan kalor selama proses berlangsung maka entropi bahan tersebut tetap.
- b. 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 sepenuhnya kering 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  $5 \text{ m/s}$ . 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 diperoleh persamaan untuk rasio kelembaban sebagai berikut:

$$W = 0,622 \frac{P_s}{P_t - P_s} \quad (\text{Stoecker; 1992:41}) \quad (2.1)$$

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 ( $\phi$ )

Kelembaban relatif ( $\phi$ ) 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 ( $\phi$ ) dapat dinyatakan dengan:

$$\phi = \frac{P_s}{P_w} \quad (\text{Stoecker; 1992:40}) \quad (2.2)$$

dengan:

$\phi$  = Kelembaban relatif

$P_s$  = Tekanan uap air parsial

$P_w$  = Tekanan jenuh air murni pada suhu yang sama

#### 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 ( $v$ ) adalah:

$$v = \frac{R_a T}{P_t - P_s} \quad (\text{Stoecker; 1992:43}) \quad (2.3)$$

dengan:

$v$  = Volume spesifik [m<sup>3</sup>/kg udara kering]

$R_a$  = Tetapan gas untuk udara kering [J/kg.K]

$P_t$  = Tekanan atmosfer [Pa]

$$p_s = \text{Tekanan parsial uap air} \quad [\text{Pa}]$$

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.

7. Entalpi

$$h = C_p \cdot T \quad (2.4)$$

dengan:

$$h = \text{Entalpi} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$C_p = \text{kalor jenis} \quad [\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}]$$

$$T = \text{Temperatur} \quad [^\circ\text{C}]$$

**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; 1994:20).

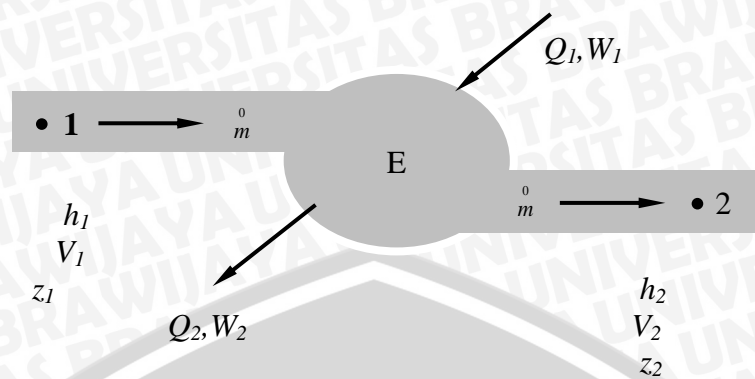
Ungkapan matematika untuk keseimbangan energi tersebut adalah:

$$m \left[ h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q - m \left[ h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] - W = \frac{dE}{d\theta} \quad (\text{Stoecker; 1992:20}) \quad (2.5)$$

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 menjadi:

$$m \left[ h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] + Q = m \left[ h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] + W \quad (\text{Stoecker; 1992:21}) \quad (2.6)$$





Gambar 2.2. Keseimbangan energi pada sebuah volume atur yang sedang mengalami laju aliran mantap  
 Sumber : Stoecker (1992:20)

dengan:

- $\dot{m}$  = Laju aliran massa [kg.det<sup>-1</sup>]
- $h$  = Entalpi [J.kg<sup>-1</sup>]
- $v$  = Kecepatan [m.det<sup>-1</sup>]
- $z$  = Ketinggian [m]
- $g$  = Percepatan gravitasi = 9,81 [m.det<sup>-2</sup>]
- $Q$  = Laju aliran energi dalam bentuk kalor [W]
- $W$  = Laju aliran energi dalam bentuk kerja [J.det<sup>-1</sup>]
- $E$  = Energi dalam sistem [J]

### 2.6 Mesin Pendingin

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 penaikan 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*).



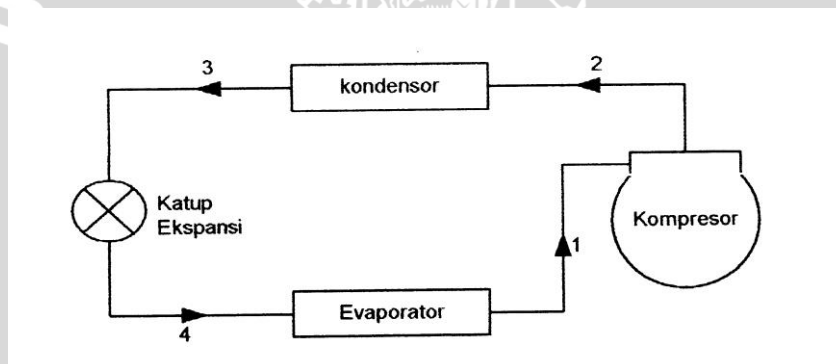
### 2.6.1 Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap

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.

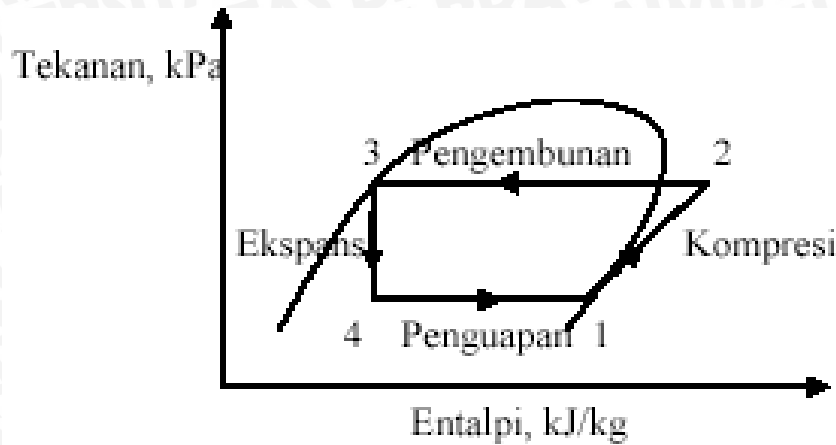
Instalasi mesin pendingin kompresi uap ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2.3 Diagram skematik komponen mesin pendingin siklus kompresi uap  
Sumber : Stoecker (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 (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:
 
$$h_3 = h_4 \quad (\text{Stoecker; 1994:186}) \quad (2.7)$$
- 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:

- 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 kalor yang dikompresikan kompresor setiap satuan massa refrigeran (kJ/kg).

$$W = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot [(P_2/P_1)^{k-1/k} - 1] \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.9)$$

dimana:

$T_1$  = temperatur refrigeran masuk kompresor [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$P_2$  = tekanan refrigeran keluar kompresor [kPa]

$P_1$  = tekanan refrigeran masuk kompresor [kPa]

$R$  = konstanta gas universal [kJ/kmol.K]

Berat molekul refrigeran R-22 = 86,5

Konstanta gas refrigeran  $R = 8,314/86,5 = 0,096$  [kJ/kg.K]

c. Kapasitas pendinginan

Kapasitas pendinginan adalah kemampuan mesin pendingin untuk menyerap kalor persatuan waktu. Penyerapan kalor ini terjadi di evaporator. Besarnya kapasitas pendinginan ( $Q_1$  atau  $Q_{ref}$ ) adalah:

$$Q_1 = m_{ref} (h_1 - h_4) \quad [\text{kW}] \quad (2.10)$$

d. Daya kompresor

Daya kompresor adalah kerja kompresor per satuan waktu. Besarnya daya kompresor ( $W$ ) adalah:

$$W = m_{ref} (h_2 - h_1) \quad [\text{kW}] \quad (2.11)$$

e. Koefisien prestasi

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

$$KP = \frac{q_1}{W} = \frac{h_1 - h_4}{\frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot [(P_2/P_1)^{k-1/k} - 1]} \quad (2.12)$$

Siklus mesin pendingin dapat dijelaskan pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 dimana proses dimulai dari kompresor yang menekan refrigeran ke kondensor kemudian didinginkan (dibuang kalor) sehingga refrigeran menjadi cair. Dari kondensor, refrigeran masuk ke katup ekspansi kemudian diekspansikan sehingga tekanan dan temperaturnya turun (dikabutkan), fase refrigeran berubah dari cair menjadi uap jenuh. Selanjutnya refrigeran uap jenuh masuk ke evaporator, dengan temperatur yang sudah

rendah maka akan mampu menyerap kalor dari produk yang didinginkan. 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 (Isobarik), 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.

### 2.6.2 Bagian-bagian utama pada mesin pendingin

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 (*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 dibawah ini.



Gambar 2.5. Kompresor jenis rotari  
Sumber : <http://www.ciptalestari.com>

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 berikut :

$$h_1 + q = h_2 + w \quad (\text{Stoecker; 1994:186}) \quad (2.13)$$

Karena proses berjalan secara adiabatik maka  $q$  bernilai nol sehingga persamaan menjadi :

$$w = (h_2 - h_1) \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]} \quad (\text{Stoecker; 1994:186}) \quad (2.14)$$

dengan:

$h_1$  = Entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap [kJ.kg<sup>-1</sup>]

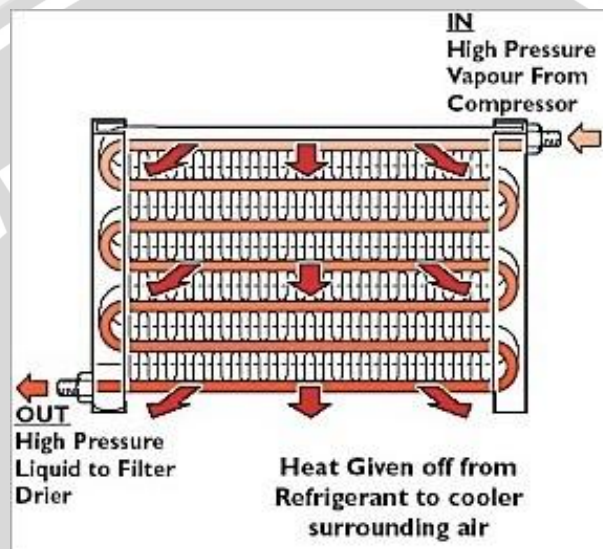
$h_2$  = Entalpi refrigeran pada daerah panas lanjut [kJ.kg<sup>-1</sup>]

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. Kondensator

Kondensator merupakan suatu komponen sistem refrigerasi yang dapat melepas kalor yang dikandung oleh refrigeran sehingga refrigeran yang mula-mula berbentuk uap akan menjadi cair. Kondensator ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Kondensator

Sumber : <http://faizolubaidillah.wordpress.com/>

Untuk meningkatkan jumlah kalor yang dilepas maka diperlukan bantuan hembusan udara dengan menggunakan kipas atau *blower*. Dalam kondensator 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 kondensator sama dengan selisih entalpi refrigeran pada sisi masuk dan pada sisi keluar kondensator dikali dengan laju aliran massanya. Pelepasan kalor dalam kilo joule per kilogram adalah perpindahan kalor dari refrigeran pada proses 2-3, sesuai persamaan berikut:

$$h_3 + q_c = h_2 + w \quad (\text{Stoecker; 1994:186}) \quad (2.15)$$

karena tidak dilakukan kerja maka:

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (\text{Stoecker; 1994:187}) \quad (2.16)$$

dengan:

$q_c$  = Pelepasan kalor terjadi dari kondensor [kJ.kg<sup>-1</sup>]

$h_3$  = Entalpi refrigeran pada daerah saturasi cair [kJ.kg<sup>-1</sup>]

### 3. Evaporator

Evaporator (Gambar 2.7) 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.



Gambar 2.7 Evaporator

Sumber : <http://anekapasar.blogspot.com/2010/07/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 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:

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (\text{Stoecker; 1994:187}) \quad (2.17)$$

dengan:

$q_e$	= Penyerapan kalor oleh refrigeran dalam evaporator	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$h_1$	= Entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$h_4$	= Entalpi refrigeran pada daerah campuran	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]

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

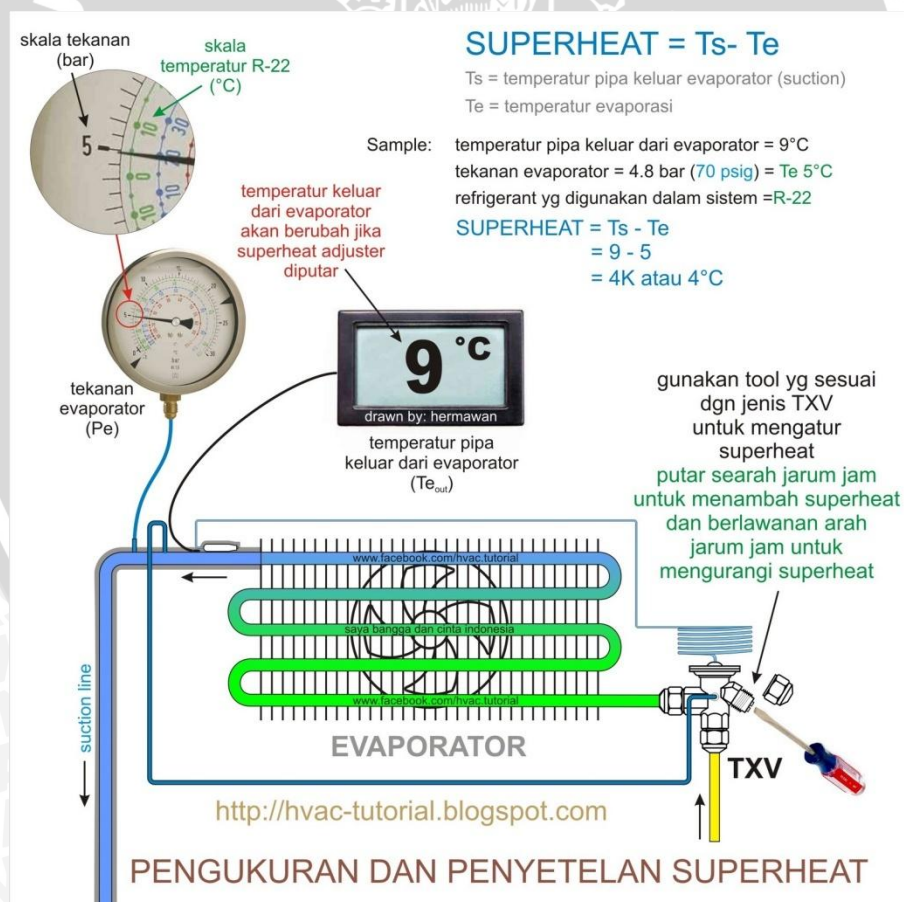
Alat ekspansi adalah alat yang digunakan untuk menurunkan tekanan refrigeran sehingga refrigeran cair berubah menjadi uap jenuh. Pipa kapiler dibuat dari tembaga dengan diameter lubang dalam yang sangat kecil. Panjang dan lubang pipa kapiler dapat mengontrol jumlah bahan pendingin yang masuk evaporator. 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 (*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 (*Thermostatic Expansion Valve*) / TXV merupakan katup ekspansi berkendali panas lanjut yang berfungsi agar refrigeran

yang masuk evaporator sesuai dengan beban pendingin yang harus dilayani. Jika beban bertambah, maka cairan refrigeran di evaporator akan lebih banyak menguap, sehingga besarnya suhu panas lanjut di evaporator akan meningkat. Pada akhir evaporator diletakkan tabung sensor suhu dari TXV tersebut. Peningkatan suhu dari evaporator akan menyebabkan uap atau cairan yang terdapat di tabung sensor suhu tersebut akan menguap (terjadi pemuain) sehingga tekanannya meningkat. Pengukuran dan Penyetelan Tingkat *Superheating* Pada *Thermostatic Expansion Valve* (TXV) ditunjukkan pada Gambar 2.8

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 2.9



Gambar 2.8 Pengukuran dan Penyetelan Tingkat *Superheating* Pada *Thermostatic Expansion Valve* (TXV)

Sumber: <http://hvac-tutorial.blogspot.com>





Gambar 2.9 Alat ekspansi  
Sumber : <http://faizolubaidillah.wordpress.com/>

## 2.7 Refrigeran

Refrigeran adalah media pembawa kalor yang bersirkulasi di dalam mesin pendingin yang mana fasenya bisa dirubah dari uap menjadi cair ataupun sebaliknya. Untuk sistem refrigerasi kompresi uap, refrigeran menyerap panas di dalam evaporator pada temperatur dan tekanan rendah serta melepaskan panas pada kondensor pada tekanan serta temperatur tinggi.

### 2.7.1 Syarat-syarat 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 menimbulkan polusi.

8. Refrigeran tidak boleh mudah terbakar dan meledak.

### 2.7.2 Refrigeran R-22

Refrigeran R-22 merupakan salah satu jenis dari refrigeran kelompok senyawa halokarbon (halogen dan karbon). Senyawa halokarbon adalah Refrigeran yang memiliki satu atau lebih atom dari salah satu halogen yang tiga (*klirin, fluorin, bromin*). Ketentuan bilangan, nama kimia, dan rumus kimia sejumlah anggota kelompok ini yang ditemukan diperdagangan, dimuat dalam tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1 Refrigeran Halokarbon

Ketentuan penomeran	Nama kimia	Rumus kimia
11	Trikloromonofluorometana	$\text{CCl}_3\text{F}$
12	Diklorodifluorometana	$\text{CCl}_2\text{F}_2$
13	Monoklorotrifluorometana	$\text{CClF}_3$
22	Monoklorodifluorometana	$\text{CHClF}_2$
40	Metil klorida	$\text{CH}_3\text{Cl}$
113	Triklorotrifluoroetana	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$
114	Diklorotetrafluoroetana	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$

Sumber: Stoecker dan Jones (1987: 279)

### 2.8 Superheating

*Superheating* adalah suatu proses pemanasan lanjut pada evaporator yang mengakibatkan temperatur refrigeran keluar evaporator meningkat diatas temperatur uap jenuhnya sehingga fase refrigeran sebelum masuk kompresor berupa uap panas lanjut. *Superheating* merupakan salah satu modifikasi didalam mesin pendingin disamping *subcooling* dan proses gabungan antara *superheating* dan *subcooling*.

Tujuan dari modifikasi adalah untuk melakukan perubahan pada instalasi agar efektivitas/COP meningkat. Evaporator akan menyerap panas kedalam sistem. Pada waktu refrigeran mendidih pada temperatur yang lebih rendah dari substansi yang didinginkan, refrigeran tersebut menyerap panas dari substansi tersebut. Evaporator akan menguapkan refrigeran cair ke bentuk gas. Pada akhir evaporator refrigeran sudah dalam bentuk gas murni. Tetapi karena gas refrigeran tersebut masih bertemperatur lebih rendah dari lingkungan sekitarnya membuat proses penyerapan kalor masih terjadi. Proses pemanasan lanjutan pada tekanan tetap setelah melampaui batas uap jenuh inilah yang disebut *superheating*.

Proses ini terjadi pada berbagai lokasi dalam sistem refrigerasi, salah satu contoh adalah sebelum refrigeran masuk ke kompresor. Proses *superheating* ini dimulai setelah refrigeran meninggalkan evaporator dan berlanjut sepanjang suction line sampai masuk ke kompresor. Refrigeran yang keluar dari kompresor sudah pasti mengalami *superheating*. Besarnya tingkat *superheating* ini dihitung dengan cara mengurangi temperatur sebenarnya dengan temperatur saturasinya.

Salah satu manfaat *superheating* adalah menghindari *blocking* pada kompresor. *Blocking* adalah keadaan dimana pada ruang kompresi pada kompresor masih terdapat fluida cair sehingga piston tidak bisa mengkompresi fluida kerja secara maksimal dan bisa mengakibatkan kerusakan pada kompresor. Jadi, dengan menggunakan proses *superheating* pada mesin pendingin, *blocking* pada kompresor dapat dihindari karena fase refrigerant masuk kompresor sudah berupa uap panas lanjut.

Adapun dengan menggunakan proses *superheating*, kerja kompresi akan semakin meningkat. Hal ini ditunjukkan pada rumus di bawah ini:

$$W = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot [(P_2/P_1)^{k-1/k} - 1] \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.18)$$

Dimana:

$k$  = konstanta adiabatik = 1,4

$T_1$  = temperatur refrigeran masuk kompresor [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$P_2$  = tekanan refrigeran keluar kompresor [kPa]

$P_1$  = tekanan refrigeran masuk kompresor [kPa]

$R$  = konstanta gas universal [kJ/kmol.K]

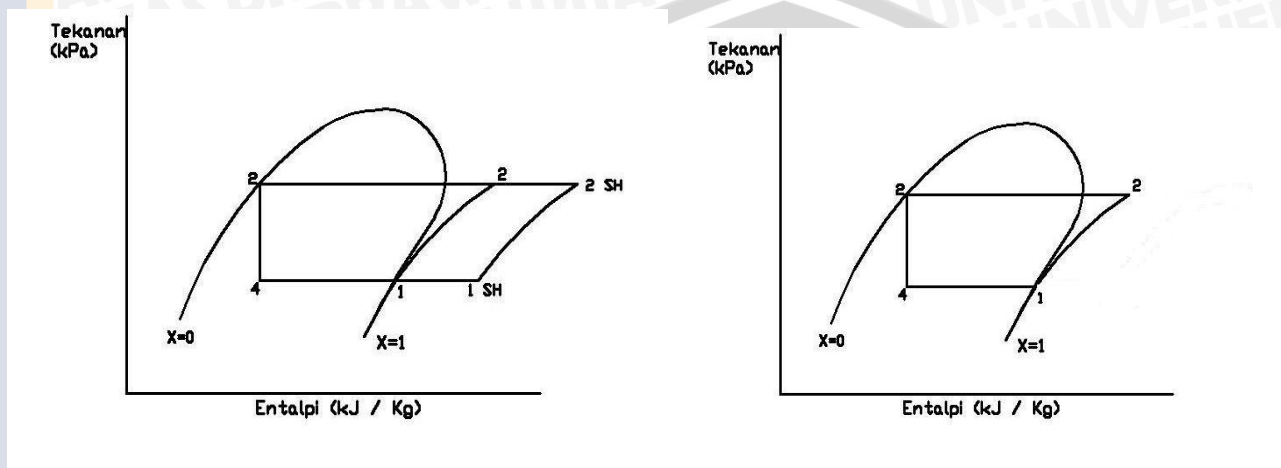
Berat molekul refrigeran R-22 = 86,5

Konstanta gas refrigeran  $R = 8,314/86,5 = 0,096$  [kJ/kg.K]

Dapat dilihat pada rumus 2.17 bahwa dengan semakin meningkatnya  $T_1$  dan perbandingan tekanan ( $P_2/P_1$ ) dengan konstanta refrigeran dan adiabatik yang tetap maka kerja kompresi yang terjadi akan semakin meningkat.

### 2.8.1 Siklus mesin pendingin dengan *superheating*

Siklus mesin pendingin dengan *superheating* ditunjukkan pada Gambar 2.9



Gambar 2.10 Perbandingan antara siklus mesin pendingin *superheating* dengan yang standar

Sumber: Dossat (1981:136)

Pada siklus p-h (tekanan-entalpi) diatas terlihat bahwa dengan proses *superheating*, maka efek refrigerasi yang dihasilkan menjadi lebih besar. Siklus dengan proses *superheating* menjadi (1<sub>SH</sub>-2<sub>SH</sub>-3-4).

Pada siklus mesin pendingin standar nilai dari efek refrigerasi dan kerja kompresi,

$$q_1 = (h_1 - h_4) \quad (2.19)$$

$$W = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot [ (P_2/P_1)^{k-1/k} - 1 ] \quad (2.20)$$

Sehingga nilai COP,

$$\text{COP} = \frac{q_1}{W} = \frac{(h_1 - h_4)}{\frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot [ (P_2/P_1)^{k-1/k} - 1 ]} \quad (2.21)$$

Pada siklus mesin pendingin dengan *superheating*, nilai efek refrigerasinya dan kerja kompresi,

$$q_{SH} = (h_{1SH} - h_4) \quad (2.22)$$

$$W_{SH} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{1SH} \cdot [ (P_{2SH}/P_{1SH})^{k-1/k} - 1 ] \quad (2.23)$$

Sehingga nilai COP<sub>SH</sub>,

$$\text{COP}_{\text{SH}} = \frac{q_{\text{SH}}}{w_{\text{SH}}} = \frac{(h_{1\text{SH}} - h_4)}{(h_{2\text{SH}} \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{1\text{SH}} \cdot [(P_{2\text{SH}}/P_{1\text{SH}})^{k-1/k} - 1] - h_{1\text{SH}})} \quad (2.24)$$

Baik efek refrigerasi dan kerja kompresi dengan proses *superheating* sama-sama mengalami peningkatan. Tapi peningkatan yang dialami efek refrigerasi lebih besar daripada yang dialami kerja kompresi. Maka dapat disimpulkan bahwa nilai COP dengan proses *superheating* lebih besar dibandingkan dengan COP standar.

## 2.9 Kerangka Berpikir

Tuntutan manusia akan kualitas hidup yang lebih baik mendorong pesatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi ini tidak hanya terfokus pada satu bidang tertentu saja, melainkan mencakup hampir seluruh bidang kehidupan. Salah satu bidang yang berkembang begitu pesat dan berperan besar dalam peningkatan kualitas hidup manusia adalah bidang *engineering* atau rekayasa.

Pada masa kini, para pengguna AC tidak hanya menginginkan kondisi ruangan yang nyaman, sehat dan ramah lingkungan, tetapi mereka juga memperhitungkan unjuk kerja dari AC tersebut. Karena unjuk kerja sangat erat kaitannya dengan performa dari suatu AC. Semakin efisien unjuk kerja, maka performa dari AC akan semakin tinggi dan biaya yang dikeluarkan juga lebih hemat.

*Superheating* merupakan salah satu upaya modifikasi siklus yang bertujuan untuk meningkatkan performa dari suatu mesin pendingin dengan cara melakukan pemanasan lanjut pada refrigeran yang keluar dari evaporator. Manfaatnya adalah temperatur refrigeran keluar evaporator akan semakin tinggi, entalpi semakin besar dan fase refrigeran menjadi uap panas lanjut sehingga COP akan meningkat dan kompresor terhindar dari *blocking*.

## 2.10 Hipotesa

Semakin besar tingkat *superheating* pada evaporator akan menyebabkan temperatur refrigeran keluar evaporator semakin tinggi dan mengakibatkan nilai dari entalpi bertambah sehingga akan meningkatkan nilai unjuk kerja dari suatu instalasi AC.