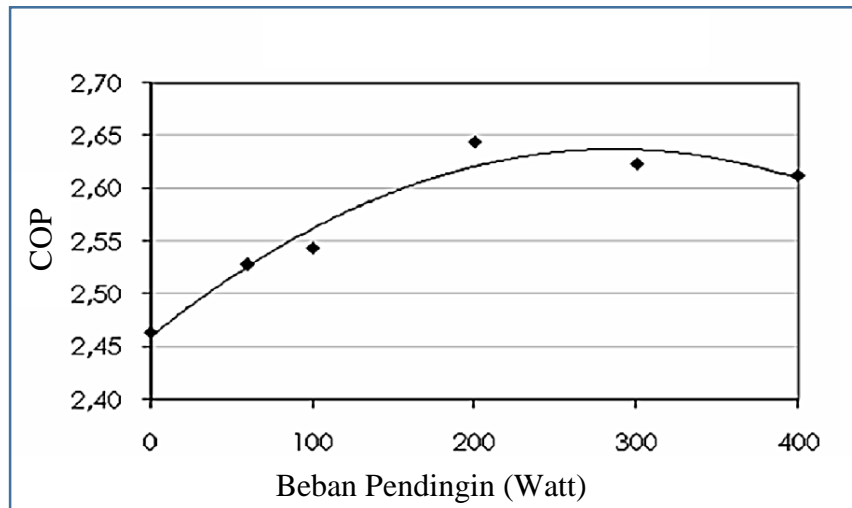


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Anwar (2010) melakukan penelitian tentang efek beban pendinginan terhadap performa sistem mesin pendingin. Metode pengambilan data yang dilakukan adalah dengan metode eksperimental dengan memberikan beban pendinginan berupa bola lampu dengan variasi daya 60, 100, 200, 300, dan 400 Watt ke dalam ruang pendingin (*cold box*). *Cold Box* terbuat dari plastik polipropilena dengan dimensi 55 cm x 55 cm x 56 cm yang diletakkan di depan evaporator yang dilengkapi dengan duaudukan lampu serta pengukur temperatur ruangan. Refrigeran yang digunakan adalah R-134a. Percobaan dilakukan menggunakan unit pengujian mesin pendingin HRP Focus Model 802. Setelah dilakukan pemasangan lampu dengan daya berbeda dan dilakukan pengambilan data temperatur pada setiap titik siklus, selanjutnya berdasarkan kondisi refrigeran dapat dihitung kapasitas refrigerasi dan COP sistem untuk setiap variasi beban pendinginan. Hasil penelitian dapat dilihat pada gambar 2.1.

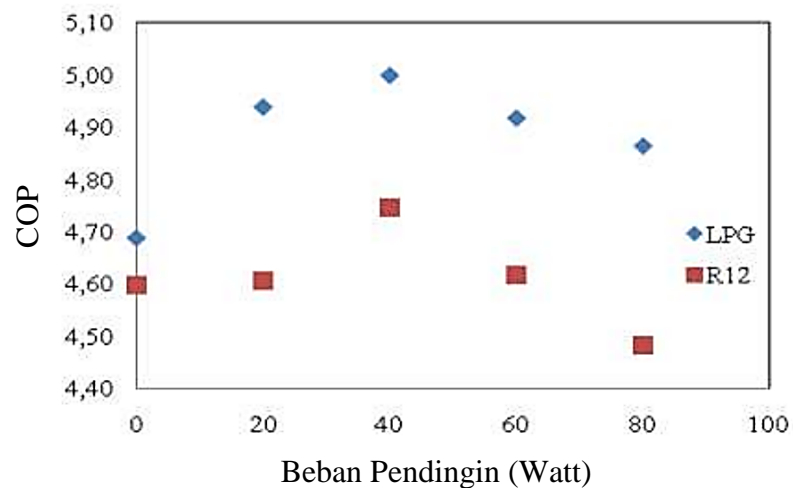


Gambar 2.1 Grafik hubungan beban pendingin terhadap COP (Anwar, 2010)

Dalam penelitian tersebut disimpulkan bahwa hubungan variasi beban pendinginan terhadap COP sistem membentuk kurva parabolik dimana posisi COP

optimal berada pada beban 200 watt dengan nilai COP sebesar 2,64 dan untuk pembebanan yang lebih besar justru COP akan mengalami penurunan.

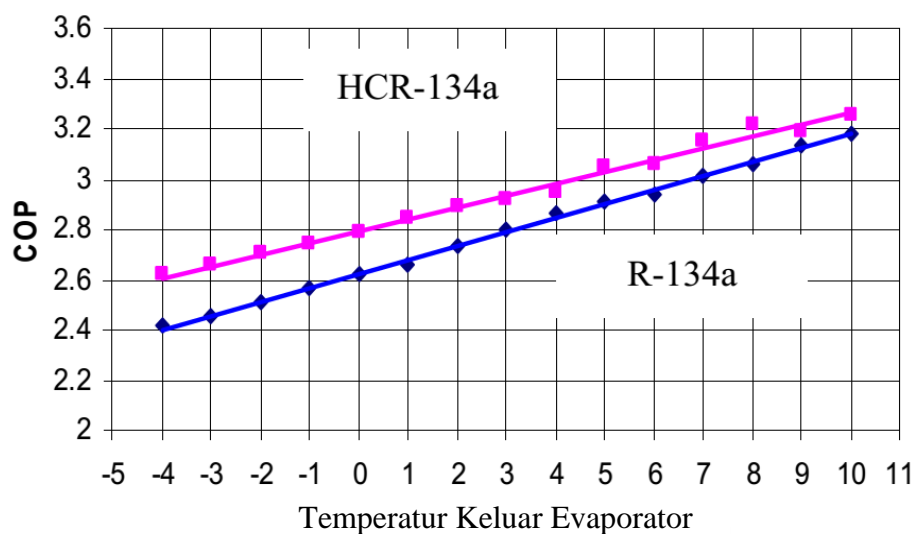
Selain penelitian diatas, Rizal, *et al.* (2013) juga meneliti tentang pengaruh variasi beban pendingin terhadap prestasi kerja mesin pendingin, penelitian ini menggunakan dua refrigeran yaitu R-12 dan LPG yang akan dibandingkan hasil pengujiannya terhadap prestasi kerja mesin pendingin. Metodologi penelitian yang digunakan adalah menggunakan metode eksperimental menggunakan kulkas satu pintu. Variasi beban pendinginan yang digunakan adalah dengan memasang lampu di dalam ruang pendingin dengan daya yang berbeda yaitu 20 watt, 40 watt, 60 watt, dan 80 watt. Teknik pengambilan data pada penelitian ini dengan menggunakan termokopel yang diletakkan di beberapa titik tertentu untuk pembacaan temperatur. Dari data temperatur maka akan didapat kondisi refrigerant pada tiap siklus, lalu dari kondisi tersebut dapat dihitung kapasitas refrigerasi dan COP sistem untuk setiap variasi beban daya lampu yang diberikan di ruang pendingin. Hasil penelitian dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik hubungan beban pendinginan terhadap COP menggunakan fluida kerja LPG dan R-12 (Rizal, *et al.* 2013)

Dalam penelitian tersebut disimpulkan bahwa penggunaan fluida kerja LPG dapat digunakan sebagai fluida kerja mesin pendingin dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan R-12 terbukti dengan nilai COP yang lebih besar dan juga temperatur evaporator yang dihasilkan lebih rendah.

Yunianto (2005) melakukan penelitian tentang pengaruh perubahan temperatur evaporator terhadap prestasi *air cooled chiller* dengan refrigeran R-134a, pada temperatur kondensor tetap. Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan data prestasi sistem pendingin (*air cooled chiller*) akibat perubahan beban. Metode pengambilan data pada penelitian tersebut menggunakan instalasi *air-cooled chiller* dengan kapasitas yang lebih kecil dari ukuran sebenarnya. Refrigeran yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah refrigeran R-134a dan air sebagai refrigeran kedua (*Brine*) untuk melengkapi data prestasi *air cooled chiller*. Instalasi *Air Cooled Chiller* yang digunakan dalam penelitian terdiri dari beberapa komponen utama yaitu evaporator, kondensor, pipa kepiler, kompresor ½ HP, dan *Fan Coil Unit* (FCU). Alat ukur yang digunakan antara lain termometer air raksa, *pressure gauge* dan *orifice*. Pengambilan dan variasi data dilakukan dengan menggunakan pengaturan temperatur evaporator dengan rentang temperatur -4 °C – 10 °C dengan cara mengatur debit aliran air dan mengatur kecepatan kipas fan coil unit. Temperatur pada sisi keluar kondensor diusahakan tetap 31 °C dengan menatur kecepatan fan kondensor. Selain menggunakan refrigeran R-134a, digunakan pula refrigeran jenis hidrokarbon HCR-134a sebagai pembandingan nilai prestasi yang dicapai dengan variasi yang sama. Hasil penelitian dapat dilihat pada tabel 2.3.



Gambar 2.3 Grafik Pengaruh Temperatur Keluar Evaporator Terhadap COP (Yunianto, 2005)

Dari gambar 2.3 terlihat bahwa koefisien prestasi cenderung naik seiring dengan kenaikan temperatur keluar evaporator. Terjadi kenaikan koefisien prestasi sebesar 31,4 %. Dari perbandingan kedua refrigerant terlihat bahwa dengan menggunakan hidrokarbon HCR-134a menghasilkan koefisien prestasi yang lebih tinggi daripada menggunakan refrigeran R-134a.

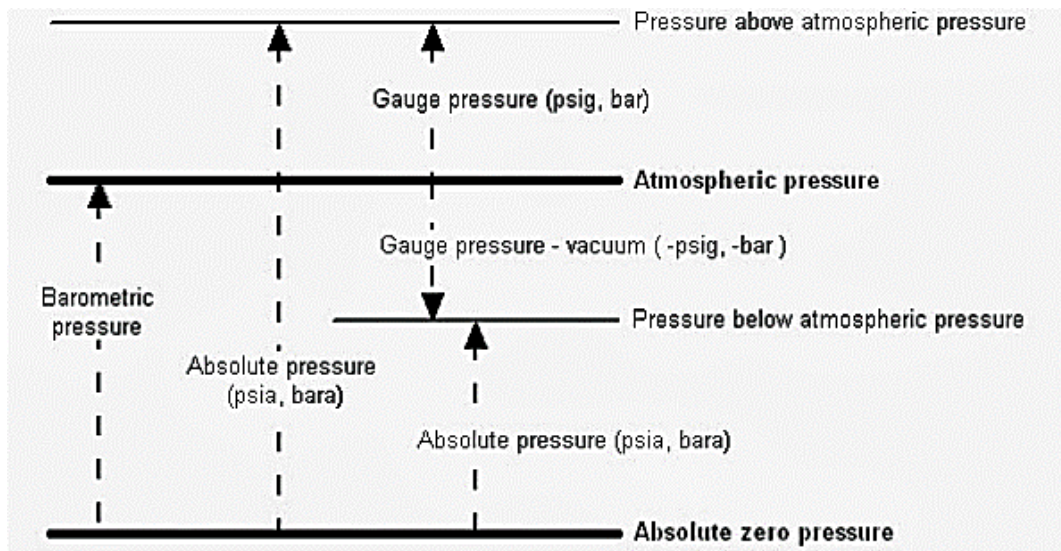
Dari tinjauan pustaka yang sudah diuraikan sebelumnya, terlihat bahwa kenaikan temperatur evaporator atau semakin besarnya beban pendinginan maka akan menaikkan COP dari mesin pendingin. Pada penelitian Anwar (2010) dan Rizal, *et al.* (2013) terlihat ada puncak performa mesin pendingin pada beban pendinginan tertentu lalu COP turun kembali akibat naiknya daya kompresor. Pada penelitian Yuniarto (2005) tidak terlihat puncak performa dimana pada rentang variasi tersebut terus terjadi kenaikan COP. Pada penelitian ini akan dibahas mengenai efek divariasikannya *cooling load* yang masuk ke evaporator, dengan menggunakan alat uji koefisien evaporasi, hampir sama dengan penelitian Yuniarto (2005), hanya saja kalor serapan evaporator murni berasal dari air pada bak evaporator, pipa kapiler yang berperan sebagai alat ekspansi digantikan oleh katup ekspansi, variasi yang digunakan adalah dengan mengubah laju aliran massa refrigeran dan laju aliran massa air yang masuk ke evaporator.

## **2.2 Dasar Teori**

### **2.2.1 Dasar Termodinamika**

Termodinamika adalah suatu disiplin ilmu yang mempelajari tentang energi dan yang berkaitan dengan sifat-sifat energi. Penentuan sifat termodinamika menjadi bagian penting dalam perancangan suatu sistem termal. Sifat adalah karakteristik bahan yang dapat disajikan secara kuantitatif, antara lain temperatur, tekanan, dan massa jenis (Stoecker dan Jones, 1996). Atau dengan kata lain sifat adalah segala sesuatu yang menjadi ciri khas suatu bahan tertentu. Kerja dan perpindahan kalor adalah sesuatu yang dilakukan oleh suatu sistem untuk mengubah sifat dari bahan tersebut. Sifat termodinamika suatu jenis bahan antara lain tekanan, temperatur, massa jenis, volume jenis, kalor jenis, entalpi, dan entropi. Penjelasan dari sifat-sifat diatas adalah sebagai berikut:

- a. Temperatur (T) adalah suatu satuan yang menyatakan ukuran panas-dinginnya dari suatu benda. Panas-dinginnya suatu benda berkaitan dengan energi termis yang terkandung dalam benda tersebut. Apabila energi termis yang terkandung dalam suatu bahan semakin besar maka temperaturnya semakin tinggi pula. Satuan temperatur yang biasa digunakan antara lain Celcius ( $^{\circ}\text{C}$ ), Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), Rankine (R), dan Kelvin (K). Satuan internasional untuk temperatur adalah Kelvin (K) sekaligus yang menjadi standar acuan temperatur nol absolut.
- b. Tekanan (P) adalah gaya yang diberikan atau diterima oleh suatu bahan persatuan luas. Tekanan gauge adalah tekanan yang dihitung dari tekanan atmosfer ( $10^5$  Pa). Sedangkan tekanan absolut dihitung dari tekanan vakum dibawah tekanan atmosfer (0 Pa). Untuk lebih jelasnya, pembagian satuan tekanan gauge dan atmosfer ditunjukkan pada gambar 2.4 Satuan yang biasa digunakan dalam pengukuran tekanan adalah psi, bar, dan  $\text{N}/\text{m}^2$  (Pa). Satuan internasional untuk tekanan adalah Pascal (Pa).



Gambar 2.4 Pembacaan tekanan gauge dan tekanan absolut (Nashir, 2014)

- c. Massa Jenis ( $\rho$ ) adalah jumlah massa yang mengisi satu satuan volume. Sedangkan volume jenis ( $v$ ) adalah kebalikan dari massa jenis, yaitu jumlah volume yang mengisi dalam satu satuan massa (Stoecker dan Jones, 1996). Persamaan matematis yang digunakan untuk menghitung massa jenis ditunjukkan oleh persamaan 2.1.

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots(2.1)$$

Sedangkan untuk volume jenis ditunjukkan oleh persamaan 2.2.

$$v = \frac{1}{\rho} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan:

- $\rho$  = Massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )
- $V$  = Volume fluida ( $\text{m}^3$ )
- $m$  = Massa fluida (kg)

- d. Kalor jenis ( $c$ ) adalah banyaknya kalor ( $Q$ ) yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur ( $T$ ) tiap satu satuan massa ( $m$ ) benda sebesar satu derajat. Satuan Internasional kalor jenis adalah  $\text{J/kg.K}$ . Persamaan yang digunakan untuk menghitung kalor jenis ditunjukkan pada persamaan 2.3.

$$c = \frac{Q}{m.\Delta T} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan:

- $c$  = Kalor Jenis ( $\text{J/kg.K}$ )
- $Q$  = Jumlah kalor (Joule)
- $m$  = Massa (kg)
- $\Delta T$  = Perubahan temperatur (K)

- e. Entalpi ( $h$ ) adalah energi kalor tiap satuan massa yang dimiliki oleh suatu zat pada suatu temperatur dan tekanan tertentu. Sifat entalpi juga dapat menyatakan laju perpindahan kalor untuk proses penguapan dan pengembunan, biasa disebut  $\Delta h$ . Jumlah entalpi dalam suatu tekanan dan temperatur juga dapat digunakan untuk meramalkan sifat dan fase suatu fluida tertentu. Satuan entalpi yang lazim digunakan adalah  $\text{kJ/kg}$  untuk SI atau  $\text{Btu/lb}$  untuk satuan british. Persamaan dasar entalpi ditunjukkan oleh persamaan 2.4.

$$h = U + PV \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan:

- $h$  = Entalpi ( $\text{kJ/kg}$ )
- $U$  = Energi dalam ( $\text{kJ/kg}$ )
- $P$  = Tekanan sistem (Pa)
- $V$  = Volume sistem ( $\text{m}^3$ )

- f. Entropi ( $S$ ) adalah salah satu besaran termodinamika yang mengukur kalor dalam sistem per satuan temperature.  $\Delta S$  adalah perubahan entropi yang

disebabkan oleh perubahan kalor tiap satuan temperatur. Hubungan perubahan entropi dengan perubahan kalor yang terjadi ditunjukkan pada persamaan 2.5.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan:

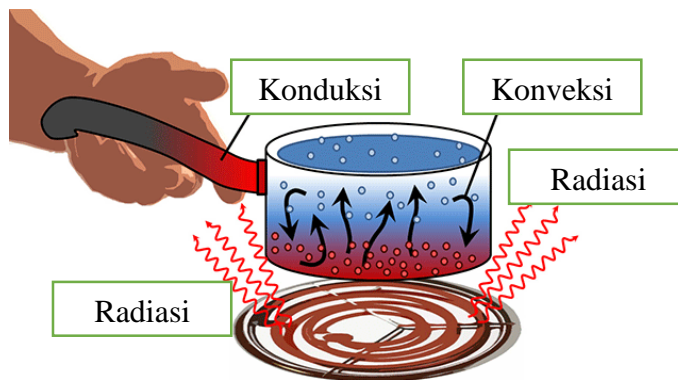
$\Delta S$  = Perubahan entropi (J/K)

$\Delta Q$  = Perubahan kalor (J)

T = Temperatur (K)

### 2.2.2 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah proses berpindahnya kalor (energi panas) dari satu zat ke zat lain. Perpindahan kalor pada dasarnya dibagi menjadi 3 jenis yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi (Stoecker dan Jones,1992). Perpindahan kalor merupakan suatu energi panas yang berpindah akibat perbedaan temperatur antara benda satu dengan benda yang lain. Kalor dikatakan dapat berpindah dari suatu tempat dengan temperatur yang tinggi ke tempat dengan temperatur yang lebih rendah. Ilustrasi perpindahan kalor ditunjukkan pada gambar 2.5



Gambar 2.5 Ilustrasi Perpindahan Kalor

Dari gambar 2.5 terlihat bahwa perpindahan kalor dibagi tiga menurut cara perambatannya yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Penjelasan lebih lanjut mengenai jenis perpindahan kalor adalah sebagai berikut:

a. Konduksi

Konduksi merupakan proses perpindahan kalor pada suatu medium tanpa diikuti perpindahan bagian-bagian medium itu sendiri. Perpindahan kalor jenis ini biasanya terjadi pada benda padat. Medium yang bisa mengalami perpindahan kalor konduksi biasanya bersifat konduktor seperti logam. Kalor mengalir pada

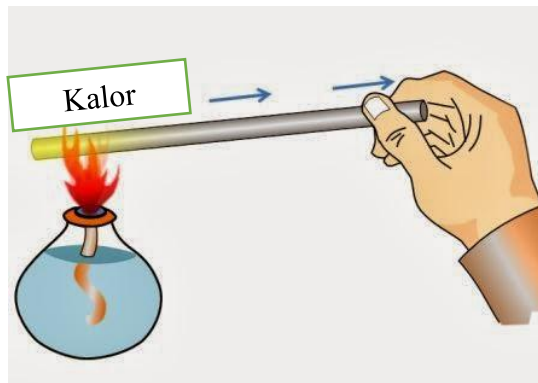
konduktor dari sisi yang bersuhu tinggi ke sisi yang bersuhu rendah. Akibatnya, ujung logam yang lain akan terasa panas. Laju perpindahan kalor konduksi pada suatu material dapat ditentukan dengan Hukum Fourier pada persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{kond} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

- $\dot{Q}_{kond}$  = Laju perpindahan kalor konduksi per satuan waktu (W)
- k = Konduktivitas termal material (W/m.°C)
- A = Luas penampang dialiri oleh kalor secara konduksi diukur tegak lurus arah aliran (m<sup>2</sup>)
- $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  = Gradien temperatur di arah x (°C/m)

Ilustrasi perpindahan kalor konduksi ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Perpindahan kalor konduksi

Sedangkan untuk nilai konduktivitas termal pada suatu material nilainya berbeda-beda, berikut ini beberapa nilai konduktivitas dari berbagai jenis material yang dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai Konduktivitas termal beberapa material pada 300 K  
(Dewitt dan Incropera, 2002)

Bahan	k (W/m.K)	Bahan	k (W/m.K)
Perak	429	Titanium	21,9
Tembaga	401	Kromium	93,7
Aluminium	237	Kobalt	99,2
Nikel	90,7	Magnesium	156
Besi	80,2	Tungsten	174
Baja karbon	60,5	Zink	116



Timbal	35,3	Kaca	1,4
Emas	317	Kayu Balsa	0,055

b. Konveksi

Perpindahan kalor konveksi adalah mekanisme perpindahan kalor antara medium yang satu dengan medium yang lain yang disertai dengan perpindahan molekul-molekul medium perantaranya. Medium perpindahan kalor konveksi biasanya berupa fluida seperti gas dan cairan. Ilustrasi perpindahan kalor konveksi ditunjukkan pada gambar 2.7. Persamaan dasar laju perpindahan kalor konveksi antara suatu permukaan terhadap fluida ditentukan dengan persamaan 2.7.

$$\dot{Q}_{konv} = h \cdot A \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan:

$\dot{Q}_{konv}$  = Laju perpindahan kalor konveksi per satuan waktu (W/m<sup>2</sup>)

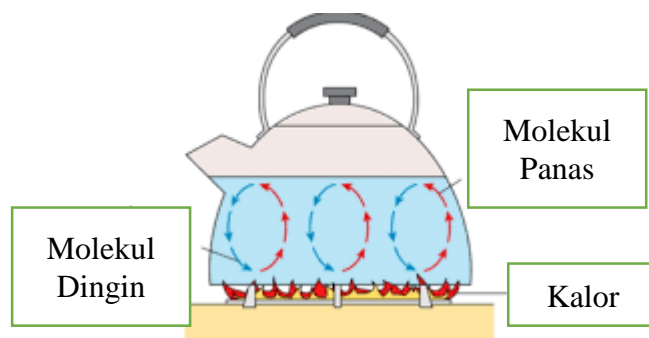
h = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m<sup>2</sup>.K)

A = Luas permukaan (m<sup>2</sup>)

$\Delta T$  = Beda temperatur antara T $\infty$  (fluida, °C) dengan Ts (permukaan, °C)

$\Delta T$  = Ts - T $\infty$  ,jika T $\infty$  < Ts

$\Delta T$  = T $\infty$  - Ts ,jika T $\infty$  > Ts



Gambar 2.7 Perpindahan kalor konveksi

Variabel berikut ini adalah variabel yang berpengaruh terhadap koefisien laju perpindahan kalor evaporasi, yaitu: skala panjang (L), konduktivitas termal fluida (k), kecepatan fluida (V), kerapatan ( $\rho$ ), viskositas ( $\mu$ ), panas jenis (Cp), terkadang dipengaruhi oleh faktor lain seperti perbedaan temperatur dinding yang berubah-ubah. Nilai koefisien perpindahan kalor konveksi dari beberapa jenis fluida ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai Koefisien Perpindahan Kalor Berdasarkan Jenis Fluida dan Aliran  
(Kharagpur, 2008)

<b>Jenis Fluida dan Aliran</b>	<b>Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi (W/m<sup>2</sup>.K)</b>
Udara atau gas, Konveksi Bebas	6-30
Air, Konveksi Bebas	20-100
Udara atau Uap Panas Lanjut, Konveksi Paksa	20-300
Oli, Konveksi Paksa	60-1800
Air, Konveksi Paksa	300-18000
Refrigeran, Pendidihan	500-3000
Air, Pendidihan	3000-60000
Refrigeran, Pendinginan	1500-5000
Uap Air (Panas), Pendinginan	6000-120000

Perpindahan kalor konveksi dapat diklasifikasikan menjadi dua menurut aliran konveksinya, yaitu:

1. Konveksi bebas

Konveksi bebas terjadi karena perbedaan kerapatan fluida yang disebabkan oleh gradien suhu.

2. Konveksi paksa

Konveksi paksa terjadi apabila gerakan pertukaran suhu karena pengaruh mekanis (energi dari luar) seperti pompa, kompresor, blower.

Perpindahan kalor konveksi berdasarkan fasa dibagi menjadi dua yaitu konveksi fasa tunggal dan konveksi dua fasa. Konveksi satu fasa terjadi pada satu fluida, yaitu cair atau gas. Sedangkan konveksi dua fasa dibagi menjadi dua yaitu:

1. Evaporasi

Evaporasi adalah proses perubahan molekul dari kondisi cair (seperti air) menjadi gas (uap air) dan terjadi pada temperatur yang tidak tertentu. Penjelasan tentang kondensasi dijelaskan pada sub-subbab berikutnya.

## 2. Kondensasi

Kondensasi adalah proses perubahan molekul dari kondisi gas menjadi cair akibat perubahan tekanan dan temperatur. Kondensasi terjadi ketika uap didinginkan menjadi cairan, tetapi dapat juga terjadi bila sebuah uap dikompresi (tekanan ditingkatkan) menjadi cairan, atau mengalami kombinasi dari pendinginan dan kompresi.

### c. Radiasi

Radiasi adalah jenis perpindahan kalor secara pancaran di mana energi kalor bergerak baik dengan perantara berupa udara ataupun dalam ruang hampa (vakum), dan akhirnya diserap oleh benda lain. Kalor bergerak dari benda bertemperatur tinggi ke benda bertemperatur rendah. Dengan kata lain kalor bisa berpindah tanpa tergantung ada atau tidaknya medium perantara. Energi yang dipancarkan suatu benda disebut daya pancar (*emissive power*) (Stoecker dan Jones, 1996). Ilustrasi perpindahan kalor radiasi ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Perpindahan Kalor Radiasi

Jumlah perpindahan kalor radiasi dapat dihitung dengan persamaan 2.8

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A_s \cdot T^4 \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan:

$\dot{Q}_{rad}$  = Perpindahan Kalor Radiasi per satuan waktu (W)

$\epsilon$  = Emisivitas (W/m<sup>2</sup>)

$\sigma$  = Konstanta Boltzmann ( $5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )  
 $T$  = Temperatur permukaan (K)

### 2.2.3 Perpindahan Kalor Evaporasi

#### a. Pengertian Evaporasi

Evaporasi adalah proses perubahan molekul dari kondisi cair (seperti air) menjadi gas (uap air) dan terjadi pada temperatur yang tidak tertentu. Umumnya proses evaporasi ini bisa dilihat dari lenyapnya cairan secara bertahap akibat perpindahan kalor. Proses evaporasi berbeda dengan proses pendidihan. Pendidihan terjadi akibat suatu cairan dipanaskan hingga melewati titik didihnya sehingga cairan tersebut menguap. Sedangkan evaporasi terjadi tidak harus melewati titik didihnya. Misalnya pada saat tubuh berkeringat, setelah beberapa lama keringat itu hilang dengan sendirinya karena menguap tanpa adanya pemanasan sampai melebihi titik didihnya. Peristiwa inilah yang dimaksud evaporasi.

Perbedaan mendasar dari proses evaporasi dan pendidihan ditampilkan dalam tabel 2.3

Tabel 2.3 Perbedaan antara Pendidihan dan Evaporasi

Pendidihan	Evaporasi
Terjadi apabila sudah mencapai titik didihnya	Bisa terjadi walaupun belum mencapai titik didihnya
Terjadi dalam cairan	Terjadi hanya dalam permukaan cairan
Terbentuk gelembung dalam cairan	Tidak terjadi gelembung dalam cairan
Prosesnya cepat	Prosesnya lambat
Suhu tetap selama mendidih	Biasanya diikuti oleh pendinginan
Energi untuk berubah wujud didapat dari sumber energy	Energi untuk berubah wujud didapatkan dari lingkungan

Berdasarkan gerak fluidanya, perpindahan kalor evaporasi dibedakan menjadi dua yaitu:

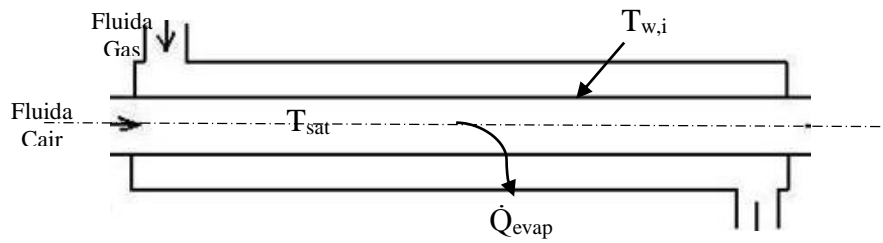
#### 1. Fluida Diam

Pada perpindahan kalor evaporasi jenis ini, fluida diam pada satu wadah lalu dipanaskan. Misalnya pada saat merebus air. Istilah lain dari perpindahan kalor evaporasi jenis ini adalah didih kolam.

## 2. Fluida Bergerak

Pada perpindahan kalor evaporasi jenis ini, fluida bergerak pada medium lalu dipanaskan. Misalnya pada proses pengujian koefisien evaporasi suatu refrigeran. Fluida melewati pipa lalu dipanaskan menggunakan sistem pemanas listrik. Istilah lain dari perpindahan kalor evaporasi jenis ini adalah didih alir.

Pada sistem pendingin, refrigeran menyerap kalor pada proses didih yang terjadi di evaporator, dan melepas panas atau kalor pada proses kondensasi yang terjadi di kondensor. Ilustrasi perpindahan kalor evaporasi ditunjukkan pada



gambar 2.9

Gambar 2.9 Ilustrasi Perpindahan Kalor Evaporasi

Perpindahan kalor evaporasi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.9.

$$\dot{Q}_{eva} = h_{eva} \cdot A_{s,i} \cdot (T_{w,i} - T_{sat}) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan:

- $h_{eva}$  = Koefisien perpindahan kalor evaporasi ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- $A_{s,i}$  = Luas penampang perpindahan kalor ( $m^2$ )
- $T_{w,i}$  = suhu dinding dalam saluran ( $^\circ C$ )
- $T_{sat}$  = suhu jenuh fluida di tengah saluran ( $^\circ C$ )

### b. Koefisien Perpindahan Kalor Evaporasi

Koefisien perpindahan kalor evaporasi dalam saluran halus horizontal tidak bisa langsung di dapatkan dengan cara analitik. Sifat fluida baik sifat fisik maupun sifat termodinamik yang menentukan koefisien tersebut berubah karena terjadinya perubahan fasa. Kondisi yang tidak simetris akibat pengaruh gravitasi semakin menyulitkan proses analisa. Sehingga penentuan koefisien perpindahan kalor evaporasi ditentukan dengan cara eksperimental dari hukum *Newton* tentang pendinginan (Santosa, 2003) dalam persamaan 2.10:

$$h_{eva} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{A_{s,i}(T_{w,i}-T_{sat})} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana:

- $\dot{Q}_{eva}$  = Perpindahan kalor evaporasi (W)
- $A_{s,i}$  = Luas penampang perpindahan kalor (m<sup>2</sup>)
- $T_{w,i}$  = suhu dinding dalam saluran (°C)
- $T_{sat}$  = suhu jenuh fluida di tengah saluran (°C)

#### 2.2.4 Prinsip Termal

Prinsip termal menjelaskan sifat dan fase fluida diantaranya:

- a. Temperatur Jenuh (*Saturation Temperature*) yaitu temperatur dimana fluida akan berubah fase, dari air menjadi gas maupun sebaliknya. Apabila fluida cair berada pada titik ini, maka fase cairan disebut cair jenuh, apabila uap pada titik ini disebut uap jenuh.
- b. Uap Panas Lanjut (*Superheated vapour*) yaitu fase dimana suatu fluida berada diatas temperatur uap jenuhnya. Untuk menjadikan suatu fluida menjadi uap panas lanjut diperlukan kerja dari luar baik berupa pemanasan atau penambahan tekanan diatas tekanan pada fase uap jenuh.
- c. Cairan dibawah dingin (*Subcooled liquid*) adalah fluida yang telah mencapai temperatur cair jenuhnya, kalor terus diserap hingga temperatur nya dibawah temperatur cair jenuhnya.
- d. Cairan terkompresi (*Compressed liquid*) adalah cairan yang menerima tekanan yang lebih besar dari tekanan yang berada pada temperatur jenuhnya.
- e. Bertambahnya tekanan akan menaikkan temperatur jenuh suatu fluida
- f. Kondensasi (*Condensation*) terjadi akibat pendinginan pada uap. Uap terkondensasi dan perlahan berubah fase menjadi cair. Ini dikarenakan uap tidak mampu bertahan pada temperature dibawah temperature jenuhnya. Selain dengan proses pendinginan, proses kondensasi juga dapat terjadi akibat penambahan tekanan pada temperatur konstan. Penambahan tekanan tersebut mengakibatkan naiknya densitas. Naiknya densitas menunjukkan perubahan fase menjadi semakin cair.

### 2.2.5 Penukar Kalor (*Heat Exchanger*)

Penukar kalor adalah sebuah alat yang di dalamnya terjadi perpindahan energi dari aliran fluida yang satu ke aliran fluida yang lain melalui permukaan pusat. Jadi penukar kalor merupakan gabungan dari perpindahan kalor secara konveksi dan konduksi. Penganalisaan penukar kalor, dengan fluida pertama, dinding, dan fluida kedua merupakan rangkaian termal hubungan seri (Stoecker dan Jones, 1996).

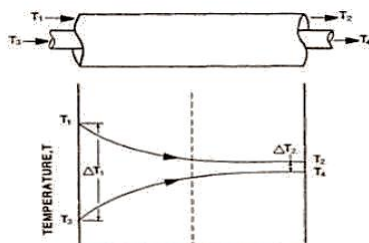
Berdasarkan fungsinya, ada beberapa macam *heat exchanger* yaitu :

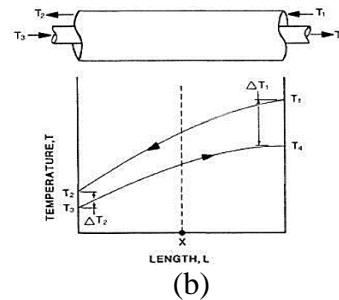
- Heater* berfungsi untuk memanaskan fluida, biasanya menggunakan pemanas berupa *steam*.
- Cooler* berfungsi untuk mendinginkan fluida, medium utama yang digunakan adalah air.
- Condensor* yang berfungsi untuk mengubah fluida dari fasa uap menjadi fasa cair dengan medium pendingin berupa air atau *refrigerant*.
- Vaporizer* yang berfungsi untuk mengubah fluida dari fasa cair menjadi fasa uap (penguapan cairan menjadi uap dengan medium pemanas berupa *steam* atau fluida kalor lain).
- Reboiler* yang berfungsi menguapkan kembali hasil bawah (*bottom*) menara destilasi dengan medium pemanas berupa *steam* atau lainnya.

Ada beberapa tipe penukar kalor, antara lain penukar kalor tipe pipa ganda, penukar kalor kompak, dan penukar kalor tipe *shell and tube*, *regenerative heat exchanger*, dan *direct contact heat exchanger*. Penjelasan dari beberapa tipe penukar kalor tersebut adalah sebagai berikut:

#### a. Alat Penukar Kalor Pipa Ganda

Prinsip kerja dari penukar kalor tipe ini adalah dua fluida yang mengalir pada pipa yang berbeda secara berdekatan. Ada dua tipe aliran yang terjadi pada jenis penukar kalor ini, yaitu *parallel flow* dan *counter flow*. Tipe *parallel flow* yaitu kedua fluida yang melewati pipa dengan arah aliran yang sama, sedangkan *counter flow* kedua aliran melewati pipa dengan arah aliran berlawanan. Ilustrasi penukar kalor pipa ganda ditunjukkan pada gambar 2.10.





(a) (b)

Gambar 2.10 Ilustrasi alat penukar kalor tipe pipa ganda  
 (a) Tipe *parallel flow* (b) Tipe *counter flow* (Hariyanto, 2015)

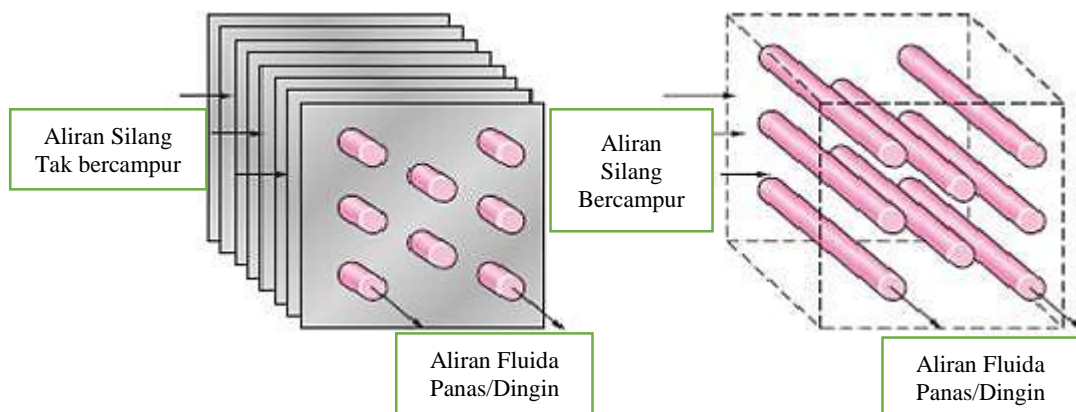
Keterangan gambar:

- $T_1$  = Cairan panas masuk
- $T_2$  = Cairan panas keluar
- $T_3$  = Cairan dingin masuk
- $T_4$  = Cairan dingin keluar

Pada gambar 2.10 terdapat grafik distribusi temperatur pada dua jenis aliran untuk mengetahui temperatur cairan akhir yang terjadi. Untuk aliran *parallel*, ditunjukkan pada gambar 2.10 (a) dan untuk tipe *counter flow* ditunjukkan pada gambar 2.10 (b).

b. Penukar kalor tipe kompak

Prinsip kerja dari penukar kalor tipe ini adalah memperluas area perpindahan kalor, sehingga menghasilkan perpindahan panas yang besar per satuan volume. Luas permukaan yang besar diperoleh dengan memasang sirip tipis secara rapat pada dinding yang memisahkan dua fluida. Dalam penukar kalor kompak, dua fluida biasanya bergerak saling tegak lurus, dan konfigurasi ini dinamakan aliran silang. Aliran silang juga dibedakan menjadi dua, yaitu aliran tak bercampur dan



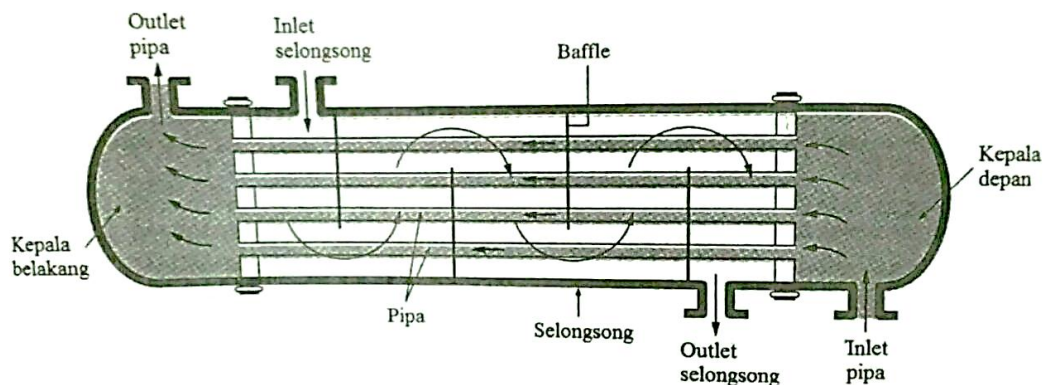


aliran bercampur. (Hariyanto, 2015). Contoh penggunaan penukar kalor jenis ini adalah pada kondensor, dan evaporator. Penukar kalor tipe kompak ditunjukkan pada gambar 2.11.

Gambar 2.11 Penukar panas tipe kompak (Cengel, 1989)

c. *Shell and Tube* (Selongsong dan Pipa)

Penukar kalor jenis ini paling banyak digunakan dalam aplikasi industri. Penukar kalor jenis ini terdiri dari banyak pipa yang disusun dalam satu selongsong. Perpindahan kalor terjadi ketika fluida mengalir di dalam pipa sedangkan fluida lain mengalir di luar pipa melalui selongsong. *Baffle* dipasang untuk memaksa fluida yang melewati selongsong agar mengalir menyilang

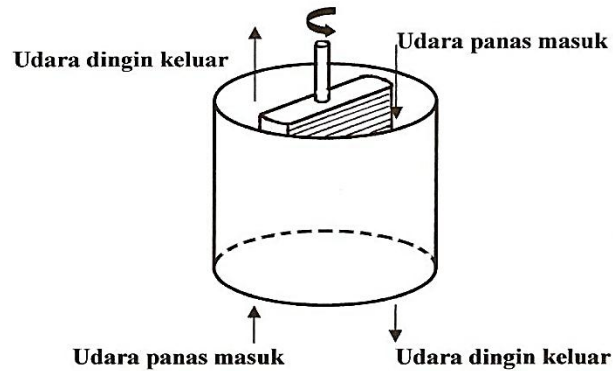


sekaligus menjadi penahan getar pada pipa. Penukar kalor shell and tube ditunjukkan pada gambar 2.12

Gambar 2.12 Penukar Kalor jenis *Shell and Tube* (Hariyanto, 2015)

d. *Regenerative Heat Exchanger*

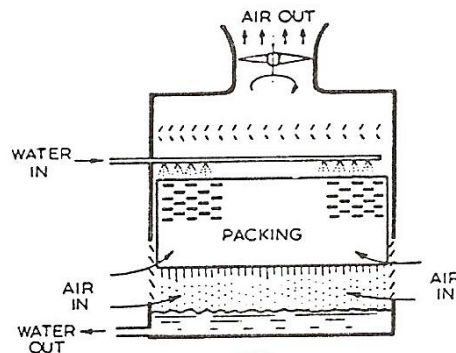
Pada penukar kalor jenis ini dinding pemisah dapat berputar dalam periode waktu tertentu. Seperti pada gambar 2.13, satu sisi dari dinding pemisah berhubungan dengan fluida panas sedang sisi yang lain dengan fluida dingin. Perpindahan kalor terjadi setelah dinding pemisah diputar. Jenis *regenerative* ini diantaranya digunakan dalam *air heater* pada *boiler*.



Gambar 2.13 *Regenerative heat exchanger*

e. *Direct Contact Heat Exchanger*

Yaitu proses pertukaran kalor antara dua fluida dengan kontak langsung sehingga dominasi perpindahan masa terjadi pada pertukaran kalornya. Proses seperti ini misalnya terjadi pada *Cooling Tower* seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 *Cooling Tower*

Prinsip kerja *Cooling Tower* adalah mendinginkan air dengan memasukan air bertemperatur tinggi dari bagian atas kemudian air tersebut disemprotkan di dalam menara, air jatuh melewati plat-plat penghalang hingga sampai ke bawah

(tempat penampungan). Dari penampungan diperoleh air dengan temperatur yang lebih rendah dari air masukan. Dengan cara itu terjadi proses perpindahan kalor secara langsung yang disebabkan oleh gesekan antara udara dengan butiran-butiran air. Udara panas dan uap air akibat proses itu ditarik keluar oleh kipas/*fan*.

### 2.2.6. Laju Perpindahan Kalor

Laju perpindahan kalor pada *heat exchanger* biasanya ditentukan oleh kondisi proses. Sebagai contoh untuk pendinginan fluida ditentukan kecepatan aliran fluida dan perbedaan temperatur yang dibutuhkan untuk pendinginan tersebut serta *specific heat* dari fluida pada kondisi proses.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot \Delta T \\ &= \dot{m}_h \cdot c_{p,h} \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) \dots\dots\dots (2.11) \end{aligned}$$

Atau,

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot \Delta T \\ &= \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{c,i} - T_{c,o}) \dots\dots\dots (2.12) \end{aligned}$$

Dengan:

- $\dot{m}$  = laju aliran massa dari fluida kerja (kg/s)
- $C$  = kalor jenis fluida
- $\Delta T$  = beda temperatur (°C)
- $T_{h,i}$  = temperatur input fluida panas (°C)
- $T_{h,o}$  = temperatur output fluida panas (°C)
- $T_{c,i}$  = temperatur input fluida dingin (°C)
- $T_{c,o}$  = temperatur output fluida dingin (°C)

### 2.2.7 Sistem Refrigerasi

Proses pendinginan atau refrigerasi umumnya merupakan suatu sistem untuk mengatur temperatur ruangan mencapai dibawah temperatur lingkungan, proses pemindahan energi panas dilakukan dengan menggunakan fluida kerja penukar panas (refrigeran) yang ada dalam sistem refrigerasi tersebut lalu melepaskan kalor ke lingkungan. Pengkondisian udara (AC) pada suatu ruangan digunakan untuk mengatur kelembaban, pemanasan dan pendinginan udara dalam ruangan. Refrigerasi atau pengkondisian udara ini bertujuan memberikan kenyamanan yang

berada didalam ruangan tersebut, sehingga mampu mengurangi kondisi tubuh cepat lelah karena suhu yang panas dan tidak sejuk.

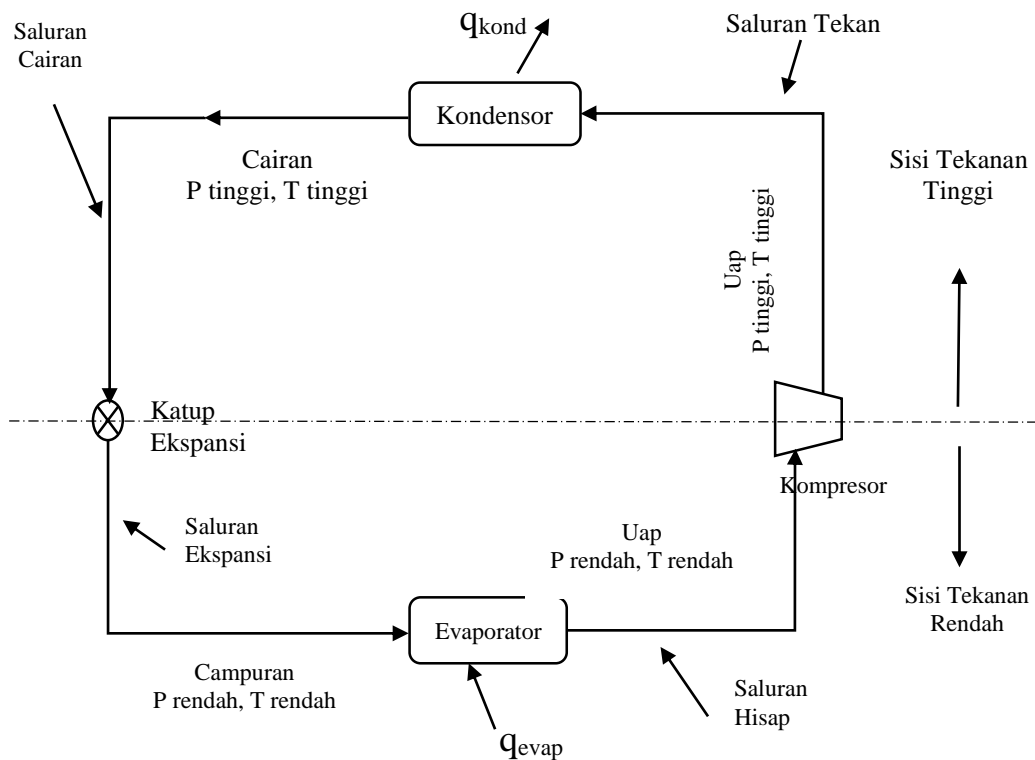
Refrigerasi adalah penerapan dari Hukum II Termodinamika yang dinyatakan oleh Clausius, “Adalah tidak mungkin untuk membangun suatu alat yang beroperasi dalam suatu siklus yang mengalirkan kalor dari ruangan yang bertemperatur rendah ke ruangan yang bertemperatur tinggi tanpa memasukkan energi dari luar”. Dari pernyataan tersebut adalah sistem yang menghasilkan perpindahan kalor dari sumber yang lebih dingin ke penyerap yang lebih panas membutuhkan daya masukan berupa kerja atau energi tambahan. Istilah refrigerasi harus dibayangkan lebih dari sekedar pendinginan atau menjaga sesuatu agar tetap dingin, tetapi tujuannya adalah untuk mengalirkan energi kalor ke penyerap kalor untuk menaikkan temperatur.

Sistem Refrigerasi dan Pengkondisian Udara adalah suatu rangkaian proses dimana output yang dihasilkan dapat membuat kondisi udara dalam sebuah ruangan dapat terjaga temperaturnya sesuai dengan kebutuhan dan kenyamanan yang diinginkan seperti digunakan pada *Air Conditioner*(AC) baik itu digunakan dalam sebuah ruangan atau AC Mobil. Selain diterapkan sebagai penyaman udara, sistem refrigerasi juga bisa digunakan dalam poses penyimpanan makanan yang berfungsi untuk membuat temperatur sebuah ruangan menjadi dingin untuk mengawetkan makanan seperti kulkas atau pembuatan es batu. Sistem refrigerasi dan pengkondisian udara merupakan terapan dari teori perpindahan kalor dan

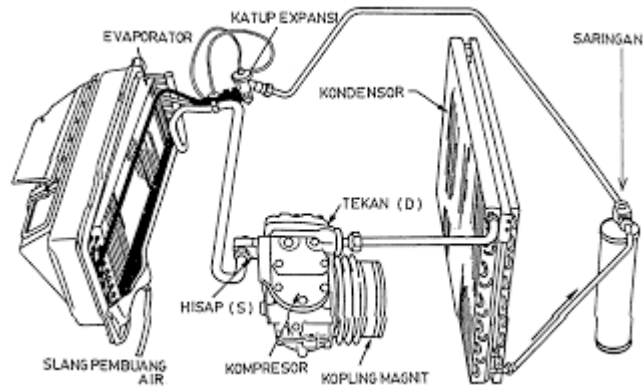
termodinamika (Stoecker dan Jones, 1996). Siklus refrigerasi dapat dilihat pada gambar 2.15

Gambar 2.15 Siklus Kompresi Uap Standar

Pada prinsip kerjanya sistem refrigerasi bertugas memindahkan panas pada suatu ruangan ke lingkungan menggunakan fluida kerja yang disebut refrigeran. Refrigeran menyerap kalor pada tekanan rendah melalui evaporator dan melepaskan panas pada tekanan tinggi melalui kondensor. Pada sistem pendingin



terdapat serangkaian proses kerja yang saling berhubungan dan saling berkaitan antar komponen. Skema sistem refrigerasi secara umum ditunjukkan pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Skema Sistem Refrigerasi

Komponen-komponen vital dalam proses refrigerasi yaitu refrigeran sebagai fluida kerja, evaporator bertugas menyerap panas dari ruangan yang dikondisikan sehingga temperatur ruangan menjadi dingin, kompresor bertugas untuk mengompresikan refrigeran bertekanan rendah dari evaporator sehingga refrigeran berubah fasa menjadi uap panas lanjut yang memiliki tekanan dan temperatur tinggi sehingga panas refrigeran tersebut dapat dilepaskan ke lingkungan melalui kondensor sedangkan refrigeran mengalami kondensasi sehingga refrigeran berubah fasa menjadi cairan pada tekanan tinggi. Cairan refrigeran tersebut kemudian diekspansikan ke tekanan evaporator untuk siklus selanjutnya oleh katup ekspansi. Penjelasan mengenai komponen-komponen sistem refrigerasi akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

### 2.2.8 Satuan Refrigerasi

Satuan refrigerasi yang lazim adalah ton refrigerasi. Satuan ini dimaksudkan sebagai laju perpindahan kalor yang diperlukan untuk membekukan satu ton air pada 32 °F dalam 24 jam. Bila entalpi peleburan es menjadi air diambil 144 Btu/lb, maka diperoleh definisi satu ton adalah ekuivalen dengan pengambilan kalor sebanyak 288.000 Btu/hari, atau yang sering digunakan adalah 12.000 Btu/jam atau 200 Btu/menit (di US, 1 ton = 2000 lb). Dalam satuan metrik, satu ton refrigerasi didefinisikan sebagai 3000 kkal/jam = 50 kkal/menit. Jadi, 200 Btu/menit = 50 kkal/menit = 210 kJ/menit (Wastam, 2010). BTU adalah singkatan dari *British Thermal Unit* merupakan satuan energi yang digunakan di Amerika Serikat yang biasanya di definisikan per jam, menjadi satuan BTU/hour. Satuan ini juga masih

sering dijumpai di Britania Raya pada sistem pemanas dan pendingin lama. Sekarang ini satuan ini mulai digantikan dengan satuan energi dari unit SI, yaitu Joule (J). 1 BTU/hour adalah energi yang dibutuhkan untuk memanaskan atau mendinginkan air sebanyak 1 galon air (1 pound – sekitar 454 gram) agar temperaturnya naik atau turun sebesar 1 derajat fahrenheit dalam 1 jam (Kuncara, 2013). Hubungannya dengan AC, BTU menyatakan kemampuan mengurangi panas/ mendinginkan ruangan dengan luas dan kondisi tertentu selama satu jam.

### **2.2.9 Komponen Utama Sistem Refrigerasi**

Komponen utama sistem refrigerasi terdiri dari kompresor, kondensor, evaporator, dan alat ekspansi. Keempat alat itu menjadi jantung utama sistem yang saling terhubung dan harus berfungsi dengan baik agar sistem dapat berjalan dengan baik. Adapun penjelasan komponen-komponen utama sistem refrigerasi adalah sebagai berikut:

#### **a. Kompresor**

Kompresor adalah jantung dari sistem kompresi uap, karena kompresor adalah pemompa bahan pendingin keseluruhan sistem. Kompresor merupakan bagian vital dalam siklus mesin refrigerasi karena kompresor berfungsi menghisap sekaligus memompa refrigeran sehingga terjadilah sirkulasi refrigeran ke seluruh komponen mesin refrigerasi. Prinsip kerja kompresor adalah untuk menaikkan tekanan refrigeran yang rendah yang berasal dari evaporator untuk kemudian dikompresikan menuju kondensor dengan tekanan tinggi. Kompresor digerakkan oleh sebuah motor listrik. Fase refrigeran pada saat masuk dan keluar kompresor berupa gas, kondisi gas keluar kompresor memiliki tekanan dan temperatur tinggi dengan fase uap panas lanjut. Ada enam jenis kompresor (Nadjib, 2005).

##### **1. Kompresor torak berkecepatan tinggi.**

Kompresor jenis ini biasanya digunakan apabila dibutuhkan kapasitas yang besar. Kecepatan putar berkisar 900-1800 rpm dengan daya penggerak kompresor antara 3,7-200 kW.

2. Kompresor putar.

Komponen utama dari jenis kompresor ini adalah blade (daun) ada yang stasioner ada yang berputar, dengan konstruksi yang lebih sederhana dari kompresor torak. Keunggulan dari kompresor ini adalah getaran yang lebih sedikit karena komponen yang digunakan sedikit dan bagian yang bergesekan dibuat dengan ketelitian tinggi.

3. Kompresor sekrup.

Kompresor ini mempunyai dua buah rotor yang berpasangan dengan prinsip kerja seperti kompresor torak yaitu melakukan langkah isap, langkah kompresi, dan langkah buang.

4. Kompresor semi hermatik.

Konstruksi dari kompresor ini adalah motor listrik dibuat menjadi satu dengan kompresor, rotor motor listrik berada di dalam perpanjangan ruang engkol kompresor. Daya kompresor jenis ini bisa mencapai 40 kW.

5. Kompresor hermatik.

Konstruksi hampir sama dengan kompresor semi hermatik dengan stator motor penggerak, namun digunakan untuk kapasitas rendah sampai 7,5 kW.

6. Kompresor sentrifugal.

Kompresor jenis ini memiliki konstruksi mirip pompa sentrifugal yaitu dengan impeller dan ruang spiral (*volute*) yang mengubah energi kinetik menjadi tekanan. Kompresor jenis ini biasanya digunakan pada kapasitas besar antara 200-10.000 kW.

b. Kondensor

Kondensor merupakan salah satu alat penukar kalor yang berfungsi sebagai tempat kondensasi. Uap yang bertekanan dan bertemperatur tinggi pada akhir kompresi dapat dengan mudah dicairkan dengan cara mendinginkannya dengan media pendingin. Pada kondensor berlangsung dua proses utama yaitu penurunan suhu refrigeran dari uap panas lanjut ke uap jenuh dan dari proses uap jenuh ke cair jenuh. Kondensor berfungsi untuk membuang kalor dan mengubah wujud bahan pendingin dari gas menjadi cair. Selain itu kondensor juga digunakan untuk



membuat kondensasi bahan pendingin gas dari kompresor dengan suhu tinggi dan tekanan tinggi. Kalor yang dilepaskan kondensor dibuang keluar melalui permukaan sirip lalu diserap oleh media pendingin baik itu air atau udara di lingkungan. Proses pengembunan refrigeran dari kondisi gas jenuh menjadi cair jenuh berlangsung pada tekanan dan temperatur konstan. Kondensator ada 3 macam menurut pendinginannya (Stoecker dan Jones, 1996) yaitu:

1. Kondensator dengan pendinginan udara (*air cooled*)

Kondensator ini menggunakan udara dalam proses pendinginannya, dengan sirip sirip pendingin yang berada diantara pipa pipa kapilernya sebagai tempat mengalirnya udara.

2. Kondensator dengan pendinginan air (*water cooled*)

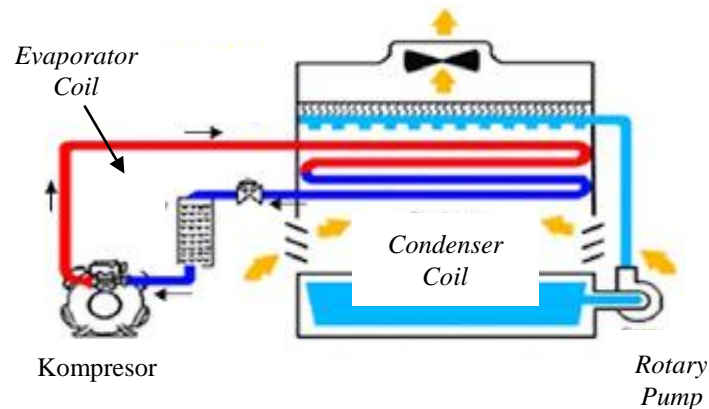
Kondensator ini menggunakan air dalam proses pendinginannya, kondensator direndam dalam bak air sebagai media pelepas kalor pada kondensator. Kondensator berpendingin air ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Kondensator Berpendingin Air

3. Kondensator dengan pendinginan campuran udara dan air (*evaporative cooled*)

Prinsip pendinginan dari kondensator evaporatif ini adalah dengan menggunakan metoda pendingin evaporatif (*evaporative cooling*), dimana panas yang berasal dari kondensator akan digunakan untuk menguapkan tetesan-tetesan air yang menempel pada pipa-pipa kondensator. Disamping itu juga sebagian kecil pendinginan berasal dari sirkulasi udara (Subarkah, 2011). *Evaporative condenser* ditunjukkan pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 *Evaporative Condenser* (Subarkah, 2011)

### c. Evaporator

Evaporator merupakan alat penukar kalor yang memegang peranan penting didalam siklus yaitu mendinginkan media sekitar. Evaporator menjadi tempat terjadinya perubahan fase refrigeran dari cair menjadi gas. Perubahan ini memerlukan media perpindahan panas atau sumber kalor dari lingkungan evaporator baik berupa cairan atau udara dalam sebuah ruangan. Evaporator berfungsi untuk menyerap panas dari udara ruangan atau cairan di lingkungan evaporator dan mendinginkannya kemudian membuang kalor tersebut melalui kondensor diruang yang tidak didinginkan. Kompresor bekerja menghisap refrigeran dari evaporator sehingga tekanan didalam evaporator menjadi rendah dan vakum. Evaporator memiliki fungsi yang berkebalikan dengan kondensor yaitu membuang panas ke udara sekitar, tetapi justru mengambil panas dari udara didekatnya. Proses penguapan refrigeran berlangsung pada tekanan dan temperatur yang konstan. Perencanaan evaporator harus mencakup penguapan yang efektif dari bahan pendingin dengan penurunan tekanan yang minimum dan pengambilan panas dari zat yang didinginkan secara efisien. Perencanaan evaporator tergantung dalam penempatannya dan zat yang akan langsung didinginkan apakah berwujud gas, cair atau padat. Pada semua keadaan beban, bahan pendingin akan penguap waktu mengalir sepanjang pipa evaporator atau permukaan evaporator dan diusahakan agar cairan tetap membasahi semua bagian dari evaporator.

Evaporator (penguap) yang dipakai berbentuk pipa bersirip pelat. Tekanan cairan refrigerant yang diturunkan pada katup ekspansi, didistribusikan secara

merata ke dalam pipa evaporator, oleh distributor refrigeran. Dalam hal tersebut refrigeran akan menguap dan menyerap kalor dari udara ruangan yang dialirkan melalui permukaan luar dari pipa evaporator. Apabila udara didinginkan (di bawah titik embun), maka air yang ada dalam udara akan mengembun pada permukaan evaporator, kemudian ditampung dan dialirkan keluar. Jadi, cairan refrigeran diuapkan secara berangsur – angsur karena menerima kalor sebanyak kalor laten penguapan, selama mengalir di dalam setiap pipa dari koil evaporator. Selama proses penguapan itu, di dalam pipa akan terdapat campuran refrigeran dalam fase cair dan gas. Dalam keadaan tersebut, tekanan (tekanan penguapan) dan temperaturnya (temperature penguapan) konstan. Evaporator ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Evaporator

#### d. Alat Ekspansi

Alat ekspansi berfungsi untuk menurunkan tekanan refrigeran cair dari kondensor dan untuk mengatur aliran refrigeran ke evaporator, serta mengatur pemasukan refrigeran yang diatur dengan sensor temperatur agar membuka dan menutup secara otomatis disesuaikan dengan beban pendinginan evaporator. Alat ekspansi mempunyai dua fungsi yaitu menurunkan tekanan refrigeran cair dan mengatur aliran refrigeran ke evaporator. Alat Ekspansi dibagi menjadi empat jenis yaitu pipa kapiler, katup ekspansi berpengendali panas, katup apung, katup ekspansi tekanan konstan (Stoecker dan Jones, 1996). Penjelasan mengenai keempat jenis alat ekspansi adalah sebagai berikut:

### 1. Pipa kapiler

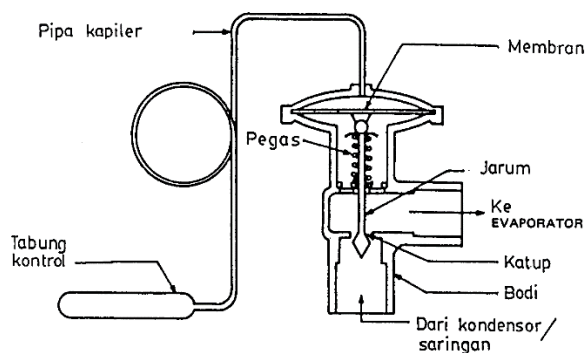
Pipa kapiler adalah pipa berukuran kecil dan panjang yang berfungsi untuk menurunkan tekanan refrigeran sebelum masuk ke evaporator. Pipa kapiler yang sering digunakan biasanya berukuran satu hingga enam meter, dan diameter dalam 0,5 hingga 2 mm. cara kerja pipa kapiler adalah menurunkan tekanan yang disebabkan oleh percepatan refrigeran dan gesekan refrigeran dengan dinding pipa. Sebagian cairan refrigeran berubah menjadi uap ketika melewati pipa kapiler tersebut.

### 2. Katup apung

Katup apung adalah suatu jenis alat ekspansi yang mempertahankan refrigeran pada level konstan di dalam evaporator. Katup apung dikendalikan secara otomatis oleh sebuah saklar apung yang membuka penuh bila level refrigeran turun melewati batas terendah dan menutup rapat apabila level refrigeran mencapai batas tertinggi. Dengan menjaga level refrigeran di dalam evaporator, laju aliran massa akan terkontrol dan menjaga temperatur evaporator agar tidak terlalu rendah ataupun terlalu tinggi.

### 3. Katup ekspansi berpengendali panas

Katup ekspansi berpengendali panas atau katup ekspansi termostatik merupakan jenis alat ekspansi yang paling populer digunakan. Cara kerja alat ekspansi ini adalah dengan mendeteksi panas lanjut pada sisi keluar evaporator. Katup mengatur laju aliran massa refrigeran yang besarnya sebanding dengan laju penguapan di dalam evaporator. Skema katup ekspansi berpengendali panas dapat dilihat pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Skema katup ekspansi berpengendali panas

Dari gambar 2.20 bisa dilihat bahwa apabila laju pembebanan refrigeran di evaporator semakin membesar maka temperatur keluar evaporator akan naik, fase refrigeran yang menjadi uap semakin banyak, maka katup terbuka untuk menambah refrigeran yang mengalir agar tidak terjadi kenaikan temperatur refrigeran yang terlalu tinggi di sisi hisap kompresor yang mengakibatkan beratnya kerja kompresor. Sebaliknya apabila beban pendinginan kecil, katup akan menutup karena fase uap refrigeran di sisi keluar evaporator sudah mencapai uap panas lanjut dan memperkecil laju aliran massa refrigeran untuk mencegah evaporator dan jalur masuk kompresor membeku.

#### 4. Katup ekspansi tekanan konstan

Katup ekspansi tekanan konstan berfungsi mempertahankan tekanan yang konstan pada sisi keluar katup. Katup mendeteksi tekanan di dalam evaporator, apabila tekanan evaporator turun kebawah batas kendali maka katup membuka lebih lebar, bila tekanan evaporator naik keatas batas kendali, maka katup menutup sebagian. Membuka atau menutupnya katup bertujuan untuk mencegah terjadinya pembekuan pada alat-alat pendingin air akibat beban pendinginan yang terlalu rendah.

#### e. *Filter Dryer*

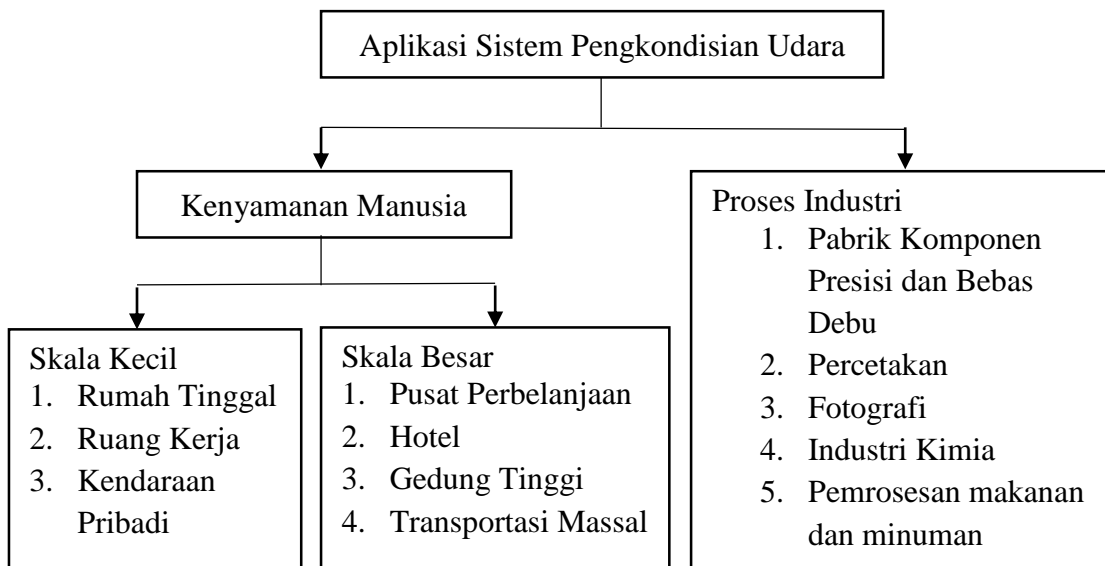
*Filter Dryer* adalah alat penyaring kotoran-kotoran yang melewati sistem refrigerasi, sehingga tidak menyumbat pipa kapiler yang akan dilewati refrigeran. *Filter Dryer* juga berfungsi menangkap uap air yang masuk kedalam sistem. *Filter Dryer* ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 *Filter Dryer*

### 2.2.10 Ruang Lingkup Refrigerasi

Bidang refrigerasi dan pengkondisian udara (*air conditioning*) sebenarnya saling berhubungan, namun masing-masing bidang refrigerasi memiliki ruang lingkup yang berbeda. Aplikasi pengkondisian udara dapat dilihat dari gambar 2.22. Penerapan pengkondisian udara dalam kehidupan sehari-hari secara garis besar dapat digunakan untuk dua bidang yaitu kenyamanan manusia dan proses industri. Definisi pengkondisian udara nyaman adalah proses perlakuan terhadap kondisi udara di dalam udara untuk mengatur kelembaban, temperatur guna mencapai kenyamanan termal dan dimanfaatkan untuk keperluan kenyamanan manusia ataupun keperluan industri.



Gambar 2.22 Aplikasi Sistem Pengkondisian Udara

Sistem pengkondisian udara dalam skala kecil biasanya digunakan dalam keperluan rumah tangga dan kendaraan pribadi, sistem pengkondisian udara yang biasa dipakai adalah menggunakan AC jenis *split* dan tipe *window*. Sedangkan penggunaan untuk skala besar dan proses industri biasanya menggunakan sistem AC sentral.

### 2.2.11 Refrigeran (Bahan Pendingin)

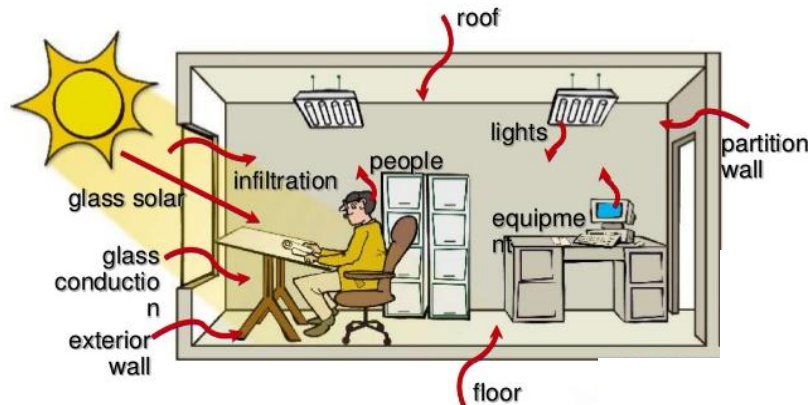
Refrigeran adalah substansi kerja dalam sistem refrigerasi (Stoecker dan Jones, 1996). Refrigeran berfungsi menjadi fluida penukar kalor yang memindahkan energi panas ruangan kedalam sistem refrigerasi dan sangat diperlukan sebagai media perpindahan dan penyerapan kalor. Refrigeran berperan sebagai penyerap panas melalui evaporator dan berubah fase dari cair jenuh ke gas (evaporasi) dan membuang panas dari kondensor dan berubah fase dari gas ke cair jenuh (kondensasi). Refrigeran ditunjukkan pada gambar 2.23.



Gambar 2.23 Refrigeran HFC-134a merk KLEA

### 2.2.12 Beban Pendinginan

Beban pendinginan adalah jumlah kalor yang dipindahkan oleh sistem pengkondisian udara tiap satuan waktu (Anwar, 2010). Beban pendinginan terdiri dari panas ruangan dan tambahan panas yang berasal dari penerangan, alat elektronik, dan makhluk hidup. Beban pendinginan dibagi menjadi beban eksternal dan beban internal. beban internal terdiri dari makhluk hidup, lampu (pencahayaan), dan peralatan-peralatan. Beban eksternal yaitu terdiri dari desain selubung bangunan, partisi bangunan, dan sistem ventilasi (Yasmin, 2011). Ilustrasi beban pendinginan dapat dilihat pada gambar 2.24.



Gambar 2.24 Ilustrasi pembebanan pendinginan dalam sebuah ruangan  
(Yasmin, 2011)

Di dalam pengaturan pembebanan pendinginan, ada beberapa kriteria pengkondisian pendinginan yaitu alami, ventilasi, dan pendinginan. Kriteria kenyamanan termal untuk daerah tropis dibagi menjadi tiga yaitu:

- a. Sejuk nyaman, antara temperatur efektif 20,5 °C sampai 22,8 °C
- b. Nyaman optimal, antara temperatur efektif 22,8 °C sampai 25,8 °C
- c. Hangat nyaman, antara temperatur efektif 25,8 °C sampai 27,1 °C

Untuk daerah tropis, kelembaban udara relatif yang dianjurkan antara 40% sampai 50%, tetapi untuk ruangan yang jumlah orangnya padat seperti ruang pertemuan, kelembaban udara relative masih diperbolehkan berkisar antara 55% sampai 60% (Yasmin, 2011). Kenyamanan termal penting untuk menunjang kegiatan manusia, namun performa mesin pendingin perlu dipertimbangkan agar penggunaan energi dapat optimal dan tidak terjadi pemborosan.

### 2.2.13 Efek Refrigerasi

Efek refrigerasi adalah jumlah panas yang diserap oleh mesin refrigerasi. Sejumlah kalor tersebut digunakan untuk menguapkan refrigeran. Misalnya, es melebur pada 31 °F akan menyerap panas 150 Btu/lb, itu artinya efek refrigerasi dari 1 lb es adalah 150 Btu. Dari gambar 2.4 diatas, nilai kalor yang diserap refrigeran adalah kalor yang masuk ke dalam evaporator dan disebut  $q_{\text{evap}}$ . Penelitian penelitian kini ditujukan untuk perkembangan sistem refrigerasi dan difokuskan untuk mengoptimalkan efek refrigerasi. Karena diharapkan mesin



refrigerasi akan terus berkembang dan lebih efisien dengan meminimalkan konsumsi energi namun menghasilkan efek refrigerasi yang sebesar-besarnya. Kapasitas *Air Conditioner* yang dibutuhkan suatu ruangan tentunya harus disesuaikan dengan kebutuhan agar tidak terjadi kekurangnyamanan akibat kapasitas AC yang kurang besar ataupun kelebihan kapasitas AC yang mengakibatkan pemborosan. Menurut Kuncara (2013) Kapasitas AC berdasarkan PK (*Paard Kracht*) diklasifikasikan menjadi dalam tabel 2.4

Tabel 2.4 Kapasitas *Air Conditioner* berdasarkan PK (Kuncara, 2013)

Kapasitas AC	Btu/Hour	Untuk Ruangan	Tegangan
½ PK	5000 Btu/Hour	3m x 3m	300 – 400 Watt
¾ PK	7000 Btu/Hour	4m x 3m	500 – 600 Watt
1 PK	9000 Btu/Hour	4m x 4m	800 – 900 Watt
1 ½ PK	12000 Btu/Hour	4m x 6m	1000 – 1200 Watt
2 PK	18000 Btu/Hour	6m x 8m	1700 – 1900 Watt
2,5 PK	24000 Btu/Hour	8m x 8m	2200 – 2500 Watt

Dari tabel 2.4 bisa dilihat bahwa setiap ukuran ruangan memiliki spesifikasi untuk kebutuhan AC nya. Untuk menyesuaikan kebutuhan AC yang dibutuhkan untuk menyerap kalor, maka kebutuhan AC dapat dihitung dengan persamaan 2.13 (Kuncara, 2013).

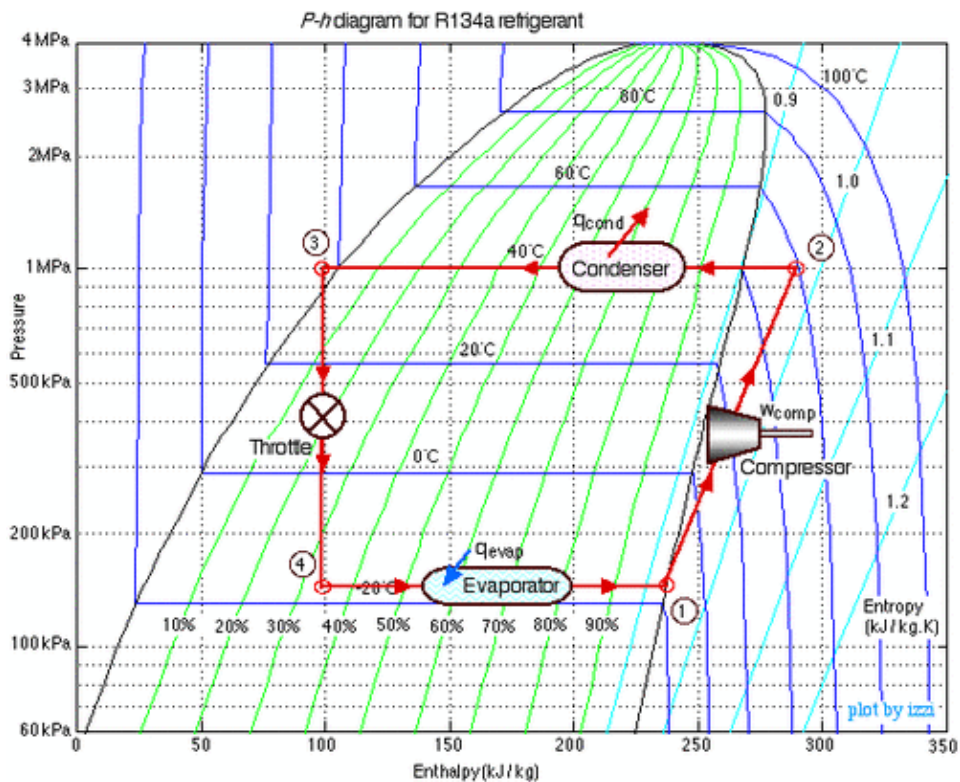
$$BTU = \frac{(L \times W \times H \times I \times E)}{60} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan:

- L = Panjang Ruang (ft)
- W = Lebar Ruang (ft)
- I = Nilai 10 jika ruang berinsulasi (berada di lantai bawah, atau berhimpit dengan ruang lain). Nilai 18 jika ruang tidak berinsulasi (di lantai atas).
- H = Tinggi Ruang (ft)
- E = Nilai 16 jika dinding terpanjang menghadap utara; nilai 17 jika menghadap timur; Nilai 18 jika menghadap selatan; dan nilai 20 jika menghadap barat (bila jendela menghadap barat).
- 1 Meter = 3,28 Feet

### 2.2.14 Termodinamika Sistem Refrigerasi

Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap merupakan mesin yang paling banyak digunakan pada refrigerasi (Stoecker dan Jones, 1996). Pada siklus ini uap ditekan, kemudian diembunkan menjadi cairan, kemudian tekanannya diturunkan agar cairan tersebut dapat menguap kembali. Penyerapan panas pada siklus kompresi uap 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 terlebih dahulu oleh katup ekspansi. Pada alat ini tekanan refrigeran yang masuk ke evaporator diturunkan. Penurunan tekanan ini disesuaikan dengan kondisi yang diinginkan, sehingga refrigeran tersebut dapat menyerap cukup banyak kalor dari evaporator. Siklus refrigerasi dapat dijelaskan melalui gambar 2.25.



Gambar 2.25 Diagram P-h Siklus Kompresi Uap dengan refrigeran R-134a

Proses siklus refrigerasi yang ditunjukkan pada gambar 2.25 bisa dijelaskan dalam poin-poin berikut:

a. Proses titik 1 ke titik 2 (proses kompresi)

Proses kompresi adalah proses penghisapan refrigeran dari evaporator dan menaikkan tekanan refrigeran hingga fase uap panas lanjut untuk dikompresikan ke seluruh pipa kapiler dan komponen yang ada di sistem refrigerasi. Proses ini dilakukan oleh kompresor.

b. Proses titik 2 ke titik 3 (proses kondensasi)

Proses kondensasi adalah proses perubahan fase refrigeran dari uap panas lanjut ke cair jenuh dan berlangsung pada tekanan dan temperatur konstan. Proses ini berlangsung di kondensor

c. Proses titik 3 ke titik 4 (proses ekspansi)

Proses ekspansi adalah proses penurunan tekanan refrigeran membuat fasenya berubah menjadi campuran sebelum masuk ke evaporator, katup ekspansi dipasang untuk menurunkan kerja evaporator.

d. Proses titik 4 ke titik 1 (proses evaporasi)

Proses evaporasi adalah perubahan fase refrigeran dari campuran ke gas jenuh (penguapan) untuk selanjutnya dihisap kembali oleh kompresor. Proses perubahan fase terjadi pada temperatur dan tekanan konstan. Evaporasi terjadi pada evaporator.

Analisis performa mesin pendingin menurut dapat dilakukan dengan diagram P-h (Wicaksono, 2014) seperti pada gambar 2.25. Titik 1 adalah titik refrigeran masuk ke kompresor. Titik 2 adalah titik refrigeran masuk ke kondensor. Titik 3 adalah titik refrigeran masuk ke katup ekspansi. Titik 4 adalah titik refrigeran masuk ke evaporator. Panas yang dibuang kondensor disebut  $q_{cond}$ , panas yang diserap evaporator disebut  $q_{evap}$ , dan kerja yang dilakukan kompresor disebut  $w_{komp}$ .

Perhitungan  $q_{cond}$ ,  $q_{evap}$ , dan  $w_{komp}$  dijelaskan dalam poin-poin berikut:

a.  $w_{komp}$  (kerja kompresor)

Kerja kompresor dapat dihitung dengan persamaan (2.14):

$$w_{komp} = \dot{m} (h_2 - h_1) \dots\dots\dots (2.14)$$

Dengan:

- $w_{komp}$  = kerja kompresor (Watt)
- $\dot{m}$  = laju aliran massa fluida (kg/s)
- $h_1$  = entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)
- $h_2$  = entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

b.  $q_{kond}$  (panas yang dibuang kondensor)

Besarnya panas yang dibuang kondensor dapat dihitung dengan persamaan (2.15):

$$q_{kond} = \dot{m} (h_2 - h_3) \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan:

- $q_{kond}$  = kalor yang dibuang kondensor (Watt)
- $\dot{m}$  = laju aliran massa fluida (kg/s)
- $h_2$  = entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)
- $h_3$  = entalpi refrigeran saat keluar kondensor (kJ/kg)

c.  $q_{evap}$  (kapasitas pendinginan)

Besarnya panas yang diserap evaporator tiap satuan massa disebut kapasitas pendinginan atau dampak refrigerasi. Dampak refrigerasi dapat dihitung dengan persamaan (2.16):

$$q_{evap} = \dot{m} (h_1 - h_4) \dots\dots\dots (2.16)$$

Dengan:

- $q_{evap}$  = kapasitas pendinginan (Watt)
- $\dot{m}$  = laju aliran massa fluida (kg/s)
- $h_1$  = entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)
- $h_4$  = entalpi refrigeran saat masuk evaporator (kJ/kg)

### 2.2.15 Coefficient of Performance (COP)

*Coefficient of Performance (COP)* adalah bilangan tanpa dimensi untuk menyatakan nilai unjuk kerja dari siklus refrigerasi (Stoecker dan Jones, 1996). Nilai COP yang semakin tinggi maka akan semakin baik mesin refrigerasi tersebut. Besarnya nilai COP dirumuskan dengan persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$COP = \frac{\text{kapasitas pendinginan}}{\text{kerja kompresor}} = \frac{q_{evap}}{w_{komp}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan:

- COP = Performa (unjuk kerja) mesin pendingin
- $q_{evap}$  = Kalor yang diserap evaporator (Watt)
- $w_{komp}$  = Kerja kompresor (Watt)

Persamaan (2.17) tidak memiliki dimensi karena merupakan perbandingan antara besarnya panas yang diserap evaporator dengan kerja kompresor, keduanya memiliki satuan yang sama yaitu (Watt) maka bila dibagi akan menciptakan bilangan tanpa dimensi.