

BAB II

DASAR TEORI

2.1 KALOR (*HEAT*)

Apabila sebuah zat diberikan atau pun melepaskan kalor, maka ada dua hal yang mungkin terjadi, yakni zat tersebut akan mengalami perubahan temperatur atau hal lain yang mungkin terjadi adalah zat tersebut akan mengalami perubahan wujud (fase). Apabila kalor tersebut hanya digunakan untuk perubahan temperatur saja, maka kalor tersebut biasa dikenal dengan kalor sensibel (*sensible heat*), sedangkan jika kalor tersebut digunakan untuk merubah wujud (fase) zat, maka kalor itu biasa disebut dengan kalor laten (*latent heat*).

2.1.1 Kalor Sensibel (*Sensible Heat*)

Kalor sensibel adalah kalor yang digunakan oleh suatu zat untuk merubah temperatur zat tersebut. Jika zat menerima kalor, maka temperaturnya akan naik, sedangkan jika zat tersebut melepaskan kalor, maka zat tersebut akan mengalami penurunan temperatur. Kalor sensibel ini tidak sampai menyebabkan zat mengalami perubahan fase. Secara umum kalor sensibel yang digunakan untuk merubah temperatur suatu zat dirumuskan dengan:

$$Q = m.c.\Delta T \quad (2.1)$$

Dimana : Q = Besarnya energi kalor sensibel yang bekerja pada suatu zat (J)

m = Massa zat yang mengalami perubahan temperatur (kg)

c = Kalor jenis zat (J/(kg.K))

ΔT = Perubahan temperatur yang terjadi (K)

2.1.2 Kalor Laten (*Latent Heat*)

Kalor laten adalah kalor yang digunakan untuk merubah wujud atau fase suatu zat. Perubahan fase terjadi apabila suatu zat sudah mencapai titik jenuhnya. Pada saat zat mengalami perubahan fase, zat tersebut tidak mengalami perubahan temperatur. Ada dua jenis kalor laten pada suatu zat, yakni kalor laten yang digunakan untuk meleburkan atau membekukan suatu zat, atau biasa dikenal

dengan kalor lebur atau pun kalor beku, dan kalor laten yang digunakan untuk menguapkan atau mengembunkan suatu zat, atau biasa dikenal dengan kalor uap atau kalor embun. Besarnya energi yang digunakan untuk merubah fase suatu zat lebih besar daripada energi yang digunakan untuk merubah temperaturnya. Sehingga, pada tekanan yang sama, lebih sulit untuk merubah fase suatu zat daripada merubah temperaturnya saja.

Secara umum, kalor yang digunakan untuk merubah fase suatu zat dirumuskan dengan:

$$Q = m.h_l \quad (2.2)$$

Dimana : Q = Besarnya energi kalor sensibel yang bekerja pada suatu zat (J)

m = Massa zat yang mengalami perubahan temperatur (kg)

h_l = Kalor laten (kJ/kg)

Hubungan antara energi kalor dengan laju perpindahan kalor yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$Q = q.\Delta t \quad (2.3)$$

Dimana : Q = Besarnya energi kalor sensibel yang bekerja pada suatu zat (J)

q = Laju perpindahan kalor (Watt)

Δt = Waktu yang dibutuhkan untuk memindahkan energi kalor (s)

2.2 PERPINDAHAN KALOR

Bila suatu sistem yang memiliki gradien suhu atau perbedaan temperatur disinggungkan, maka akan terjadi perpindahan energi. Proses transport energi tersebut disebut sebagai perpindahan kalor. Perpindahan energi (kalor) senantiasa berasal dari medium bertemperatur tinggi ke medium bertemperatur rendah, kemudian perpindahan kalor tersebut akan berhenti ketika kedua medium telah mencapai temperatur yang sama (setimbang). Kalor dapat dipindahkan dalam tiga jenis cara yang berbeda yaitu: konduksi, konveksi dan radiasi.

2.2.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Konduksi adalah proses dengan mana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur lebih tinggi ke daerah yang bertemperatur lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Dalam aliran kalor konduksi, perpindahan

energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar.

Laju perpindahan panas dinyatakan dengan hukum Fourier (Jansen, Ted J., 1993):

$$q = -k.A \frac{dT}{dx} \text{ W (Watt)} \quad (2.41)$$

Dengan : k = konduktivitas termal (W/m.K)

A = luas penampang (m²)

dT/dx = gradien temperatur (K/m)

Nilai minus, (-) dalam persamaan diatas menunjukkan bahwa kalor selalu berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah.

2.2.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Perpindahan kalor konveksi adalah proses perpindahan kalor (energi) pada aliran fluida. Energi yang berpindah secara konveksi akan menaikkan temperatur dan energi dalam partikel-partikel fluida. Kemudian, partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bertemperatur lebih rendah di dalam fluida untuk memindahkan sebagian energinya kepada partikel-partikel fluida lainnya.

Perpindahan kalor konveksi dibagi dua yaitu konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida berlangsung akibat perbedaan kerapatan yang disebabkan oleh gradien temperatur maka disebut konveksi bebas. Namun, bila gerakannya disebabkan oleh suatu alat dari luar, seperti pompa atau kipas, maka prosesnya disebut dengan konveksi paksa. Keefektifan perpindahan kalor konveksi sangat tergantung pada gerakan bercampur atau berbaurnya fluida.

Pada umumnya perpindahan panas konveksi dinyatakan dengan hukum pendinginan Newton (Jansen, Ted J., 1993):

$$q = hA(T_d - T) \text{ W (Watt)} \quad (2.5)$$

Dengan : h = koefisien konveksi (W/m².K)

A = luas permukaan (m²)

T_d = temperatur dinding (K)

T = temperatur udara (K)

2.3 REFRIGERASI DAN SIKLUS REFRIGERASI

Refrigerasi adalah efek pendinginan dari proses pengambilan kalor dari sebuah sumber panas dan mentransfernya ke medium lain, sehingga temperatur medium menjadi naik, dengan tujuan untuk menjaga temperatur sumber panas di bawah temperatur sekitarnya.

Sistem refrigerasi adalah sebuah kombinasi dari komponen-komponen, peralatan, dan pemipaan yang disambungkan dalam urutan yang berurutan untuk menghasilkan efek refrigerasi. Salah satu sistem refrigerasi yang umum digunakan adalah Sistem Kompresi Uap.

Dalam sistem ini kompresor menekan *refrigerant* ke tekanan dan temperatur yang lebih tinggi dari sebuah uap yang terevaporasi pada tekanan dan temperatur yang rendah. *Refrigerant* yang terkompresi dikondensasikan menjadi wujud cair dengan melepaskan kalor laten pengembunan di kondenser (media kondenser bisa berupa udara ataupun air). *Refrigerant* cair kemudian dihambat menjadi uap bertekanan rendah dan bertemperatur rendah, yang menghasilkan efek refrigerasi selama proses evaporasi. Kompresi uap biasa disebut kompresi mekanik karena refrigerasi menggunakan kompresi mekanik.

2.4 REFRIGERANT DAN SECONDARY REFRIGERANT

Refrigerant adalah fluida kerja primer yang digunakan untuk menghasilkan efek refrigerasi dalam sebuah sistem refrigerasi. Semua *refrigerant* mengambil kalor pada temperatur dan tekanan yang rendah selama evaporasi dan mengeluarkan kalor pada temperatur dan tekanan yang tinggi selama kondensasi. Bila menggunakan *refrigerant* sekunder, *refrigerant* ini disebut *refrigerant* primer untuk membedakannya

Secondary *refrigerant* (*refrigerant* sekunder) adalah fluida kerja yang didinginkan oleh *refrigerant* selama evaporasi untuk mentransportasikan refrigerasi ke titik lain yang ingin diturunkan temperaturnya. *Chilled water* dan air garam merupakan contoh dari *refrigerant* sekunder, disebut sebagai *refrigerant* sekunder adalah untuk membedakannya dari *refrigerant* primer.

Karakteristik *refrigerant* yang penting untuk dijadikan pertimbangan dalam pemilihan *refrigerant* adalah *Ozone Depletion Potential* (ODP) dan

Halocarbon Global Warming Potential (HGWP). Untuk membandingkan penipisan ozon relatif pada berbagai *refrigerant*, sebuah indeks yang disebut *Ozone Depletion Potential* (ODP) diperkenalkan. ODP didefinisikan sebagai rasio laju penipisan ozon dari 1 lb dari setiap halokarbon terhadap 1 lb R-11. Untuk R-11, ODP = 1.

Sedangkan, *Halocarbon Global Warming Potential* (HGWP) adalah sebuah indeks yang digunakan untuk membandingkan efek pemanasan global dari sebuah halokarbon terhadap R-11.

2.4.1 Sifat-Sifat Yang Diperlukan Oleh *Refrigerant*

Sebuah *refrigerant* tidak boleh menyebabkan penipisan ozon. Indeks GWP yang rendah sangat diperlukan. Pertimbangan-pertimbangan tambahan dalam memilih *refrigerant* adalah sebagai berikut:

1. **Keamanan (*safety*)**, meliputi kandungan racun (*toxicity*) dan kemampuan nyala (*flammability*).
2. **Keefektifan siklus refrigerasi**. Keefektifan yang tinggi adalah sifat yang diharapkan.
3. **Mampu campur oli (*Oil miscibility*)**. *Refrigerant* seharusnya dapat bercampur dengan mineral oli pelumas karena pencampuran antara *refrigerant* dan oli membantu untuk melumasi piston dan katup keluaran, bantalan (*bearing*), dan komponen bergerak lainnya dalam sebuah kompresor.
4. **Sifat-sifat yang diharapkan:**
 - Perubahan entalpi yang besar untuk berubah fase pada saat evaporasi.
 - Tekanan kondensasi yang rendah untuk konstruksi kompresor, kondenser, pemipaan, dan lain-lain yang lebih ringan.
 - Memiliki koefisien perpindahan kalor yang tinggi dalam evaporator dan kondenser.
 - *Refrigerant inert* yang tidak bereaksi secara kimia dengan material akan menghindari korosi, erosi, atau kerusakan terhadap komponen sistem.
 - Kebocoran *refrigerant* bisa dengan mudah dideteksi.

2.4.2 Karakteristik Penggunaan *Refrigerant*

Karakteristik *refrigerant* merupakan factor yang dominan dalam pemilihan *refrigerant*. Berikut ini merupakan karakteristik penggunaan dari *refrigerant* yang umum digunakan:

1. Udara. Penggunaan umum udara sebagai *refrigerant* adalah di pesawat terbang, system udara yang ringan menjadi kompensasi bagi COP-nya yang rendah.
2. Ammonia. Instalasi-instalasi temperatur rendah pada industry besar kebanyakan menggunakan ammonia. Banyak system ammonia yang baru, mulai untuk digunakan pada setiap tahun.
3. Karbon dioksida. *Refrigerant* ini kadang-kadang digunakan untuk pembekuan dengan cara sentuhan langsung dengan bahan makanan. Tekanan pengembunannya yang tinggi biasanya membatasi penggunaannya hanya pada bagian temperatur rendah dalam system cascade, yang pada bagian temperatur tingginya digunakan *refrigerant* yang lain.
4. *Refrigerant* 11. Bersama dengan R113, populer untuk system-sistem kompresor sentrifugal.
5. *Refrigerant* 12. *Refrigerant* ini umumnya digunakan dengan kompresor torak untuk melayani refrigerasi rumah tangga dan di dalam pengkondisian udara otomotif.
6. *Refrigerant* 22. Karena biaya kompresor yang dapat lebih murah jika menggunakan R22 dibandingkan dengan R12, maka *refrigerant* ini telah banyak mengambil alih peranan dalam pengkondisian udara.
7. *Refrigerant* 502. Ini adalah jenis *refrigerant* baru, dengan sejumlah keuntungan seperti yang dimiliki R22, tetapi mempunyai kelebihan dari sifatnya terhadap minyak dan temperatur buang yang lebih rendah daripada R22.

2.5 SIKLUS KOMPRESI UAP SATU TINGKAT IDEAL

2.5.1 Proses Refrigerasi

Proses refrigerasi menunjukkan perubahan sifat-sifat termodinamika *refrigerant* dan transfer energi dan kerja antara *refrigerant* dan sekitarnya. Transfer energi dan kerja dinyatakan dalam *British thermal unit per hour* (Btu/hr). Unit lainnya yang biasa digunakan adalah ton *refrigerant* (ton). Satu ton = 12.000 Btu/hr kalor yang dibuang, yakni 1 ton es melebur dalam 24 jam = 12.000 Btu/hr. Satuan yang lain adalah satuan SI, yakni kJ/s atau kW.

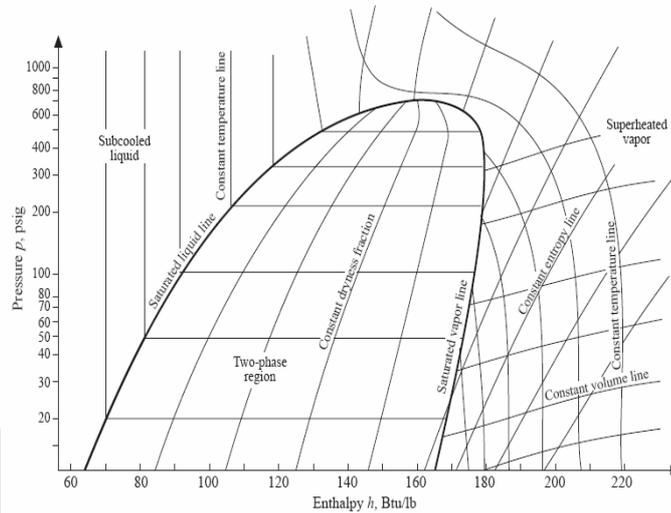
Pada proses refrigerasi terjadi penyerapan kalor dari suatu system yang ingin diturunkan temperaturnya. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan *refrigerant* yang telah dijelaskan sebelumnya. Kemudian kalor yang terserap oleh *refrigerant* dilepaskan ke lingkungan, sehingga *refrigerant* tersebut dapat menyerap kalor kembali.

2.5.2 Siklus Refrigerasi

Ketika sebuah *refrigerant* mengalami sederetan proses seperti evaporasi, kompresi, kondensasi, penghambatan, dan ekspansi, yang menyerap panas dari sumber bertemperatur rendah dan membuangnya ke temperatur yang lebih tinggi, maka *refrigerant* tersebut dikatakan telah menjalani sebuah siklus refrigerasi. Jika kondisi akhir sama dengan kondisi awal, disebut siklus tertutup; jika kondisi akhir tidak sama dengan kondisi awalnya, maka disebut siklus terbuka. Sistem refrigerasi kompresi uap bisa dikelompokkan sebagai siklus satu tingkat, siklus banyak tingkat, siklus campuran, dan siklus tuang (*cascade*).

Diagram tekanan-entalpi (*pressure-enthalpy diagram*) atau *p-h diagram* sering digunakan untuk menghitung transfer energi dan untuk menganalisis kinerja dari sebuah siklus refrigerasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Dalam diagram p-h, tekanan *p* sebagai ordinat, dan entalpi *h* sebagai absis. Garis cairan jenuh dan uap jenuh melingkungi daerah dua fase dimana uap dan cair berdampingan. Daerah dua fase memisahkan daerah cairan bawah dingin (*subcooling*) dan daerah uap panas lanjut (*superheated*). Garis temperatur konstan hampir vertikal di daerah bawah dingin, horizontal dalam daerah dua fase, dan melengkung ke bawah dengan curam di daerah panas lanjut.

Dalam daerah dua fase, diperlihatkan tekanan jenuh menentukan temperatur jenuh. Garis entropi konstan dibelokkan ke atas ke sisi kanan dalam daerah panas lanjut. Setiap jenis *refrigerant* mempunyai diagram p-h sendiri-sendiri.

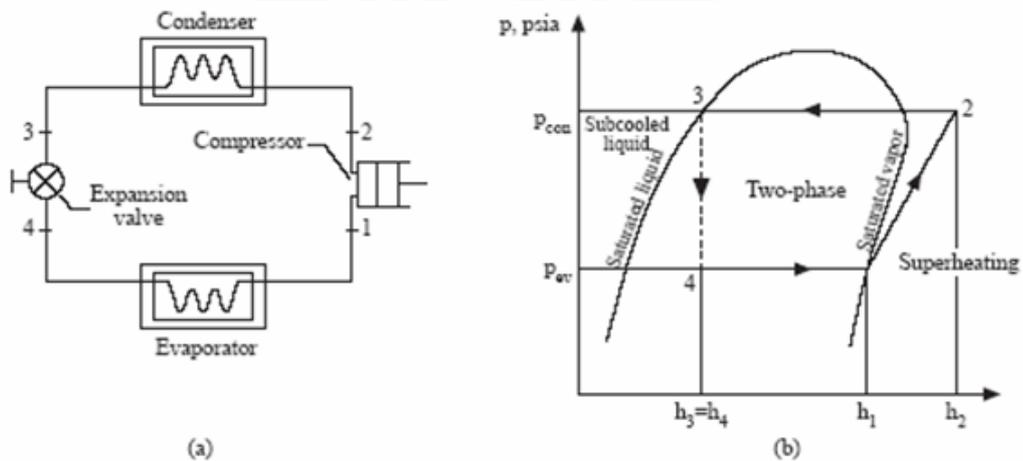


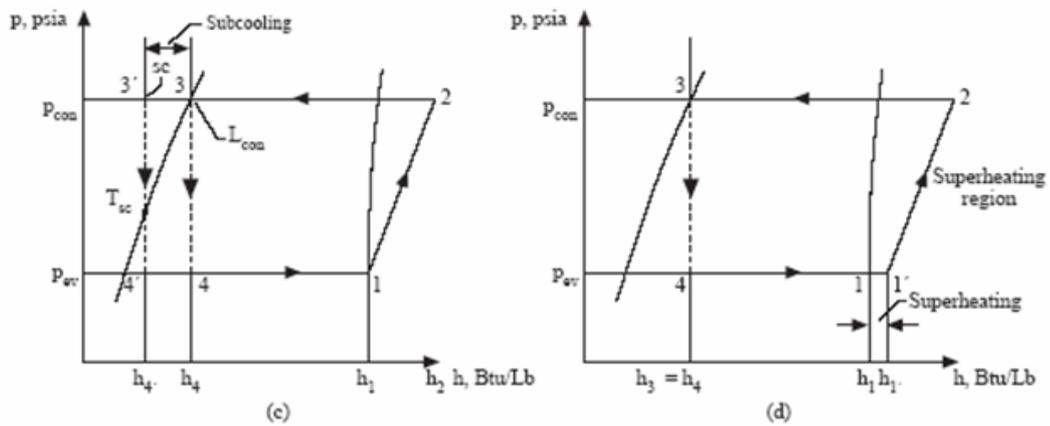
Gambar 2.1 Diagram tekanan-entalpi

2.5.3 Proses Refrigerasi Pada Sebuah Siklus Satu Tingkat Ideal

Sebuah siklus ideal mempunyai kompresi isentropis, dan mempunyai rugi-rugi tekanan dalam saluran pipa, katup, dan komponen lainnya diabaikan. Satu tingkat berarti hanya ada satu tingkat kompresi.

Ada empat proses refrigerasi dalam siklus kompresi uap satu tingkat ideal, seperti ditunjukkan pada gambar:





Gambar 2.2 Siklus refrigerasi kompresi uap satu tingkat ideal: (a) skema diagram, (b) diagram p-h, (c) pendinginan bawah (subcooling), (d) pemanasan lanjut (superheating)

1. Proses evaporasi isothermal 4-1

Refrigerant berevaporasi secara penuh dalam evaporator dan menghasilkan efek refrigerasi q_{rf} dalam Btu/lb:

$$q_{rf} = h_1 - h_4 \quad (2.6)$$

dimana h_1 dan h_4 = entalpi *refrigerant* pada titik 1 dan titik 4 dalam Btu/lb

2. Proses kompresi isentropis 1-2

Uap *refrigerant* diambil oleh kompresor dan dikompresi secara isentropis dari titik 1 ke 2. Kerja input pada kompresor W_{in} , dalam Btu/lb, adalah:

$$W_{in} = h_2 - h_1 \quad (2.7)$$

dimana h_1 dan h_2 = entalpi *refrigerant* pada titik 1 dan titik 2 dalam Btu/lb
Semakin besar perbedaan pada temperatur/tekanan antara tekanan pengembunan p_{cond} dan tekanan penguapan p_{ev} , akan semakin tinggi kerja input pada kompresor.

3. Proses kondensasi isothermal 2-3

Gas panas *refrigerant* yang dikeluarkan dari kompresor dikondensasi dalam kondenser menjadi bentuk cair, dan kalor laten kondensasi dibuang ke air atau udara lingkungan dalam kondenser. Kalor yang dibuang selama kondensasi, q_{2-3} , dalam Btu/lb, adalah

$$-q_{2-3} = h_2 - h_3 \quad (2.8)$$

dimana h_3 = entalpi *refrigerant* pada titik 3 dalam Btu/lb

4. Proses penghambatan 3-4

Refrigerant cair mengalir melalui alat penghambat (contohnya: sebuah katup ekspansi, pipa kapiler, atau orifis) dan tekanannya dikurangi menjadi tekanan evaporasi. Sebagian cairan berubah menjadi uap dan memasuki evaporator. Proses ini adalah proses *ireversibel* dalam siklus ideal, biasanya digambarkan dengan garis putus-putus. Untuk proses penghambatan, diasumsikan bahwa kalor yang diperoleh dari sekitarnya diabaikan:

$$h_3 = h_4 \quad (2.9)$$

Laju aliran massa *refrigerant* \dot{m}_r , dalam lb/min, adalah:

$$\dot{m}_r = \frac{q_{rc}}{60q_{rf}} \quad (2.10)$$

dimana q_{rc} = kapasitas refrigerasi dalam sistem, dalam Btu/hr

Siklus refrigerasi kompresi uap satu tingkat ideal dalam diagram $p-h$ dibagi ke dalam dua daerah tekanan, yaitu tekanan tinggi (p_{con}) dan tekanan rendah (p_{ev}).

2.5.4 Koefisien Kinerja (Coefficient of Performance) Siklus Refrigerasi

Koefisien Kinerja atau *Coefficient of Performance* (COP) adalah bilangan tidak berdimensi yang digunakan untuk menyatakan kinerja dari sebuah siklus termodinamik atau sistem termal. Besarnya COP bisa lebih dari 1.

- Jika sebuah refrigerator digunakan untuk menghasilkan sebuah efek refrigerasi, COP_{ref} adalah:

$$COP_{ref} = \frac{q_{rf}}{W_{in}} \quad (2.11)$$

- Jika sebuah pompa kalor digunakan untuk menghasilkan efek pemanasan, kinerjanya dinyatakan dengan COP_{hp} , yakni:

$$COP_{hp} = \frac{q_{2-3}}{W_{in}} \quad (2.12)$$

- Untuk sebuah sistem *heat recovery* ketika efek refrigerasi dan efek pemanasan dihasilkan, COP_{hr} dinyatakan oleh perbandingan jumlah nilai absolut q_{rf} dan q_{2-3} terhadap kerja input, atau:

$$COP_{hr} = \frac{(|q_{rf}| + |q_{2-3}|)}{W_{in}} \quad (2.13)$$

2.5.5 Bawah Dingin (*Subcooling*) dan Panas Lanjut (*Superheating*)

Refrigerant cair yang diembunkan biasanya didinginkan ke temperatur yang lebih rendah dari temperatur jenuhnya pada tekanan kondensasi, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2(c). *Subcooling* meningkatkan efek refrigerasi menjadi $q_{rf,sc}$ seperti ditunjukkan pada gambar 2.2(c):

$$q_{rf,sc} = (h_{4'} - h_1) > (h_4 - h_1) \quad (2.14)$$

Entalpi *refrigerant* cair yang mengalami *subcooling* h_{sc} hampir sama dengan entalpi *refrigerant* cair jenuh pada temperatur bawah dingin (*subcooled*) $h_{s,sc}$:

$$h_{sc} = h_{3'} = h_{4'} = h_{1.con} - c_{pr} (T_{con} - T_{sc}) \approx h_{s,sc} \quad (2.15)$$

dimana: $h_{3'}$, $h_{4'}$ = entalpi *refrigerant* cair masing-masing di titik 3' dan 4' dalam Btu/lb

$h_{1.con}$ = entalpi cairan jenuh pada temperatur kondensasi, dalam Btu/lb

c_{pr} = kalor spesifik *refrigerant* cair pada tekanan konstan, dalam Btu/lb.°F

T_{con} = Temperatur kondensasi atau tekanan jenuh *refrigerant* cair pada tekanan kondensasi, dalam °F

T_{sc} = Temperatur *refrigerant* cair yang didinginkan lanjut (*subcooled*), dalam °F

Umumnya, pada siklus refrigerasi senantiasa dilakukan peningkatan temperatur *refrigerant* diluar kubah uap, peningkatan temperatur ini disebut dengan *superheating*. Tujuan pemanasan lanjut (*superheating*) adalah untuk menjaga *refrigerant* cair agar tidak masuk ke dalam kompresor dan menyebabkan kerusakan. Pemanasan lanjut ditunjukkan seperti pada gambar 2.2(d). Derajat pemanasan lanjut sebagian besar bergantung pada jenis *refrigerant*, konstruksi saluran hisap, dan jenis kompresor. Titik *refrigerant* uap setelah pemanasan lanjut pada sebuah sistem yang ideal harus pada tekanan evaporator dengan sebuah derajat panas lanjut spesifik dan bisa diplot dalam diagram $p-h$ untuk berbagai *refrigerant*.

2.6 REFRIGERANT SEKUNDER

Refrigerant sekunder atau biasa disebut pendingin sekunder adalah fluida yang menyerap kalor dari bahan yang ingin didinginkan, kemudian menghantarkannya ke evaporator dalam sistem refrigerasi. *Refrigerant* sekunder digunakan sebagai fluida penghantar panas yang mengubah temperatur dengan mengambil energi kalor tanpa merubah fasenya. Untuk temperatur refrigerasi yang lebih rendah, dibutuhkan fluida pendingin dengan titik beku di bawah titik beku air.

Pendingin sekunder harus kompatibel dengan material lain dalam sistem refrigerasi, pada temperatur dan tekanan operasional, untuk ketahanan maksimum komponen dan umur operasi. Pendingin seharusnya juga kompatibel dengan lingkungan dan regulasi keamanan, serta penggunaan dan penggantinya ekonomis.

Secondary refrigerant seharusnya memiliki temperatur beku minimum 3 K sampai 8 K dibawah temperatur terendah yang ingin dicapai. Ketika digunakan pada temperatur yang terendah dalam sistem, viskositas pendingin seharusnya cukup rendah untuk memberikan pemindahan panas dengan baik dan jatuh tekanan yang pantas. Tekanan uap pendingin seharusnya tidak melebihi yang diperbolehkan pada temperatur maksimum yang dihadapi. Untuk menghindari kevakuman dalam sistem pendingin sekunder bertekanan uap yang rendah, pendingin bisa diberikan tekanan dengan nitrogen kering bertekanan atur (*pressure-regulated dry nitrogen*) dalam tangki ekspansi.

2.6.1 Perbandingan Kinerja

Tabel di atas memperlihatkan perbandingan kinerja pendingin sekunder, baik dilihat dari freeze point, *heat transfer coefficient*, maupun karakteristik lainnya.

Secondary Coolant	Concentration (by Mass), %	Freeze Point, °C	$L/(s \cdot kW)^a$	Pressure Drop, ^b kPa	Heat Transfer Coefficient ^c $h_f, W/(m^2 \cdot K)$
Propylene glycol	39	-20.6	0.0459	20.064	1164
Ethylene glycol	38	-21.6	0.0495	16.410	2305
Methanol	26	-20.7	0.0468	14.134	2686
Sodium chloride	23	-20.6	0.0459	15.858	3169
Calcium chloride	22	-22.1	0.0500	16.685	3214
Aqua ammonia	14	-21.7	0.0445	16.823	3072
Tetrahydrofuran	100	-86.1	0.1334	14.548	2453
d-Limonene	100	-96.7	0.1160	10.204	1823
Methylene chloride	100	-96.7	0.1146	12.824	3322
R-11	100	-111.1	0.1364	14.341	2450

^aBased on inlet secondary coolant temperature at pump of 3.9°C.

^bBased on use length of 4.9 m tube with 26.8 mm ID and use of Moody Chart (1944) for an average velocity of 2.13 m/s. Input/output losses equal $f \cdot \rho \cdot v^2$ for 2.13 m/s velocity. Evaluations are at a bulk temperature of -6.7°C and a temperature range of 5.6 K.

^cBased on curve fit equation for Kern's (1950) adaptation of Sieder and Tate's (1936) heat transfer equation using 4.9 m tube for $L/D = 181$ and film temperature of 2.8°C lower than average bulk temperature with 2.134 m/s velocity.

Tabel 2.1 Perbandingan kinerja pendingin sekunder

2.7 WAKTU PEMBEKUAN ES

Waktu pembekuan^[9] ditentukan oleh ukuran cetakan es dan temperatur dari air garam (*brine*) yang dapat dilihat korelasinya sebagai berikut:

$$x = \frac{7a^2}{32 - T} \quad (2.16)$$

dimana: x = Waktu pembekuan es (jam)

a = Lebar terpendek cetakan es bagian atas (in)

T = Temperatur air garam (°F)

Cetakan es terbuat dari pelat yang telah digalvanis, disambung dengan rivet, tunggal atau ganda, solder, atau las. Bagian bawah cetakan biasanya lebih tebal daripada bagian sisinya, yang bertujuan untuk menambah daya tahan terhadap korosi serta menambah kekuatan. Sekeliling bagian atas cetakan diberi lapisan pelat dengan tebal 38.1 sampai 50.8 mm, selain sebagai penguat, juga digunakan untuk mengangkat cetakan. Pada pelat pelapis ini juga diberi lubang yang berfungsi bila cetakan ini akan diambil satu persatu. Tabel berikut ini memperlihatkan berat dan dimensi es balok.^[14]

Berat Es per Balok Kg	Dimensi cetakan Es		Waktu Pembekuan dalam jam			
			Temperatur air garam (<i>brine</i>) °C			
	atas	x panjang	-5	-7.5	-10	-12.5
	bawah	mm				
25	240 x 150	x 1115	24.0	16.0	12.0	9.6
	210 x 120					
25	190 x 190	x 1115	26.8	17.9	13.4	10.7
	160 x 160					
50	380 x 190	x 1115	37.3	24.8	18.6	15.0
	340 x 160					
50	260 x 260	x 1115	48.0	32.0	24.0	19.2
	230 x 230					
100	495 x 275	x 1175	75.2	50.1	37.6	30.1
	460 x 250					
136	560 x 280	x 1220	77.8	51.9	38.9	31.1
	535 x 254					

Tabel 2.2 Berat, dimensi dan waktu pembekuan es

2.8 PENGADUK AIR GARAM (*BRINE AGITATORS*)

Fungsi pengadukan adalah untuk mensirkulasikan *brine* untuk mempermudah konduksi dan perpindahan panas. Selain itu, agitator ini juga

berfungsi untuk meratakan temperatur pada *brine*. Kecepatan sirkulasi *brine* juga harus sesuai karena bila terlalu cepat atau terlalu lambat maka perpindahan kalor ke objek yang ingin didinginkan akan tidak efektif.

2.8.1 Aliran Axial

Agitator ini, selain memberikan efek pengadukan pada arah aliran brine, tetapi juga berfungsi mengalirkan brine sehingga memiliki arah sejajar dengan sumbu porosnya. Hal ini dapat terjadi dengan menggunakan gerak putaran dari blade.

2.8.2 Mekaisme Kerja

Karena adanya perputaran dari blades yang mempunyai kedudukan sudut tertentu sehingga tekanan dari sisi hisap blades pada daerah suction menjadi lebih rendah, akibatnya fluida mengalir ke sisi hisap, blades tersebut yang selanjutnya masuk ke sisi tekanan blades, pada daerah discharge yang bertekanan lebih tinggi, dan dari sini fluida bergerak mengalir ke tekanan yang lebih rendah.

2.8.3 Kecepatan Blades

Kecepatan blades dapat ditentukan dari kecepatan motor yang digunakan dengan menggunakan persamaan:

$$u = \frac{\pi \times D_{mean} \times n}{60}$$

Dimana:

u = kecepatan blades (m/s)

$$D_{mean} = \frac{D_{tip} + D_{hub}}{2} \quad (m)$$

N = putaran motor (rpm)

2.8.4 Kecepatan Axial

Kecepatan axial (v_m) fluida akibat putaran blades dapat ditentukan berdasarkan sudut (β) yang dibentuk oleh kecepatan sentrifugal (w) terhadap kecepatan blades (u) serta sudut (α) antara kecepatan tangensial blades (v) terhadap kecepatan blades (u). Sehingga kecepatan axial ini diperoleh dengan persamaan:

$$w + v = u$$

$$\frac{v_m}{\tan \beta} + \frac{v_m}{\alpha} = u$$

Dimana:

u = kecepatan blades (m/s)

w = kecepatan sentrifugal (m/s)

v = kecepatan tangensial blades (m/s)

v_m = kecepatan axial (m/s)

α = sudut antara v terhadap u ($^\circ$)

β = sudut antara w terhadap u ($^\circ$)

2.8.5 Debit Aliran

Debit aliran ditentukan oleh kecepatan axial fluida dan luas penampang:

$$Q = v_m \times A$$

Dimana

Q = debit (m^3/s)

v_m = kecepatan axial (m/s)

A = luas penampang (m^2)

2.8.6 Laju Aliran Massa

Laju aliran massa dipengaruhi oleh debit aliran dan fluida yang digunakan:

$$\dot{m} = \rho \times Q$$

Dimana:

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

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

Q = debit (m^3/s)

2.9 HOIST, DIPTANK, DAN ICE DUMPS

Es yang telah membeku dalam cetakan diangkat menggunakan *hand chain hoist* yang terpasang diatas cetakan. *Hand chain hoist* menggunakan metode pengangkatan secara manual dengan kerekan rantai yang digantung. *Hoist* ini akan mengangkat pemegang cetakan sehingga dapat mengangkat cetakan satu baris sekaligus.

Hoist yang dipakai merupakan *hoist* yang dapat bergerak pada 2 axis. Pertama, dapat bergerak naik turun untuk menaikkan dan menurunkan pemegang cetakan. Kemudian, *hoist* juga dapat bergerak maju mundur pada beam sehingga mampu memindahkan cetakan dari *ice bank* untuk dipanen. Semuanya dilakukan secara manual dengan menggunakan tenaga manusia.

Pemilihan *hoist* disesuaikan dengan beban es yang akan diangkat ditambah berat cetakan dan pemegangnya. Cetakan es kemudian dibawa oleh *hoist* ke *dip tank* dimana cetakan ini akan direndam air sampai es dalam cetakan mengambang. Temperatur air dalam *dip tank* tidak boleh lebih dari 21.1°C. Untuk menghindari adanya tegangan pada es dan retakan atau bahkan meleleh.

Setelah es mengambang dalam cetakan, kemudian es diambil. Salah satu cara adalah dengan menempatkan cetakan-cetakan dengan pemegangnya secara tepat pada sebuah *tilter*. Segera setelah *hoist hook* dikendurkan, *tilter* tadi diputar, sehingga posisinya membuat es bisa keluar dari cetakan.

Pada beberapa tempat dilakukan *tempering* pada es untuk mengurangi terjadinya retak pada es. *Tempering* dilakukan sebelum es dimasukkan ke dalam tangki perendam. Es dibiarkan atau disimpan dekat tangki perendam selama 0.16 sampai 0.37 jam (10-20 menit) sebelum dikeluarkan dari cetakan.^[13]

2.10 PERALATAN REFRIGERASI DAN PENDINGINAN EVAPORATIF

2.10.1 Kompresor Refrigerasi

Sebuah kompresor refrigerasi adalah jantung dari sebuah sistem kompresi uap. Kompresor menaikkan tekanan *refrigerant* sehingga *refrigerant* bisa terkondensasi menjadi cair, dihambat, dan dievaporasikan menjadi uap untuk menghasilkan efek refrigerasi. Kompresor juga memberikan gaya dorong untuk sirkulasi *refrigerant* melalui kondenser, katup ekspansi, dan evaporator.

Berdasarkan proses kompresi, kompresor refrigerasi bisa dibagi menjadi kompresor positif (*positive displacement*) dan perpindahan nonpositif (*nonpositive displacement*). Kompresor perpindahan positif menaikkan tekanan *refrigerant* dengan mengurangi volume internal dari ruang kompresi. Kompresor *reciprocating*, *scroll*, *rotary*, dan *screw* adalah kompresor perpindahan positif. Kompresor sentrifugal adalah satu-satunya jenis kompresor refrigerasi

perpindahan nonpositif yang banyak digunakan dalam sistem refrigerasi pada saat ini.

Berdasarkan penyekatan *refrigerant*, kompresor refrigerasi dapat dikelompokkan menjadi:

- Kompresor hermetik, dimana motor dan kompresor disekat atau dilas dalam rumah (*housing*) yang sama untuk meminimalisasi kebocoran *refrigerant* dan untuk mendinginkan motor yang berputar dengan menggunakan uap yang dihisap.
- Kompresor semihmetik, yakni dimana motor dan kompresor tertutup dalam satu rumah (*housing*) tetapi dapat diambil dari kepala silinder untuk perbaikan dan pemeliharaan.
- Kompresor terbuka, yakni dimana kompresor dan motor tertutup dalam dua rumah (*housing*) yang terpisah.

Kompresor refrigerasi biasanya sering dikendalikan oleh motor secara langsung atau oleh rentetan gear.

2.10.2 Indeks Performa

Efisiensi volumetrik η_v dari sebuah kompresor refrigerasi didefinisikan sebagai:

$$\eta_v = \frac{\dot{V}_{a.v}}{\dot{V}_p} \quad (2.1)$$

dimana: $\dot{V}_{a.v}$ = laju alir volume yang memasuki kompresor (m^3/s),

\dot{V}_p = laju volume langkah kompresor (m^3/s).

Efisiensi isentropis η_{isen} , efisiensi kompresi η_{cp} , efisiensi kompresor η_{com} , dan efisiensi mekanik η_{mec} didefinisikan sebagai:

$$\eta_{isen} = \frac{(h_2 - h_1)}{(h'_2 - h_1)} = \eta_{cp} \eta_{mec} = \eta_{com}$$

$$\eta_{cp} = \frac{W_{sen}}{W_v}$$

$$\eta_{mec} = \frac{W_v}{W_{com}}$$
(2.2)

dimana: h_1, h_2, h'_2 = Entalpi uap hisap, pelepasan gas panas yang ideal, pelepasan gas panas aktual, dalam Btu/lb

W_{isen}, W_v, W_{com} = Kerja isentropis ($h_2 - h_1$), kerja yang diberikan kepada uap *refrigerant*, dan kerja yang diberikan kepada poros kompresor, dalam Btu/lb

Daya input aktual yang diberikan kepada kompresor dapat dihitung dengan rumus:

$$P_{com} = \frac{\dot{m}_r (h_2 - h_1)}{(42.41 \eta_{isen} \eta_{mo})}$$

$$\dot{m}_r = V_p \eta_v \rho_{suc}$$

$$\eta_{mo} = \frac{P_{com}}{P_{mo}}$$
(2.3)

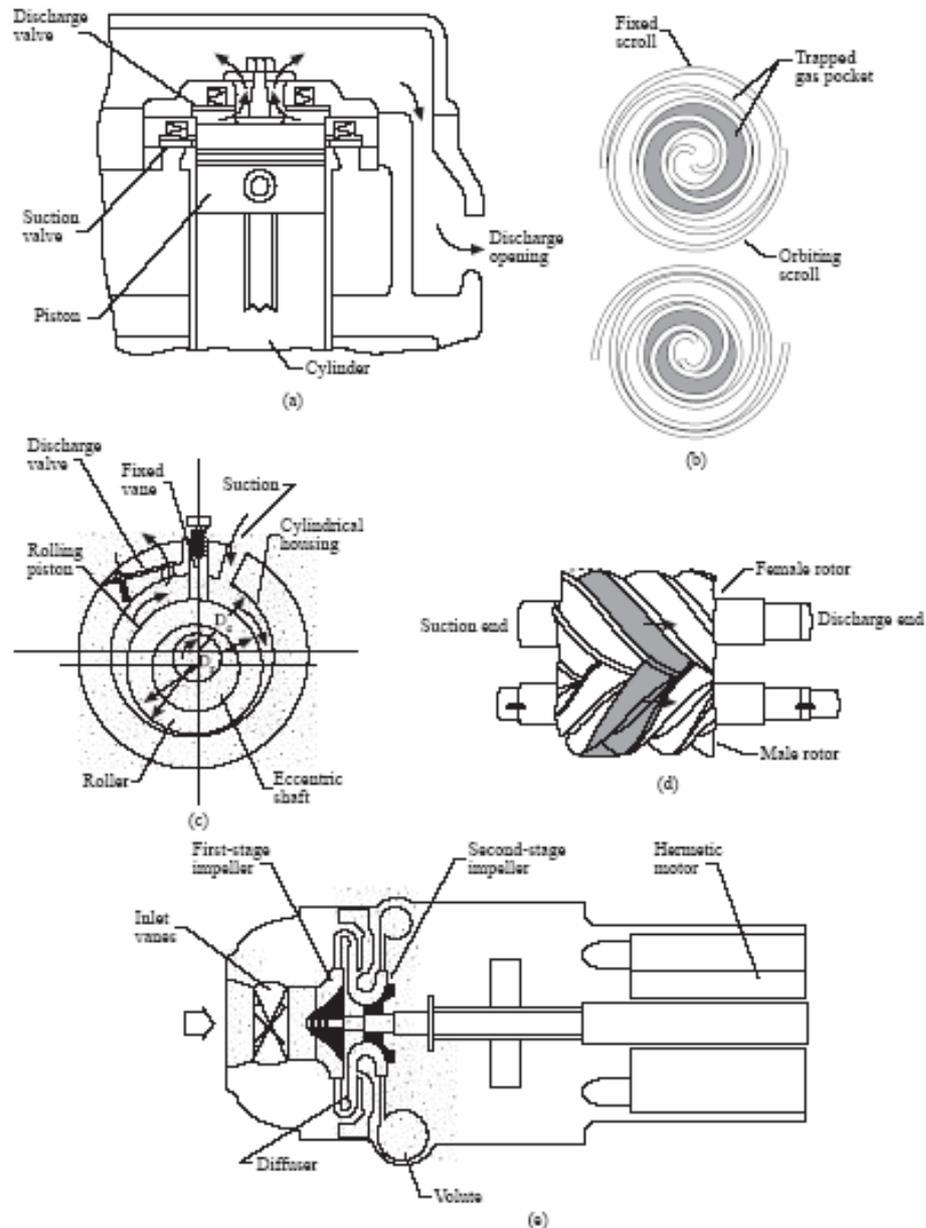
dimana: \dot{m}_r = laju aliran massa *refrigerant*, dalam lb/min

ρ_{suc} = massa jenis uap yang dihisap, lb/ft³

P_{mo} = Daya input ke motor kompresor, dalam hp

Konsumsi daya, kW/ton *refrigerant*, adalah indeks energi yang digunakan dalam industri selain EER dan COP.

Kompresor refrigerasi yang sering digunakan sekarang adalah kompresor *reciprocating, scroll, screw, rotary*, dan sentrifugal. Gambar 2.3 adalah gambar jenis-jenis kompresor yang biasa digunakan.



Gambar 2.3 Berbagai jenis kompresor refrigerasi: (a) reciprocating, (b) scroll, (c) rotary, (d) twin-screw, (e) sentrifugal

2.10.3 Kondenser Refrigerasi

Sebuah kondenser refrigerasi adalah sebuah penukar kalor dimana gas panas *refrigerant* diembunkan atau dikondensasi menjadi cair dan kalor laten kondensasi dilepaskan ke udara bebas, permukaan air, atau air khusus. Dalam sebuah kondenser, gas panas terlebih dahulu di turunkan temperaturnya dari temperatur pemanasan lanjut (disebut proses *desuperheated*), kemudian dikondensasi menjadi cair, dan akhirnya didinginkan lanjut (*subcooled*).

Kapasitas kondenser dihitung dari jumlah kalor yang dilepaskan, Q_{rej} dalam Btu/hr, oleh kondenser yang didefinisikan sebagai jumlah kalor yang dipindahkan dari kondenser selama *desuperheating*, kondensasi, dan *subcooling*. Untuk sebuah sistem refrigerasi yang menggunakan kompresor hermetik, Q_{rej} bisa dihitung dengan:

$$Q_{rej} = U_{con} A_{con} \Delta T_m = 60 \dot{m}_r (h_2 - h'_3) = q_{rl} + \frac{2545 P_{com}}{\eta_{mo}} \quad (2.20)$$

dimana: U_{con} = Koefisien perpindahan kalor total yang melewati dinding pipa dalam kondenser, dalam Btu/(hr.ft².°F)

A_{con} = Luasan kondensasi dalam kondenser, dalam ft²

ΔT_m = Perbedaan temperatur logaritmik, dalam °F

\dot{m}_r = Laju aliran massa *refrigerant*, dalam lb/min

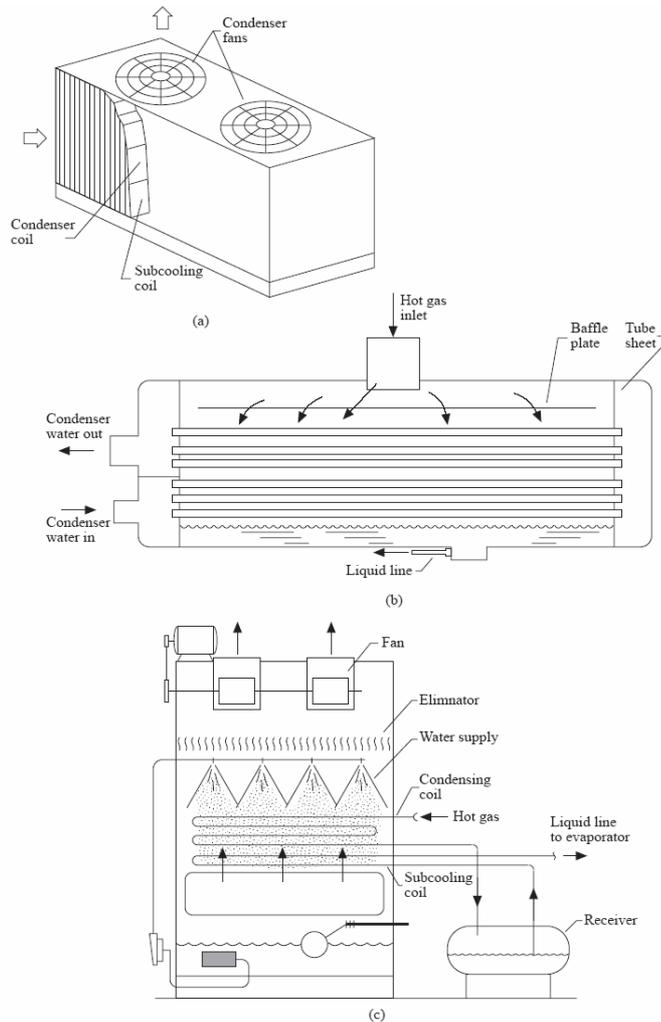
h_2, h'_3 = Entalpi dari uap *refrigerant* pada sisi hisap dan gas panas, dalam Btu/hr

q_{rl} = Beban refrigerasi pada evaporator, dalam Btu/hr

Sebuah faktor yang berhubungan dengan Q_{rej} dan q_{rl} adalah faktor pelepasan kalor, F_{rej} , yang didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah kalor yang dilepas dengan beban refrigerasi, atau ditulis dengan:

$$F_{rej} = \frac{Q_{rej}}{q_{rl}} = 1 + \frac{2545 P_{com}}{q_{rl} \eta_{mo}} \quad (2.4)$$

Berdasarkan proses pendinginan *refrigerant* selama kondensasi, kondenser *refrigerant* dikelompokkan menjadi kondenser berpendingin udara (*air-cooled*), berpendingin air (*water-cooled*), dan berpendingin evaporatif (*evaporative-cooled*). Gambar 2.4 menunjukkan gambar berbagai jenis kondenser.



Gambar 2.4 Berbagai jenis kondenser refrigerasi: (a) Berpendingin udara, (b) berpendingin air, (c) berpendingin evaporatif

2.10.4 Evaporator dan Alat Kendali Aliran Refrigerant

Sebuah evaporator adalah sebuah penukar kalor dimana *refrigerant* cair diuapkan dan mengambil panas dari udara, air, air asin atau zat lain yang ada disekitarnya untuk menghasilkan efek refrigerasi. Jenis evaporator berdasarkan medium yang akan didinginkanya dikelompokan menjadi:

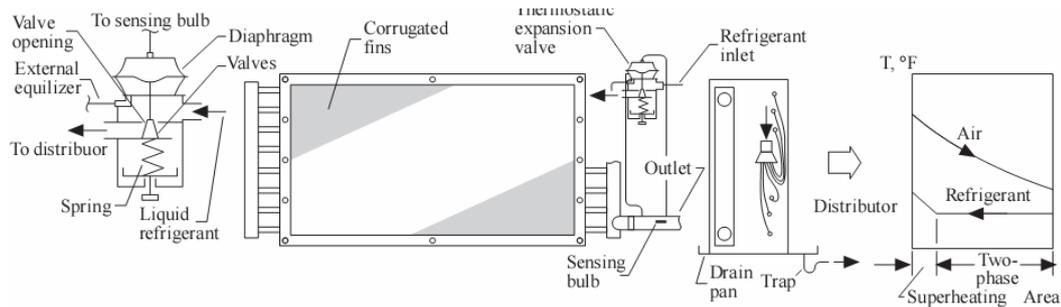
- *Direct expansion DX coil* yang merupakan pendingin udara, dan *refrigerant* diberikan berdasarkan derajat panas lanjutnya setelah penguapan.
- *Direct expansion ice makers* atau *liquid overfeed ice makers* yakni *refrigerant* cair didorong melalui pipa tembaga atau bagian dalam *plate heat exchanger* dan diuapkan. Efek refrigerasi membekukan air dalam air garam yang mengalir melalui permukaan luar pipa atau *plate heat*

exchanger. Pada *direct expansion ice makers*, *refrigerant* cair secara penuh menguap di dalam pipa tembaga, dan uap yang dipanas lanjut diambil oleh kompresor. Pada *liquid overfeed ice makers*, *refrigerant* cair membanjiri dan membasahi permukaan dalam pipa tembaga atau *plate heat exchanger*. Hanya sebagian dari *refrigerant* cair yang diuapkan. Sisanya kembali ke sebuah penampungan (*receiver*) dan dipompakan kembali ke pipa tembaga atau *plate heat exchanger* pada sebuah laju sirkulasi dua sampai beberapa kali lebih besar daripada laju evaporasi.

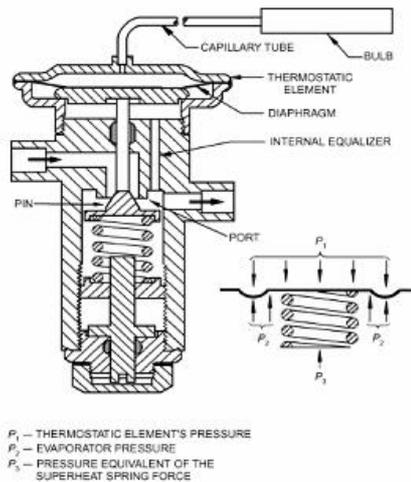
- *Flooded shell-and-tube liquid coolers* yakni *refrigerant* membanjiri dan membasahi semua permukaan penguapan dan menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang tinggi. Sebuah *flooded shell-and-tube liquid cooler* adalah sama dengan konstruksi dari sebuah *shell-and-tube water-cooled condenser*, kecuali *refrigerant* cairnya berada di bawah, dan pelepasan uap berada di atas. Kecepatan air di dalam pipa tembaga biasanya antara 4 sampai 12 ft/sec dan tekanan airnya biasanya berkurang di bawah 10 psi. *Flooded liquid coolers* dapat memberikan luas permukaan evaporasi yang lebih besar dan membutuhkan ruangan yang minimal. *Flooded liquid coolers* banyak digunakan dalam sistem pengkondisian udara terpusat (*central air-conditioning*) yang besar.

Alat kendali aliran *refrigerant* yang digunakan pada saat ini termasuk dalam kategori katup ekspansi termostatik, katup apung, orifis berlapis, dan pipa kapiler.

- Sebuah katup ekspansi termostatik mencekik tekanan *refrigerant* dari tekanan kondensasi ke tekanan evaporasi dan pada saat yang sama membatasi laju dari pemberian *refrigerant* berdasarkan derajat panas lanjut dari uap pada keluaran evaporator. Sebuah katup ekspansi termostatik biasanya dipasang sebelum distributor *refrigerant* dalam *DX coil* seperti ditunjukkan pada gambar 2.5. Bola peraba (*sensing bulb*) disambungkan ke bagian atas dari diafragma oleh sebuah pipa penghubung.



Gambar 2.5 Direct expansion coil dengan katup ekspansi termostatik

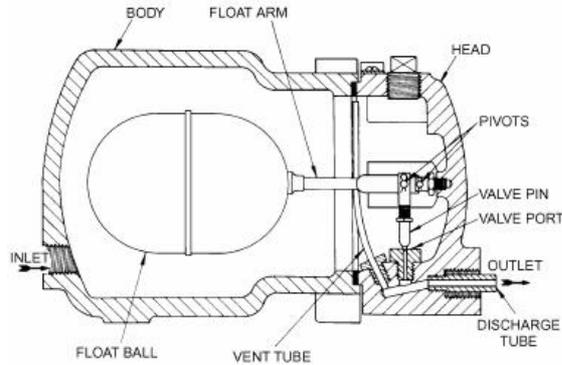


Gambar 2.6 Katup ekspansi termostatik

Ketika *refrigerant* cair melewati katup ekspansi termostatik yang terbuka, tekanannya dikurangi menjadi tekanan evaporasi. Cairan dan bagian kecil *refrigerant* yang teruapkan kemudian mengalir melalui distributor dan memasuki berbagai rangkaian *refrigerant*. Jika beban refrigerasi pada *DX coil* meningkat, *refrigerant* cair yang menguap lebih banyak. Hal ini menaikkan derajat panas lanjut uap yang keluar pada outlet dan temperatur bola peraba (*sensing bulb*). Sebuah temperatur bola yang lebih tinggi mendesak tekanan jenuh yang lebih tinggi pada diafragma atas. Pin katup kemudian bergerak ke bawah dan melebarkan bukaan. Sehingga lebih banyak *refrigerant* cair yang memasuki *DX coil* untuk mendapatkan beban refrigerasi yang lebih banyak. Jika beban refrigerasi berkurang, maka derajat panas lanjut pada keluaran dan temperatur bola peraba akan turun, dan menyebabkan katup terbuka lebih sempit.

- Sebuah katup apung adalah sebuah katup dimana pelampung digunakan untuk mengatur bukaan katup untuk menjaga tingkat *refrigerant* cair pada

suatu ketinggian tertentu. Tingkat cairan yang lebih rendah menyebabkan pin katup yang lebih rendah dan sehingga menghasilkan bukaan yang lebih lebar.



Gambar 2.7 Gambar katup apung

- Dalam sebuah sistem refrigerasi sentrifugal, dua atau lebih plat orifis atau biasa disebut orifis berlapis, terkadang dipasang dalam saluran cairan antara kondenser dan *flash cooler* dan antara *flash cooler* dan *flooded liquid cooler* untuk menurunkan tekanan *refrigerant* dan mengatur umpan *refrigerant*.
- Sebuah pipa kapiler, terkadang disebut pipa pembatas, adalah sebuah pipa berdiameter kecil dengan panjang tertentu yang dipasang antara kondenser dan evaporator untuk menurunkan tekanan *refrigerant* dari p_{con} menjadi p_{ev} dan untuk mengukur aliran *refrigerant* ke evaporator. Pipa kapiler biasanya terbuat dari tembaga. Diameter dalamnya berkisar antara 0,05 sampai 0,06 in dan panjangnya bervariasi dari satu inci hingga beberapa kaki. Pipa kapiler biasanya cocok digunakan untuk sebuah sistem pompa kalor dimana aliran *refrigerant* mungkin saja dibalik.