

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistim Refrigerasi Kompresi Uap

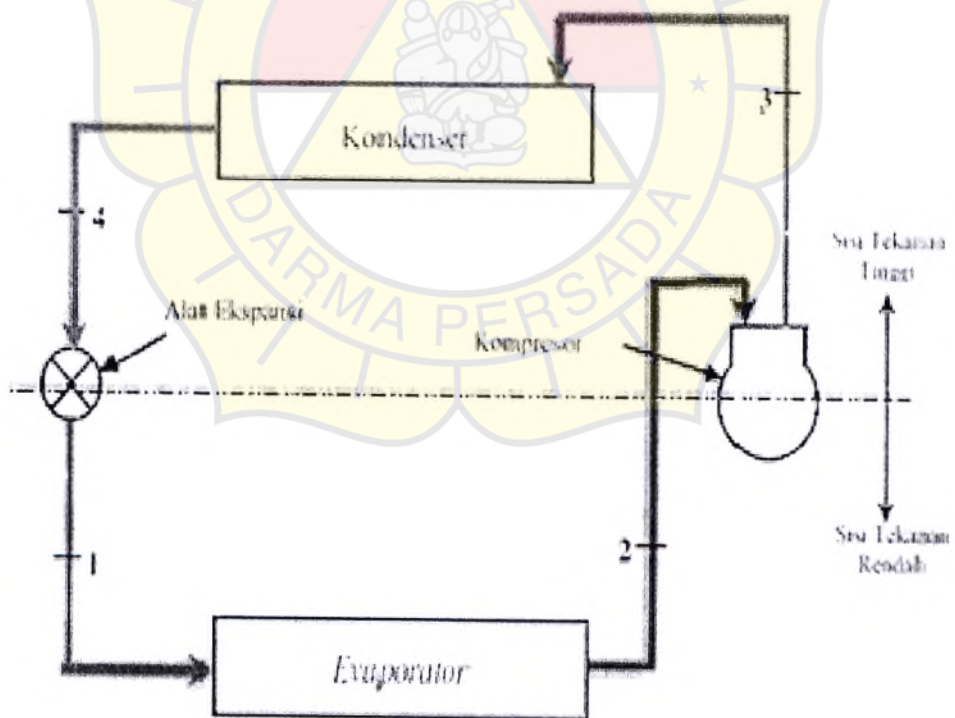
Siklus refrigerasi kompresi uap memiliki dua keuntungan. Pertama, sejumlah besar energi panas diperlukan untuk merubah cairan menjadi uap, dan oleh karena itu banyak panas yang dapat dibuang dari ruang yang disejukkan. Kedua, sifat-sifat isothermal penguapan membolehkan pengambilan panas tanpa menaikkan suhu fluida kerja ke suhu berapapun didinginkan. Hal ini berarti bahwa laju perpindahan panas menjadi tinggi, sebab semakin dekat suhu fluida kerja mendekati suhu sekitarnya akan semakin rendah laju perpindahan panasnya. Siklus refrigerasi ditunjukkan dalam Gambar 2.1 dan dapat dibagi menjadi tahapan-tahapan Berikut;

1 – 2. Cairan refrigeran dalam evaporator menyerap panas dari sekitarnya, biasanya udara, air atau cairan proses lain. Selama proses ini cairan merubah bentuknya dari cair menjadi gas, dan pada keluaran evaporator gas ini diberi pemanasan berlebih/ superheated gas.

2 – 3. Uap yang diberi panas berlebih masuk menuju kompresor dimana tekanannya dinaikkan. Suhu juga akan meningkat, sebab bagian energi yang menuju proses kompresi dipindahkan ke refrigeran.

3 – 4. Superheated gas bertekanan tinggi lewat dari kompresor menuju kondenser. Bagian awal proses refrigerasi (3-3a) menurunkan panas superheated gas sebelum gas ini dikembalikan menjadi bentuk cairan (3a-3b). Refrigerasi untuk proses ini biasanya dicapai dengan menggunakan udara atau air. Penurunan suhu lebih lanjut terjadi pada pekerjaan pipa dan penerima cairan (3b - 4), sehingga cairan refrigeran didinginkan ke tingkat lebih rendah ketika cairan ini menuju alat ekspansi.

4 - 1 Cairan yang sudah didinginkan dan bertekanan tinggi melintas melalui peralatan ekspansi, yang mana akan mengurangi tekanan dan mengendalikan aliran menuju evaporator.^[2]



Gambar 2.1 Gambaran Skematis Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

Kondenser harus mampu membuang panas gabungan yang masuk evaporator dan kondenser. Dengan kata lain: $(1 - 2) + (2 - 3)$ harus sama dengan $(3 - 4)$. Melalui alat ekspansi tidak terdapat panas yang hilang maupun yang diperoleh.

2.2 Jenis-Jenis Refrigeran yang Digunakan dalam Sistem Kompresi Uap

Terdapat berbagai jenis refrigeran yang digunakan dalam sistem kompresi uap. Suhu refrigerasi yang dibutuhkan sangat menentukan dalam pemilihan fluida. Refrigeran yang umum digunakan adalah yang termasuk kedalam keluarga *chlorinated fluorocarbons* (CFCs, disebut juga Freons): R-11, R-12, R-21, R-22 dan R-502. Sifat-sifat bahan-refrigeran dan kinerja bahan refrigeran tersebut diberikan dalam Tabel dibawah:

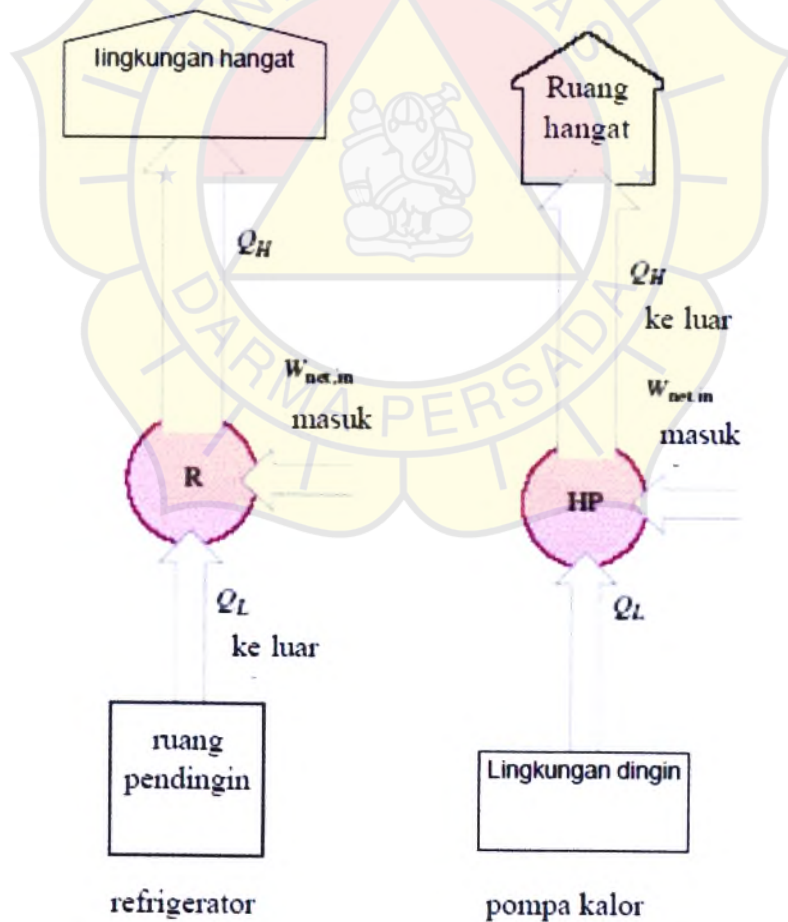
Tabel 2.1. Sifat-sifat refrigerant yang biasa digunakan (Arora, C.P., 2000)

Refrigeran	Titik *	Titik	Tekanan	Volume	Entalpi(KJ/Kg)	
	didih(°C)	beku(°C)	Uap(Kg/cm ²)	Uap(m ³ /Kg)	Cair	Uap
R - 11	-23,82	-111,0	25,73	0,61170	191,40	385,43
R - 12	-29,79	-158,0	219,28	0,07702	190,72	347,97
R - 22	-30,76	-160,0	354,74	0,06513	188,55	400,83
R - 302	-35,40	...	414,30	0,04234	188,87	342,31
R - 7	-33,30	-77,7	289,93	0,41949	808,71	487,76

Pemilihan refrigeran dan suhu pendingin dan beban yang diperlukan menentukan pemilihan kompresor, juga perancangan kondenser, evaporator, dan alat pembantu lainnya. Faktor tambahan seperti kemudahan dalam perawatan, persyaratan fisik ruang dan ketersediaan utilitas untuk peralatan pembantu (air, daya, dll.) juga mempengaruhi pemilihan komponen.

2.3 Prinsip Kerja

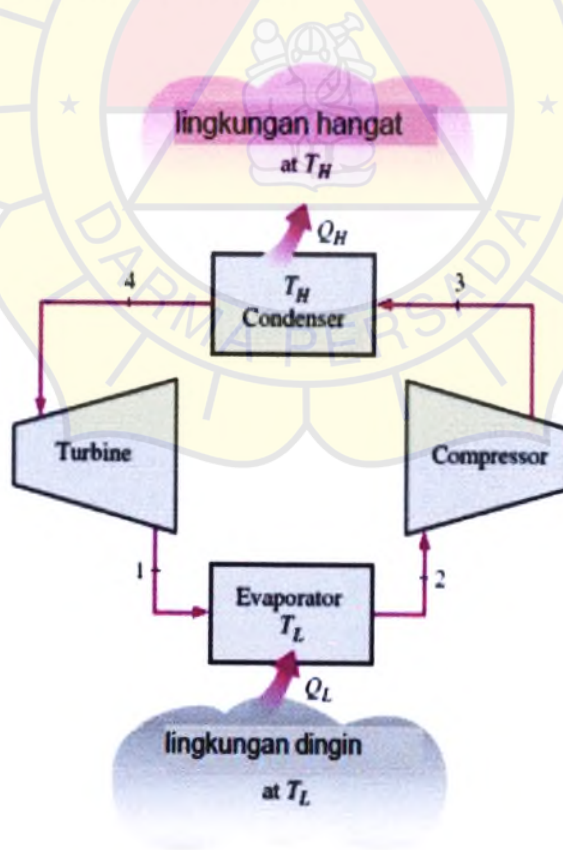
Mesin refrigerasi dan pompa kalor adalah mesin yang bekerja menyerap kalor dari lingkungan bersuhu rendah kemudian dipindahkan ke lingkungan bersuhu tinggi. Pada gambar 23.1 adalah cara kerja mesin tersebut



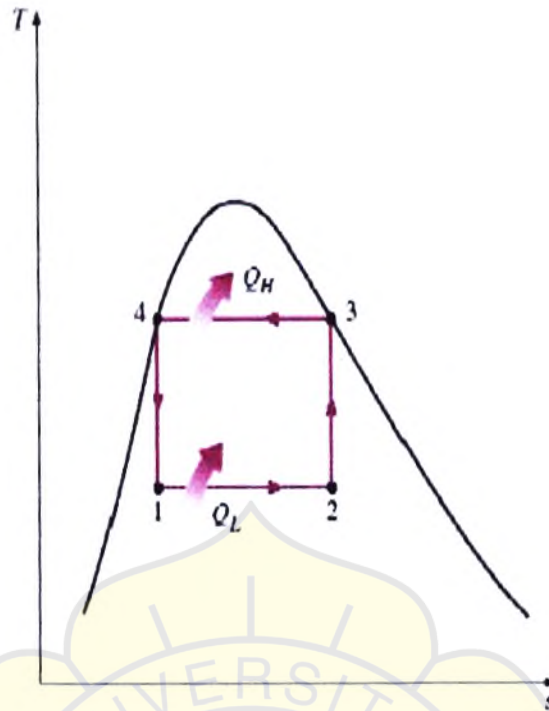
Gambar 2.2 Prinsip Dasar dari Mesin Pendingin dan Pemanas

Refrigerator atau mesin pendingin bekerja dengan menyerap kalor pada suhu rendah (di dalam ruangan) kemudian dibuang ke suhu yang lebih tinggi (di luar ruangan). Pompa kalor bekerja dengan menyerap kalor pada suhu rendah (di luar ruangan) kemudian dibuang ke suhu yang lebih tinggi (di dalam ruangan). Jadi perbedaan dari kedua sistem tersebut adalah pemanfaatan kalornya. Untuk refrigerator, kalor harus dibuang kelingkungan, tetapi untuk pompa kalor, kalor harus diambil dari lingkungan untuk pemanasan.^[2]

Mesin refrigerasi ini bekerja menggunakan siklus atau daur kompresi uap, dimana fluida kerjanya disebut dengan refrigeran. Dasar dari daur ini dikembangkan dari daur refrigerasi carnot. Secara skematik daur refrigerasi carnot ini dapat dilihat pada gambar 2.4 dan 2.6



Gambar 2.3 Daur Refrigerasi Carnot



Gambar 2.4 Diagram t-s daur Refrigerasi Carnot

Proses kerjanya adalah sebagai berikut;

1-2 Proses penyerapan kalor Q_L isothermal oleh refrigeran dari suhu rendah T_L

2-3 Proses kompresi adiabatik dan temperatur menjadi T_H .

3-4 Proses pengeluaran kalor Q_H isothermal oleh refrigeran pada suhu tinggi T_H refrigeran berubah fasa dari uap jenuh menjadi cairan jenuh.^[3]

4-1 Proses ekspansi adiabatik sehingga temperatur turun menjadi T_L

2.4 Daur Refrigerasi Kompresi Uap

Daur refrigerasi Carnot menghasilkan efisiensi sistem paling tinggi sehingga daur ini sering menjadi acuan. Tetapi proses kerja

yang menggunakan daur refrigerasi carnot dalam aplikasinya tidak praktis dan sulit untuk diwujudkan. Seperti telah dibahas sebelumnya untuk proses penyerapan kalor dan pembuangan kalor secara isothermal tidak ada masalah [proses 1-2 dan 3-4], kondisi ini dapat dibuat tanpa mengalami kesukaran. Penyerapan kalor dengan evaporator dan pembuangan kalor dengan kondensor. Kesulitan muncul apabila kita mengkompresi fluida dengan kondisi dua fasa antara cairan dan uap [proses 2-3]. Kemudian kesulitan terjadi juga apabila kita mengekspansi fluida dalam keadaan cairan [proses 4-1]

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dibuat solusi sebagai berikut;

- Proses kompresi 2-3 harus berlangsung pada kondisi uap semua pada kompresor
- Proses ekspansi 4-1 fluida pada turbin diganti diekspansikan pada katup ekspansi

Apabila siklus carnot digambar ulang dengan mengubah kedua hal tersebut di atas didapat siklus atau daur kompresi uap, diagram skema dan T-S dapat dilihat pada gambar [gambar 2.3 dan 2.4]

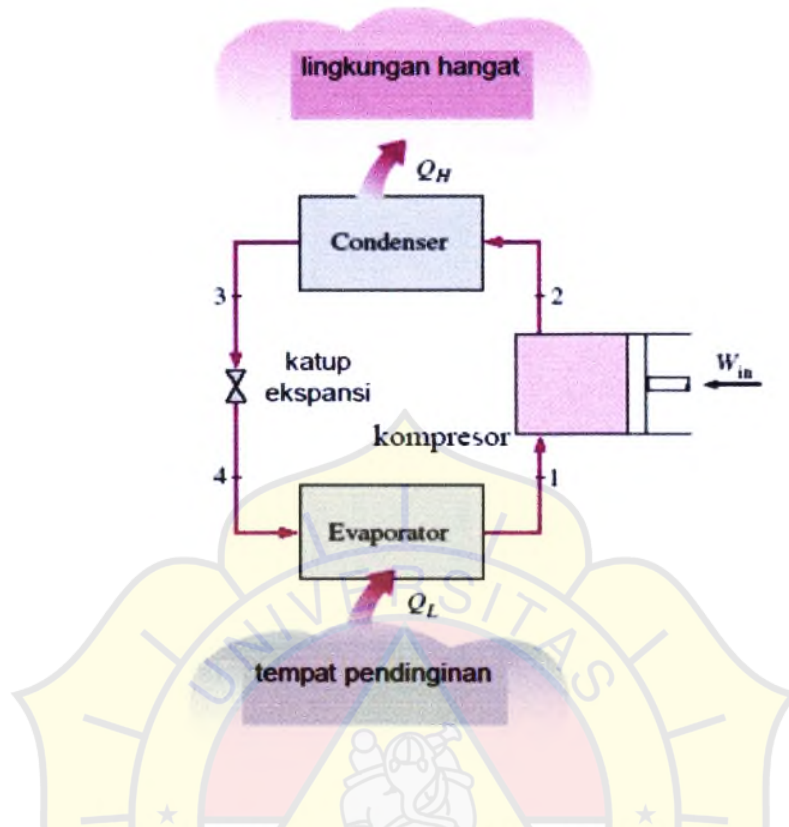
Proses kerjanya adalah sebagai berikut;

1-2 Proses kompresi adiabatis pada kompresor

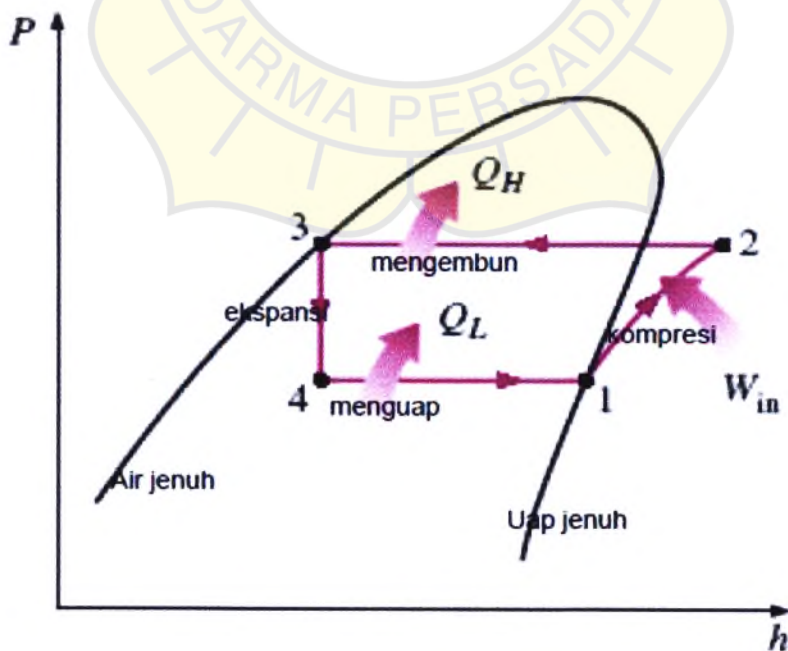
2-3 Proses pengeluaran kalor isobarik pada kondensor

3-4 Proses trothing pada katup ekspansi

4-1 Proses penyerapan kalor isobarik pada evaporator

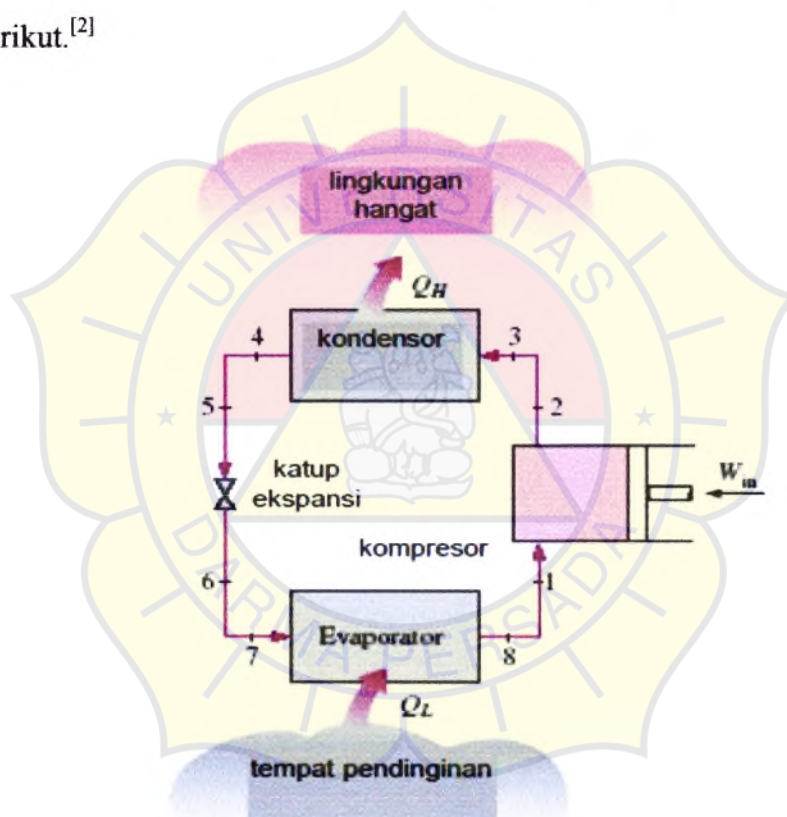


Gambar 2.5 Daur Refrigerasi Kompresi Uap



Gambar 2.6 Diagram p-h Daur Kompresi Uap

Siklus kompresi uap yang telah dibahas di atas adalah siklus kompresi uap ideal, semua proses dianggap mampu balik dan tidak ada kerugian. Akan tetapi proses seperti itu tidak dapat dilaksanakan, sebagai contoh untuk proses kompresi uap pada kompresor tidak mungkin tanpa kerugian, karena ada gesekan dan timbul panas selama proses kompresi jadi prosesnya tidak adiabatik lagi (1-2'). Proses aliran uap masuk evaporator (2-5) dan kondensor (6-8) tidak mungkin tanpa mengalami pressure drop. Adapun siklus aktual dapat dilihat pada gambar sebagai berikut.^[2]



Gambar 2.7 Daur Kompresi Uap Aktual

Fluida kerja yang dipakai pada sistem refrigerasi kompresi uap adalah fluida kerja dengan karakteristik khusus yaitu mampu mengembun dengan baik, mampu menguap dengan baik dan mempunyai daya serap kalor yang baik. Sifat-sifat ini sangat dibutuhkan karena pas dengan jalannya proses sistem daur

kompresi uap. Refrigen yang mudah mengembun akan melepas panas yang baik kelingkungan di kondensor Pada gambar terlihat refrigen akan melepas panas dalam proses pengembunan sebesar QH , pada akhir proses pengembunan refrigen sepenuhnya menjadi cair (titik 3). Sifat penguapan yang baik berpengaruh terhadap kemampuan yang sering dinamakan “efek pendinginan” atau “dampak refrigerasi”, sifat inilah yang paling penting untuk pemilihan refrigeran. Pada proses penguapan pada evaporator adalah proses penyerapan kalor pada “ daerah pendinginan”, pada akhir proses semua refrigeran harus dalam kondisi uap semua (jenuh), jika masih terdapat cairan akan sangat merugikan pada proses kompresi.

2.5 Peralatan Utama Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Peralatan utama yang mendukung sistem daur refrigerasi dapat dijelaskan dengan gambar diagram siklus refrigerasi pada *Air conditioning* (AC). Adapun komponen komponen utama dari daur kompresi uap pada AC yaitu :

2.5.1 Kompresor

Kompresor adalah unit mesin pendingin yang berfungsi untuk mensirkulasi refrigeran yang mengalir dalam unit mesin pendingin. Jika dilihat dari cara kerja mensirkulasikan refrigeran, maka kompresor dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Kompresor Open Unit (*Open Type Cmpressor*)

Jenis kompresor ini terpisah dari tenaga penggeraknya masing-masing bergerak sendiri dalam keadaan terpisah. Tenaga penggerak kompresor umumnya motor listrik. Salah satu ujung poros engkol dari kompresor menonjol keluar,

sebuah puli dari luar dipasang pada ujung poros tersebut. Melalui tali kipas puli dihubungkan dengan tenaga penggeraknya. Puli pada kompresor berfungsi sebagai roda gaya yang digunakan sebagai daun kipas untuk mendinginkan kondensor dan kompresor sendiri. Karena ujung poros engkol keluar dari rumah kompresor, maka harus diberi pelapis agar refrigeran tidak bocor keluar.

2. Kompresor Sentrifugal

Prinsip dari kompresor sentrifugal adalah menggunakan gaya sentrifugal untuk mendapatkan energi kinetik pada impeller sudu dan energi kinetik ini diubah menjadi tekanan potensial. Tekanan dan kecepatan uap yang rendah dari saluran suction dihisap kedalam lubang masuk atau mata roda impeller oleh aksi dari shaft rotor, dan kemudian diarahkan dari ujung-ujung pisau ke rumah kompresor untuk diubah menjadi tekanan yang bertambah.

3. Kompresor Scroll

Prinsip kerja dari kompresor scroll adalah menggunakan dua buah scroll (pusaran). Satu scroll dipasang tetap dan salah satu scroll lainnya berputar pada orbit. Refrigeran dengan tekanan rendah dihisap dari saluran hisap oleh scroll dan dikeluarkan melalui saluran tekan yang letaknya pada pusat orbit dari scroll tersebut.

4. Kompresor Sekrup

Uap refrigeran memasuki satu ujung kompresor dan meninggalkan kompresor dari ujung yang lain. Pada posisi langkah hisap terbentuk ruang hampa

sehingga uap mengalir kedalamnya. Bila putaran terus berlanjut, refrigeran yang terkandung digerakkan mengelilingi rumah kompresor. Pada putaran selanjutnya terjadi penangkapan kuping rotor jantan oleh lekuk rotor betina, sehingga memperkecil volume rongga dan menekan refrigeran tersebut keluar melalui saluran buang.

5. Kompresor Semi Hermetik

Pada konstruksi semi hermetik bagian kompresor dan elektro motor masing-masing berdiri sendiri dalam keadaan terpisah. Untuk menggerakkan kompresor poros motor listrik dihubungkan dengan poros kompresornya langsung.

2.5.2 Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar kalor. Karena zat pendingin meninggalkan kompresor dalam bentuk uap bertekanan tinggi, maka perlu suatu cara untuk mengubah uap menjadi cairan kembali. Jadi kondensor adalah suatu alat untuk mengembunkan uap (bahan pendingin) menjadi cairan sehingga dapat dipakai kembali dalam siklus pendinginan. Dilihat dari sisi media yang digunakan kondensor dapat dibedakan 2 macam :

1. Kondensor Berpendingin Udara (*Air Cooled Condenser*)

Yaitu kondensor yang menggunakan udara sebagai media pendinginnya. Air cooled condenser mempunyai dua tipe diantaranya :

- *Natural Draught Condenser*

Dimana pelaksana perpindahan panasnya dilakukan dengan aliran udara secara alami.

- *Force Draught Condenser*

Dimana pelaksanaan perpindahan panasnya dilakukan dengan aliran udara yang dipaksakan biasanya dilakukan dengan kipas udara dan blower.

2. Kondensor Berpendingin Air (*Water Cooled Condenser*)

Water cooled condensor adalah kondensor yang menggunakan air sebagai media pendinginnya. Menurut proses aliran yang ada pada kondensor ini terbagi menjadi dua jenis yaitu :

- *Water System*

Suatu sistem dimana air yang disuplai untuk kondensor diambil dari pusat-pusat air kemudian dialirkan melewati kondensor setelah itu dibuang.

- *Recirculating Water System*

Suatu sistem dimana air yang telah meninggalkan kondensor disalurkan kedalam *cooling tower*, untuk diturunkan temperaturnya pada temperatur yang dikehendaki.

- Sistem Pipa Air Dari Menara Pendingin

Supaya mesin pendingin dapat bekerja dengan aman, maka harus dijamin adanya aliran air pendingin sesuai dengan yang diperlukan. Apabila kondensor terletak diatas permukaan air di dalam bak menara pendingin, atau apabila kondensor terletak di bawah permukaan air dan pompa terletak diatas permukaan air dalam bak air, maka sebuah katup satu arah (*check valve*) harus dipasang diantara sisi keluar air pendingin dan pompa.

2.5.3 Katup Ekspansi

Katup ekspansi adalah alat untuk mengatur jumlah refrigeran yang masuk pada evaporator dalam batas yang sama dengan kapasitas isap kompresor. Selama sistem sedang bekerja, katup tersebut dapat mempertahankan tekanan evaporator dan tekanan saluran isap tetap konstan, sehingga beban kompresor juga menjadi konstan.

2.5.4 Evaporator

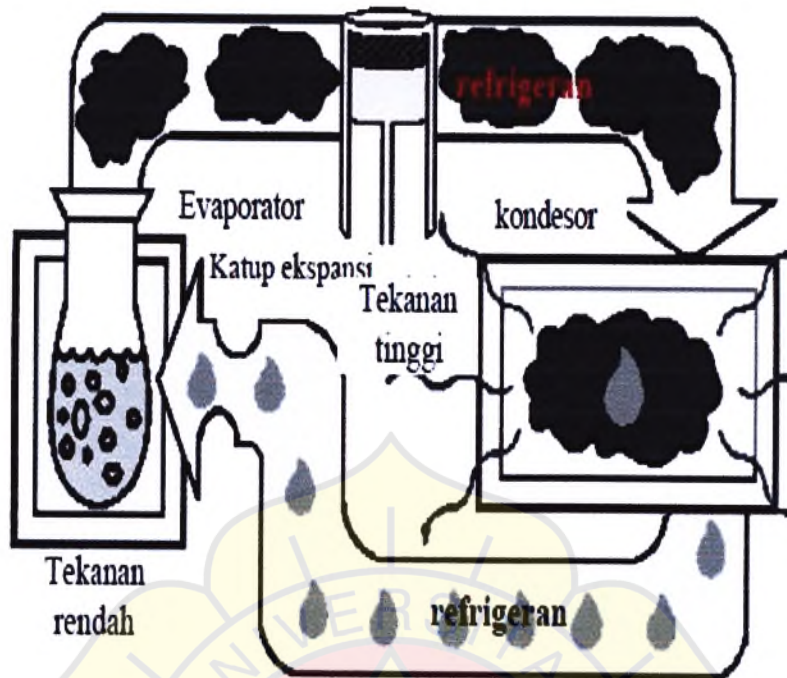
Evaporator merupakan bagian yang berfungsi menguapkan bahan pendingin cair menjadi gas dengan mengambil udara panas dari ruangan. Refrigeran cair bertekanan tinggi masuk katup ekspansi, kemudian tekanannya diturunkan sebelum masuk evaporator. Pada evaporator refrigeran cair bertekanan rendah menguap dengan menyerap panas dari lingkungan. Uap refrigeran

bertekanan rendah kemudian masuk kompresor, pada kompresor uap refrigeran dimampatkan sehingga energinya bertambah. Uap dengan tekanan tinggi masuk kondensor untuk diembunkan dengan melepaskan panas ke lingkungan dan dari sini prosesnya akan berulang.

Secara alamiah semua proses alir terjadi karena ada beda tekan, yaitu dari tekanan lebih tinggi ke tekanan lebih rendah. Jadi tidak mungkin selama refrigeran mengalir tanpa ada penurunan tekanan (*pressure drop*), hal ini terjadi karena selama mengalir refrigeran banyak kehilangan energi untuk mengatasi hambatan aliran.

2.5.5 Refrigeran

Fungsi refrigeran pada daur mesin refrigerasi adalah sebagai media pembawa kalor, yaitu refrigeran pada kondisi tekanan rendah akan menyerap kalor pada evaporator, kemudian kalor yang diserap akan dilepaskan pada kondensor. Sifat paling penting dari pemilihan refrigeran adalah dampak refrigerasinya yaitu jumlah kalor yang dapat diserap pada evaporator per kg nya. Sifat yang lainnya adalah laju aliran uap hisap perkilowatnya, sifat ini akan menentukan pemilihan alat kompresinya.



Gambar 2.8 Aliran Refrigeran di dalam Saluran Pipa

2.6 Penukar Kalor

Beberapa sistem refrigerasi dilengkapi dengan penukar kalor jalur cair-ke-hisap (*liquid-to-suction*), yang menurunkan suhu (*sub cools*) cairan dari kondensor dengan uap isap (*suction vapor*) yang datang dari evaporator.

Cairan jenuh pada titik 3 yang berasal dari kondensor didinginkan hingga titik 4 dengan cara bertukar kalor dengan uap pada titik 6 yang dipanaskan hingga mencapai titik 1. Dari keseimbangan kalor, $h_3 - h_4 = h_1 - h_6$. Dampak refrigerasinya dapat penukar kalor jalur cair-hisap (*liquid-to-suction heat exchanger*).

Dibandingkan dengan daur kompresi uap standar, sistem yang menggunakan penukar kalor nampaknya lebih memiliki keuntungan yang jelas karena naiknya dampak refrigerasi. Kapasitas dan koefisien prestasi tampaknya dapat ditingkatkan. Tetapi hal ini tidak sepenuhnya benar. Walaupun dampak refrigerasi dapat ditingkatkan, tetapi kompresi terdorong jauh masuk ke dalam daerah panas-lanjut, sehingga kerja kompresi akan lebih besar dibandingkan dengan yang dekat dengan garis uap-jenuh. Dari hal kapasitas, titik 1 mempunyai rapat massa lebih tinggi dibanding titik 6, sehingga volume yang dapat dipompa dari titik 6 tersebut lebih sedikit. Sehingga perbaikan potensial pada prestasi mendapat reaksi yang berlawanan.

Tetapi sampai batas tertentu, penukar kalor dapat diterima dalam situasi dimana uap yang masuk ke kompresor harus dipanaskan lebih lanjut, untuk menjaga agar tidak ada cairan yang terbawa. Alasan praktis lain penggunaan penukar kalor adalah untuk membawah-dinginkan cairan dari kondensor untuk mencegah terbentuknya gelembung uap yang mengganggu aliran refrigeran melewati katup ekspansi.

2.7 Koefisien Prestasi (*coefficient of performance*) dan Laju Air Volume per-kW refrigerasi.

Koefisien prestasi dapat diturunkan dari kapasitas refrigerasi dan daya. Hasil yang memperlihatkan kenaikan koefisien tersebut karena naiknya suhu evaporator. Laju air volume per-satuan kapasitas refrigerasi merupakan pertanda ukuran fisik atau kecepatan kompresor yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kW refrigerasi. Untuk suatu kapasitas tertentu dengan suhu evaporator yang

rendah, harus dipompakan aliran volume yang besar karena volume spesifik yang tinggi.

Kualitas unjuk kerja suatu sistem refrigerasi dapat dinyatakan dengan suatu angka hasil perbandingan antara energi yang diserap dari udara ruang dan energi yang digunakan untuk mengkompresi gas di kompresor. Perbandingan kedua energi tersebut lazim disebut sebagai Koefisien unjuk kerja dari siklus refrijerasi atau *Coefficient of performance (COP)*.

2.8 Teori Perhitungan

2.8.1 Dampak Refrigerasi

Dampak refrigerasi dapat dicari dengan cara entalpi pada titik 1 (suhu keluar evaporator) di kurangi entalpi pada titik 4 (suhu masuk evaporator) :^[1]

$$\text{Dampak refrigerasi} = h_1 - h_4 \quad (2.1)$$

Dimana :

h_1 = entalpi suhu keluar evaporator

h_4 = entalpi suhu masuk evaporator

2.8.2 Laju Alir Refrigeran

Laju alir refrigeran dapat ditentukan dengan cara membagi kapasitas refrigerasi dengan dampak refrigerasi :^[1]

$$\text{Laju alir refrigeran} = \frac{\text{kapasitas refrigerasi}}{\text{dampak refrigerasi}} \quad (2.2)$$

2.8.3 Daya Kompresor

Daya yang dibutuhkan kompresor dapat dihitung dengan cara mengalikan antara kerja kompresi per-kilogram dengan laju aliran refrigeran :^[1]

$$\text{Daya kompresor} = \text{kerja kompresi per-kilogram} \times \text{laju aliran refrigeran} \quad (2.3)$$

2.8.4 koefisien Prestasi

Koefisien prestasi dapat ditentukan dengan cara membagi kapasitas refrigerasi dengan daya kompresor :^[1]

$$\text{Koefisien prestasi} = \frac{\text{kapasitas refrigerasi}}{\text{daya kompresor}} \quad (2.4)$$

2.8.5 Laju Aliran Volume

Laju aliran pada seksi masuk kompresor memerlukan data volume spesifik refrigeran pada titik 1. Volume spesifik refrigeran dapat ditentukan dari tabel A-6 atau Gambar A-4.^[1]

$$\text{Laju aliran volume} = \text{laju alir refrigeran} \times \text{volume spesifik pada titik 1} \quad (2.5)$$

2.8.6 Daya Refrigerasi

Daya refrigerasi merupakan kebalikan dari koefisien prestasi sehingga daya refrigerasi dapat ditentukan dengan membagi daya kompresor dengan kapasitas refrigerasi :^[1]

$$\text{Daya refrigerasi} = \frac{\text{daya kompresor}}{\text{kapasitas refrigerasi}} \quad (2.6)$$

