

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Refrigerasi

Refrigerasi merupakan suatu media pendingin yang dapat berfungsi untuk menyerap kalor dari lingkungan atau untuk melepaskan kalor ke lingkungan. Sifat-sifat fisik termodinamika refrigerant yang digunakan dalam sistem refrigerasi perlu diperhatikan agar sistem dapat bekerja dengan aman dan ekonomis adapun sifat refrigerant yang baik adalah :

1. Tekanan penguapannya harus cukup tinggi, untuk menghindari kemungkinan terjadinya vakum pada evaporator dan turunnya efisiensi volumetrik karena naiknya perbandingan kompresi.
2. Tekanan pengembunan yang rendah sehingga perbandingan kompresinya rendah dan penurunan prestasi kompresor dapat dihindari.
3. Kalor laten penguapan harus tinggi agar panas yang diserap oleh evaporator lebih besar jumlahnya, sehingga untuk kapasitas yang sama jumlah refrigerant yang dibutuhkan semakin sedikit.
4. Koefisien prestasi harus tinggi ini merupakan parameter yang penting untuk menentukan biaya operasi
5. Konduktifitas thermal yang tinggi untuk menentukan karakteristik perpindahan panas

6. Viskositas yang rendah dalam fase cair atau gas, dengan turunnya tahanan aliran refrigerant dalam pipa kerugian tekanannya akan berkurang.
7. Konstanta dielektri yang kecil, tahanan listrik yang besar serta tidak menyebabkan korosi pada material isolasi listrik.
8. Refrigerant hendaknya stabil dan tidak bereaksi dengan material yang digunakan sehingga tidak menyebabkan korosi.
9. Refrigerant tidak boleh beracun atau berbau.
10. Refrigerant tidak boleh terbakar atau meledak
11. Dapat tercampur dengan minyak pelumas tetapi tidak merusak dan mempengaruhinya.
12. Harganya murah dan dapat dideteksi jika terjadi kebocoran.

2.2 Daur Refrigerant Carnot

Daur refrigerant carnot merupakan suatu pembatas yang tak dapat dilebihi jika melakukan kerja di antara dua suhu tertentu. Dari kajian termodinamika, daur ulang carnot dikenal terjadi pada mesin-mesin kalor. Secara stematik, daur carnot diperlihatkan dalam diagram suhu entropi yang bersangkutan pada Mesin Carnot menerima energi kalor pada suhu tinggi, merubah sebagian menjadi kerja, dan kemudian mengeluarkan sisanya sebagai kalor pada suhu yang lebih rendah.

Daur refrigerant carnot merupakan kebalikan dari mesin kalor tersebut, karena menyalurkan energi dari suhu rendah menuju suhu yang lebih tinggi. Daur refrigerant membutuhkan kerja dari luar untuk dapat bekerja.

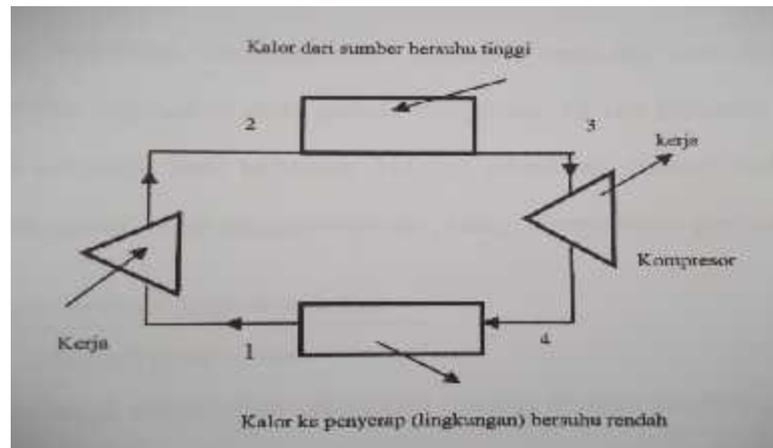
Diagram peralatan dan diagram entropi suhu dari luar refrigerant diperlihatkan dalam Gambar 2.3 dan Gambar 2.4.

Proses-proses yang membantu daur tersebut adalah :

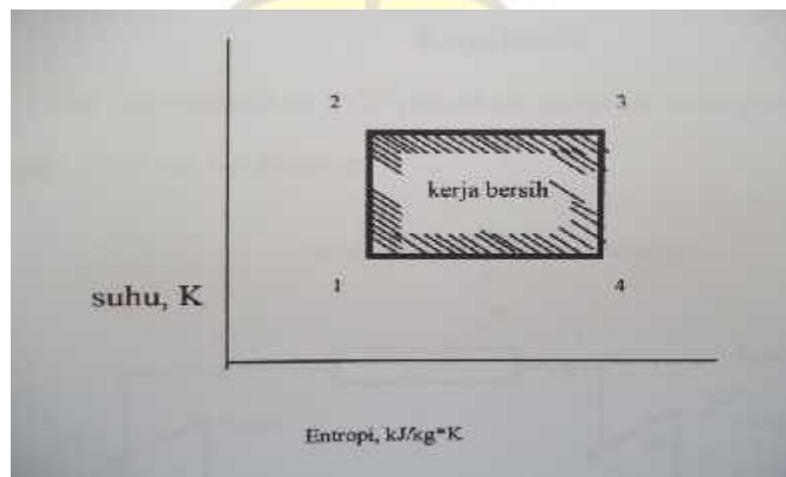
1. Kompresi Adiabatic
2. Pelepasan kalor isothermal
3. Ekspansi Adiabatic
4. Pemasukan kalor isothermal

Seluruh proses pada daur Carnot secara termodinamika bersifat reversible (dapat di balik). Oleh karenanya proses 1-2 dan 3-4 bersifat isotropik. Penyerapan kalor dari sumber bersuhu rendah pada proses 4-1 merupakan tujuan utama dari daur ini. Seluruh proses lainnya pada daur berfungsi sedemikian rupa sehingga energi bersuhu rendah dapat dikeluarkan ke lingkungan yang bersuhu tinggi.

Daur Carnot terdiri dari proses-proses reversible yang menjadikan efisiensinya lebih tinggi dari yang dapat dicapai oleh daur nyata. Satu pertanyaan yang cukup beralasan adalah : Mengapa harus membahas daur Carnot apabila itu bersifat ideal yang tak dapat dicapai ? Jawabannya adalah (1) karena hal tersebut merupakan perbandingan yang standar, dan (2) daur tersebut memberikan pedoman tentang suhu-suhu yang harus dipertahankan sehingga diperoleh keefektifan yang maksimum.



Gambar 2.1 Mesin Kalor Carnot



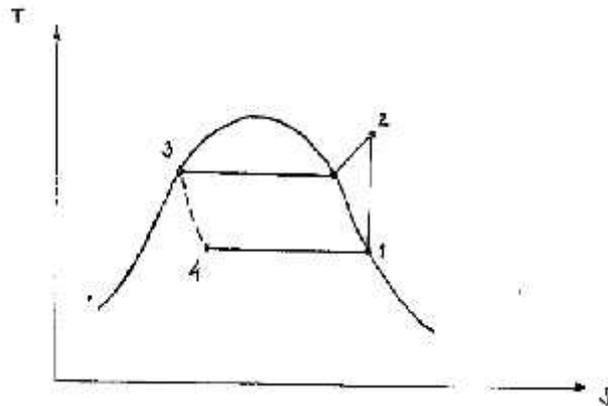
Gambar 2.2 Diagram Suhu Entropi Mesin Kalor Carnot

2.3 Daur Kompresi Uap Ideal

Apabila daur Carnot diterapkan pada kompresi uap, maka seluruh proses akan terjadi dalam fasa campuran. Untuk itu fluida kerja yang masuk kompresor diusahakan tidak berupa campuran, yang tujuannya mencegah kerusakan.

Pada daur Carnot ekspansi isentropic terjadi pada turbin, daya yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan kompresor. Dalam hal ini mengalami suatu

kesulitan teknis, maka untuk memperbaikinya digunakan katup ekspansi atau pipa kapiler dengan demikian proses berlangsung pada entalpi konstan.



Gambar 2.3 Daur kompresi uap ideal

Dimana :

1 – 2 : kompresi adiabatik dan reversible, dari uap jenuh menuju tekanan konstan

2 - 3 : pelepasan kalor reversibel pada tekanan konstan, menyebabkan penurunan panas lanjut dan pengembunan refrigerant.

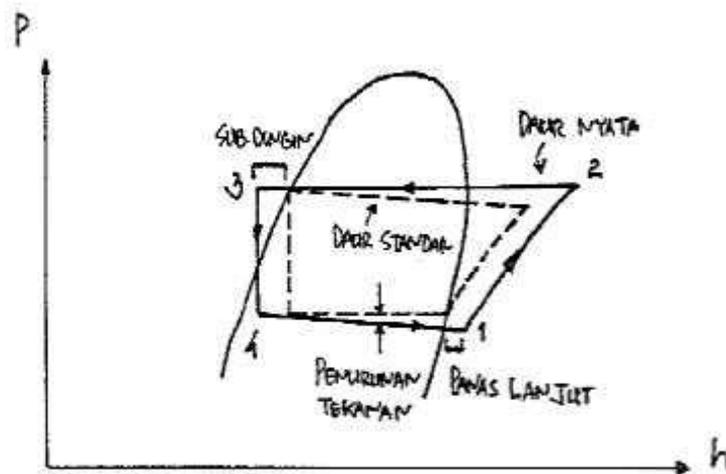
3 – 4 : ekspansi irreversible pada entalpi konstan, dari cairan jenuh menuju tekanan evaporator.

3 - 1: penambahan kalor reversibel pada tekanan tetap yang menyebabkan penguapan menuju uap jenuh.

2.4 Daur Kompresi Uap Nyata

Daur kompresi uap nyata mengalami pengurangan efisiensi dibandingkan dengan daur uap standart. Pada daur kompresi uap nyata proses kompresi berlangsung

tidak isentropic, selama fluida berkerja melewati evaporator dan kondensor akan mengalami penurunan tekanan. Fluida kerja mendinginkan kondensor dalam keadaan sub dingin dan meninggalkan evaporator dalam keadaan panas lanjut. Penyimpangan daur kompresi uap nyata dari daur uap ideal dapat diperhatikan gambar dibawah ini :



Gambar 2.4 perbandingan antara siklus kompresi uap standar dan nyata.

Pada daur kompresi uap nyata proses kompresi berlangsung tidak isentropic, hal ini disebabkan adanya kerugian mekanis dan pengaruh suhu lingkungan selama proses kompresi. Gesekan dan belokan pipa menyebabkan penurunan tekanan di dalam alat penukar panas sebagai akibatnya kompresi pada titik 1 menuju titik 2 memerlukan lebih banyak kerja dibandingkan dengan daur ideal (standart). Untuk menjamin seluruh refrigerant dalam keadaan cair dalam sewaktu memasuki alat ekspansi diusahakan refrigerant meninggalkan kondensor dalam keadaan sub

dingin. Kondisi panas lanjut yang meninggalkan evaporator disarankan untuk mencegah kerusakan kompresor akibat terisap cairan.

2.5 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Siklus refrigerasi 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 di sejukan. Kedua, sifat-sifat isothermal penguapan membolehkan pengambilan panas tanpa menaikkan suhu fluida kerja ke suhu beberapa pun di dinginkan. 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 2.5 dan dapat mejadi tahapan-tahapan berikutnya :

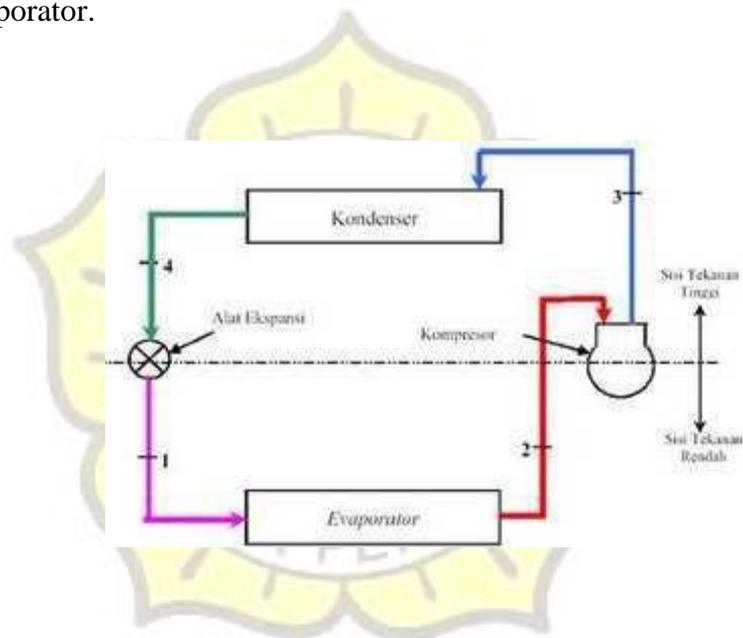
1-2. cairan refrigerasi dalam evaporator menyerap panas dan sekitarnya, biasanya udara, air dan cairan proses lain. Selama proses ini cairan merubah bentuknya dai cair menjadi gas, dan pada keluaran evaporator gas ini diberi pemanasan berlebihan/superheated gas.

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

3-4. Superheated gas bertekanan tinggi lewat kompresor menuju kondensor. 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 pengerjaan pipa dan penerimaan cairan (3a-4), sehingga cairan refrigerant 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.

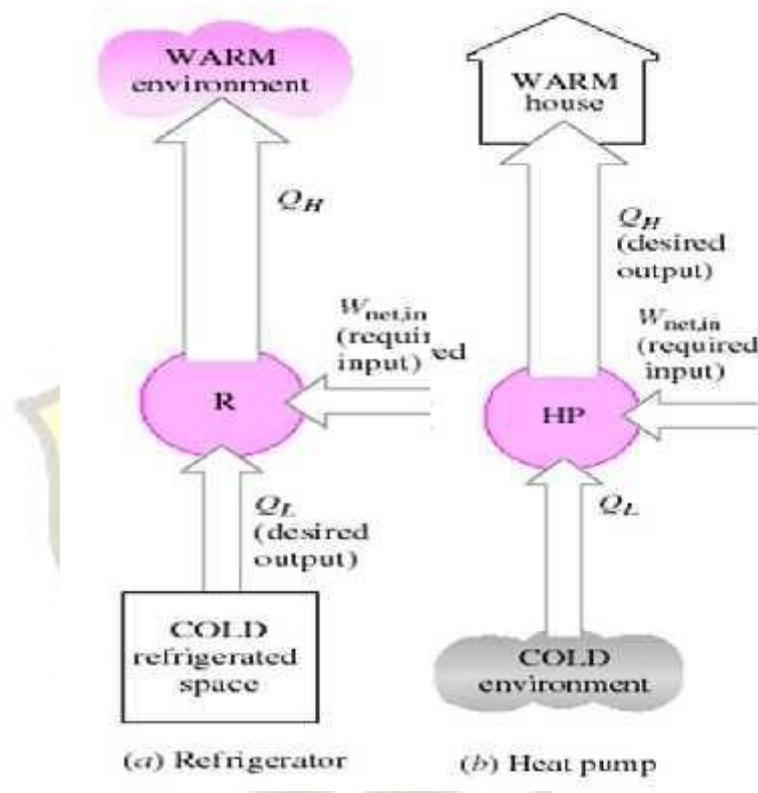


Gambar 2.5 Gambaran Skematis Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

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

2.6 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 2.7 adalah cara kerja mesin tersebut.

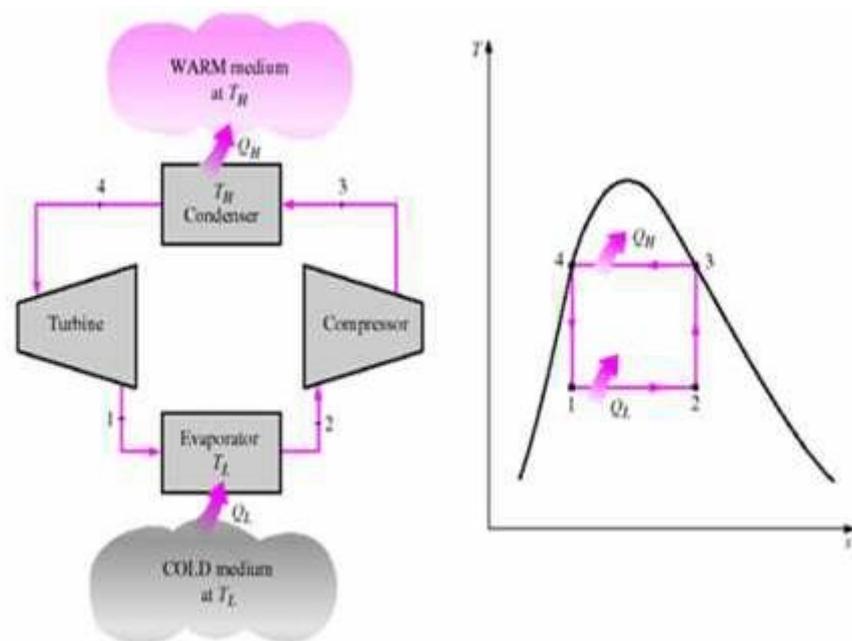


Gambar 2.6 Prinsip Dasar dari Mesin Pendingin dan Pemanas

Refrigerator atau mesin pendingin bekerja dengan menyerap kalor pada suhu rendah (didalam ruangan) kemudian dibuang ke suhu yang lebih tinggi (diluar ruangan). Pompa kalor bekerja dengan menyerap kalor pada suhu rendah (diluar ruangan) kemudian dibuang ke suhu yang lebih tinggi (didalam ruangan). Jadi perbedaan dari kedua sistem tersebut adalah pemanfaatan kalornya. Untuk

refrigerator, kalor harus dibuang ke lingkungan, tetapi untuk pompa kalor, kalor harus diambil dari lingkungan untuk pemanasan.

Mesin refrigerasi ini bekerja menggunakan siklus atau daur kompresi uap, dimana fluida kerjanya disebut dengan refrigerant. Dasar dari daur ini dikembangkan dari daur refrigerant Carnot. Secara skematik daur ulang refrigerant Carnot ini dapat dilihat dari gambar 2.8



Gambar 2.7 Daur Refrigerant Carnot dan Diagram Daur Refrigerasi Carnot

Proses kerjanya adalah sebagai berikut :

- 1-2 Proses penyerapan kalor Q_L isothermal oleh refrigerant dari suhu rendah T_L .
- 2-3 Proses kompresi adiabatik dan temperatur menjadi T_H .
- 3-4 Proses pengeluaran kalor Q_H isothermal oleh refrigerant pada suhu tinggi T_H
refrigerant merubah fasa dari uap jenuh menjadi cairan jenuh.
- 4-1 Proses ekspansi adiabatik sehingga temperatur turun menjadi T_L .

2.7 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 :

2.7.1 Kompresor

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

1. Kompresor Open Unit (Open Type Kompresor)

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. Pula pada kompresor berfungsi sebagai roda gaya yang digunakan sebagai daun kipas yang diinginkan kondensor dan kompresor sendiri. Karena ujung poros engkol keluar dari rumah kompresor, maka harus diberi pelapis agar refrigerant 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 kerumah 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. Refrigerant 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 refrigerant memasuki salah satu ujung kompresor dan meninggalkan kompresor dari ujung yang lain. Pada posisi langkah hisap terbentuk ruang hampa.

Sehingga uap mengalir ke dalamnya. Bila putaran terus berlanjut refrigerant yang terkurung digerakkan mengelilingi rumah kompresor. Pada putaran selanjutnya terjadi penangkapan kipring rotor jantan oleh lekuk rotor betina, sehingga memperkecil rongga dan menekan refrigerant tersebut keluar melalui saluran buang.

2.7.2 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 mengembun uap (bahan pendingin) menjadi cairan sehingga dapat dipakai kembali dalam siklus pendingin.

2.7.3 Katup Ekspansi

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

2.7.4 Evaporator

Evaporator merupakan bagian berfungsi menguapkan bahan pendingin cair menjadi gas dengan mengambil udara panas dari ruangan. Refrigerant cair bertekanan tinggi masuk katup ekspansi, kemudian tekanannya diturunkan sebelum masuk evaporator.

Pada evaporator refrigerant cair bertekanan rendah menguap dengan menyerap panas dari lingkungan. Uap refrigerant bertekanan rendah kemudian masuk kompresor, pada kompresor uap refrigerant dimampatkan sehingga energinya bertambah. Uap dengan tekanan tinggi masuk kondensor untuk diembunkan dengan melepaskan panas ke lingkungan dan dari sini prosesnya berulang.

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

2.8 Penukar Kalor

Beberapa sistem refrigerasi dengan penukar kalor jalur cair ke hisap (*liquid to suction*) yang menurunkan suhu (*sub cools*) cairan dari kondensor dengan uap hisap (*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*)

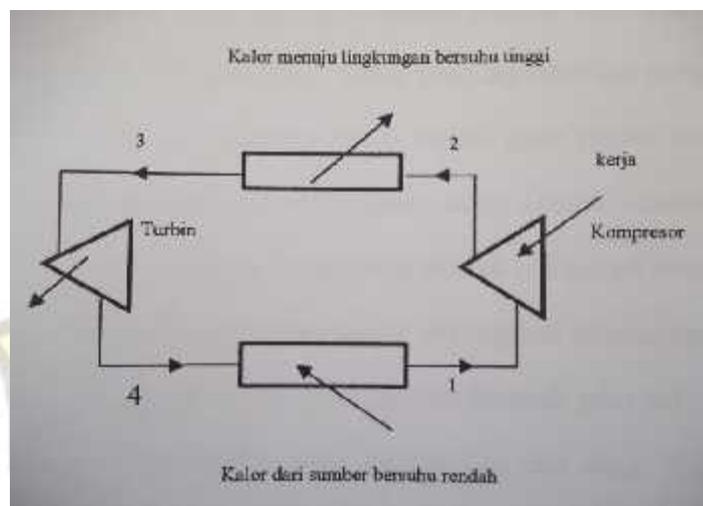
Dibandingkan dengan daur kompresi uap standar, sistem yang menggunakan penukar kalor nampaknya lebih memiliki keuntungan yang jelas karena naiknya dampak refrigerasi. Kapasitas dan koefisien prestasi tampaknya dapat ditingkatkan. Tetapi hal ini tidak sepenuhnya benar. Walaupun dampak daerah panas-lanjut, 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

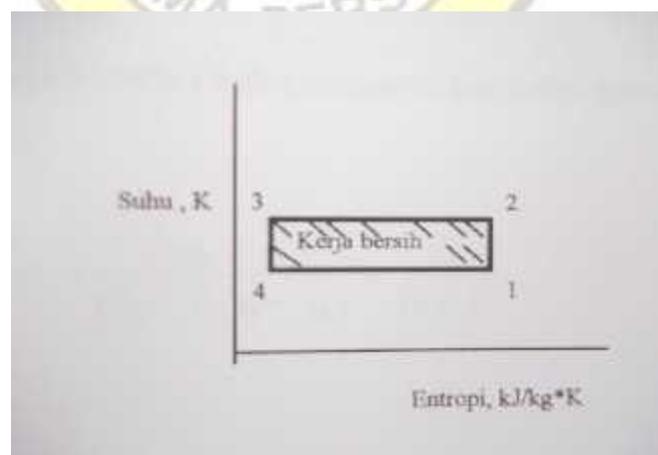
terbentuknya gelembung uap yang mengganggu aliran refrigerant melewati katup ekspansi.

2.8 Teori Perhitungan

Untuk menyederhanakan perhitungan yang diagram maka digunakan siklus ideal kompresi uap seperti dalam gambar 2.8 dan 2.9



Gambar 2.8 Daur Refrigerasi.



Gambar 2.9 Diagram Suhu Entropi Daur Refrigerasi Carnot.

2.9.1 Dampak Refrigerasi

Dampak refrigerasi dapat dicari dengan entalpi pada titik 1 (suhu keluar evaporator) dikurangi entalpi pada titik 4 (suhu masuk evaporator) :

$$\text{Dampak refrigerasi} = h_1 - h_4$$

Dimana :

h_1 = entalpi suhu keluar evaporator

h_4 = entalpi suhu masuk evaporator

2.9.2 Laju Alir Refrigeran

Laju alir refrigeran dapat ditentukan dengan cara membagi kapasitas refrigerasi dengan dampak refrigerasi :

$$\text{Laju alir refrigeran} = \frac{\text{Kapasitas Refrigerasi}}{\text{Dampak Refrigerasi}}$$

2.9.3 Daya Kompresor

Daya yang dibutuhkan kompresor dapat dihitung dengan cara mengalihkan antara kerja kompresi per-kilogram dengan laju aliran refrigeran :

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

2.9.4 Koefisien Prestasi

Koefisien prestasi dapat ditentukan dengan cara membagi kapasitas refrigerasi dengan daya kompresor :

$$\text{Koefisien prestasi} = \frac{\text{Kapasitas Refrigerasi}}{\text{Daya Kompresor}}$$

Sebelum melakukan penilaian atas prestasi suatu sistem refrigerasi, terlebih dahulu harus ditetapkan ukuran efektifan. Indeks prestasi ini tidak sama dengan

efisiensi, karena ukuran tersebut biasanya hanya menggambarkan perbandingan keluaran dan masukan. Perbandingan keluaran terhadap masukan ini akan menyedatkan jika digunakan pada sistem refrigerasi, karena keluaran pada proses 2-3 biasanya percuma atau terbuang. Namun demikian, konsep indeks prestasi pada daur refrigerasi sama dengan efisiensi yang menyatakan perbandingan.

$$\frac{\text{Jumlah hasil yang digunakan}}{\text{Jumlah pengeluaran}}$$

Istilah prestasi di dalam refrigerasi disebut dengan koefisien prestasi atau COP atau (*Coefficient of Performance*), yang didefinisikan sebagai :

$$\text{Koefisien prestasi (COP)} = \frac{\text{Refrigerasi bermanfaat}}{\text{Kerja Bersih}}$$

Kedua suku yang menghasilkan COP tersebut haruslah mempunyai satuan yang sama sehingga COP tidak berdimensi.

2.9.5 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.

Laju aliran volume = laju alir refrigeran X volume spesifik pada titik 1.

2.9.6 Daya Refrigerasi

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

$$\frac{\text{Daya Kompresor}}{\text{Kapasitas Refrigerasi}}$$

