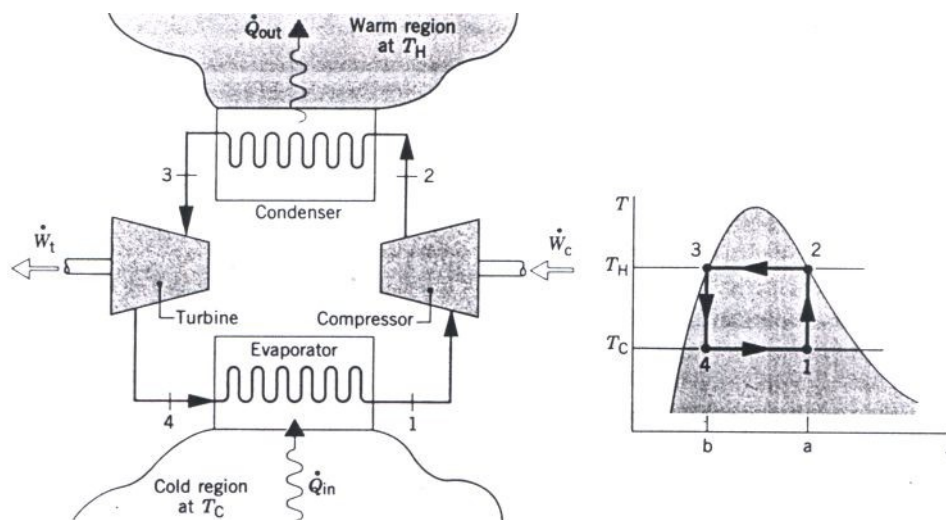


BAB III

SISTEM REFRIGERASI DAN POMPA KALOR

Untuk mengenalkan aspek-aspek refrigerasi, pandanglah sebuah siklus refrigerasi uap Carnot. Siklus ini adalah kebalikan dari siklus daya uap Carnot.



Gambar 1. Siklus refrigerasi uap Carnot.

Pada siklus, refrigeran bersirkulasi melalui urutan beberapa komponen. Semua proses secara internal reversibel. Perpindahan kalor antara refrigeran dan setiap bagian terjadi tanpa perubahan temperatur, dan tidak ada terjadi irreversibilitas eksternal.

Refrigeran masuk ke evaporator dalam bentuk 2 fase yaitu campuran cairan dan uap pada titik 4. Pada evaporator sebagian refrigeran berubah fase dari cair ke uap karena perpindahan kalor dari daerah yang bertemperatur T_C ke refrigeran. Temperatur dan tekanan refrigeran tetap konstan selama proses dari titik 4 ke titik 1. Refrigeran kemudian di kompresi secara adiabatik dari titik 1, dimana refrigeran berada pada kondisi 2 fase campuran cair-uap, ke titik 2 dimana fase menjadi uap jenuh. Selama proses ini temperatur refrigeran naik dari T_C ke T_H , dan tekanan juga naik. Kemudian refrigeran masuk ke kondenser dimana fase refrigeran akan berubah menjadi cairan jenuh karena terjadi perpindahan kalor kepada daerah yang bertemperatur T_H . Temperatur dan

tekanan tetap konstan selama proses 2 ke 3. Refrigeran kembali ke kondisi pada saat masuk evaporator melalui proses ekspansi adiabatik pada turbin yaitu titik 3 ke titik 4. Pada proses ini temperatur turun dari T_H ke T_C dan juga terjadi penurunan tekanan.

Karena siklus refrigerasi uap Carnot terdiri dari proses reversibel, luas daerah pada diagram $T-s$ adalah besar perpindahan kalor. Luas daerah 1-a-b-4-1 adalah kalor yang ditambahkan ke refrigeran dari daerah dingin dan luas daerah 2-a-b-3-2 adalah kalor yang dilepaskan ke daerah panas. Daerah tertutup 1-2-3-4-1 adalah perpindahan kalor bersih yang dipindahkan dari refrigeran.

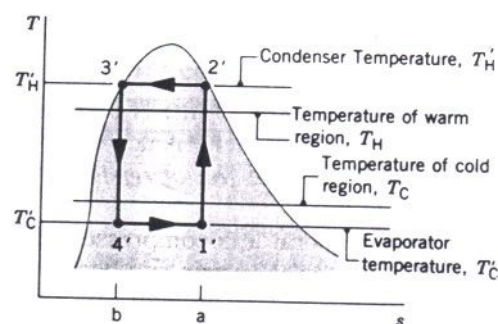
Koefisien performansi (COP) atau β dari siklus refrigerasi adalah:

$$\beta_{max} = \frac{\dot{Q}_i / \dot{m}}{\dot{W}_c / \dot{m} - \dot{W}_i / \dot{m}} = \frac{T_c (S_a - S_b)}{(T_H - T_C) - (S_a - S_b)}$$

$$= \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

Siklus refrigerasi uap sebenarnya bergeser sedikit dari siklus ideal diatas dan mempunyai koefisien performansi lebih rendah dari rumus diatas.

Dalam siklus aktual, untuk menjaga temperatur pada daerah T_C , refrigeran harus mempunyai temperatur dibawah T_C yaitu T'_C begitu juga untuk daerah T_H maka temperatur refrigeran harus diatasnya yaitu T'_H seperti gambar berikut:



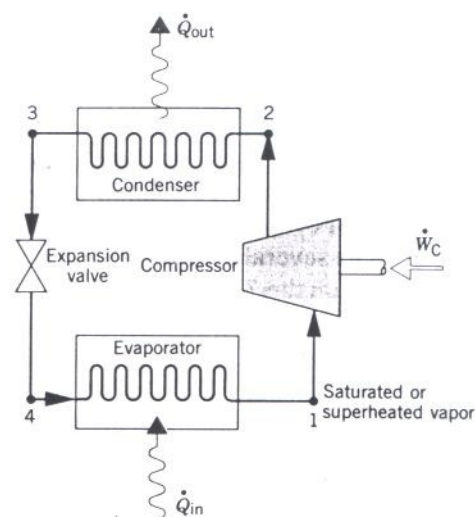
Gambar 2. Perbandingan temperatur kondenser dengan evaporator dengan daerah panas dan dingin.

Membuat temperatur refrigeran dalam penukar kalor pada T'_C dan T'_H akan membuat koefisien refrigerasi menurun dan dirumuskan:

$$\beta' = \frac{T'_C}{T'_H - T'_C}$$

Hal lain yang membuat siklus refrigerasi uap Carnot tidak praktis dibuat adalah kondisi fase refrigeran masuk kompresor. Pada siklus Carnot refrigeran masuk pada fase campuran cair-uap. Kompresor akan rusak jika ada fase cair yang masuk ke dalamnya, sehingga pada sistem sebenarnya hanya fase uap yang masuk ke dalam kompresor atau disebut *kompresi kering*.

Hal lain yang membuat siklus Carnot tidak praktis adalah proses ekspansi cairan jenuh dari titik 3 ke campuran 2 fase cair-uap pada titik 4. Proses ini menghasilkan kerja yang kecil bila dibandingkan kerja untuk kompresor. Apabila proses dari 3 ke 4 ini dilakukan oleh turbin, kerja output masih kecil karena turbin yang beroperasi pada kondisi ini mempunyai efisiensi yang rendah. Oleh sebab itu kerja output turbin dikorbankan dengan menggantinya dengan katup *throttle* sederhana. Siklus kemudian akan menjadi seperti gambar 3. Siklus ini disebut sistem refrigerasi kompresi uap.



Gambar 3. Komponen-komponen sistem refrigerasi kompresi uap.

Refrigerasi Kompresi Uap

Dari gambar 3 diatas :

- pada sisi evaporator, laju keseimbangan energi dan massa adalah :

$$\frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$

dimana, \dot{m} = laju aliran massa refrigeran

\dot{Q} = laju aliran kalor atau kapasitas refrigerasi

- Laju keseimbangan energi dan massa pada kompresor :

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1$$

dimana : \dot{W}_c/\dot{m} = laju daya input per satuan massa refrigeran.

- Pada sisi kondenser :

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$

- Akhirnya refrigeran memasuki katup *throttle* atau katup ekspansi. Proses ini disebut proses *throttling* dimana:

$$h_4 = h_3$$

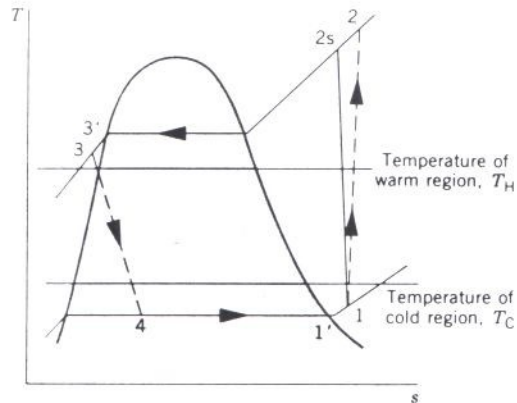
Tekanan refrigeran menurun karena ekspansi adiabatik ireversibel dan terjadi kenaikan entropi. Refrigeran keluar dari katup pada titik 4 sebagai campuran 2 fase cair-uap.

- Koefisien performansi sistem seperti gambar 3 adalah :

$$\beta = \frac{\dot{Q}_i/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Unjuk Kerja Sistem Kompresi Uap

Pada siklus kompresi uap ideal maka siklusnya adalah 1-2s-3-4-1 pada diagram *T-s* pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram T - s siklus refrigerasi kompresi uap.

Siklus terdiri dari proses-proses berikut:

Proses 1-2s : kompresi isentropik refrigeran dari titik 1 ke tekanan kondenser pada titik 2s

Proses 2s-3 : perpindahan kalor dari refrigeran ketika mengalir pada tekanan konstan melewati kondenser.

Proses 3-4 : proses *throttling* dari titik 3 ke campuran 2 fase cair-uap.

Proses 4-1 : perpindahan kalor ke refrigeran ketika mengalir pada tekanan konstan melalui evaporator.

Semua proses diatas secara internal adalah reversibel kecuali pada proses *throttling*. Walaupun ada proses ireversibel ini, siklus dianggap ideal. Siklus 1-2-3-4-1 merupakan siklus aktual dimana terjadi proses ireversibel pada proses kompresi dari 1 ke 2 dan membutuhkan kerja input yang lebih besar. Efisiensi kompresor isentropik dirumuskan :

$$\eta_c = \frac{\dot{W}_c / \dot{m}_s}{\dot{W}_c / \dot{m}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

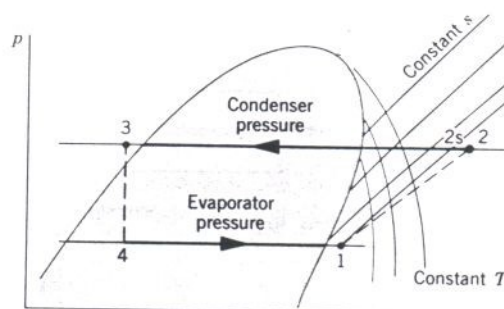
Hal-hal lain yang merupakan penyimpangan dari kondisi ideal adalah jatuh tekanan ketika refrigeran mengalir melalui evaporator, kondenser dan sambungan-sambungan pipa dari berbagai komponen. Jatuh tekanan ini tidak dibahas disini untuk menyederhanakan pembahasan.

Sifat-sifat Refrigeran

Refrigeran yang umum digunakan dewasa ini adalah *halogenated hydrocarbon*. Contohnya Refrigeran 12 yang mempunyai nama kimianya adalah *dichlorodifluoromethane* (CCl_2F_2) atau dikenal dengan nama dagang Freon-12 dan Ganatron-12. Dua jenis lain yang terkenal adalah Refrigeran 11 dan refrigeran 22. Amonia juga merupakan refrigeran lain yang penting, terutama dalam sistem refrigerasi absorpsi.

Karena *halogenated refrigerant* mempunyai efek terhadap lapisan ozon bumi, maka, perjanjian internasional telah menyepakati bahwa penggunaan refrigeran jenis ini tidak dibolehkan. Senyawa kimia *tetrafluoroethane* CF_3CFH_2 atau disebut Refrigeran 134a yang tidak mengandung halogen merupakan pengganti Refrigeran 12.

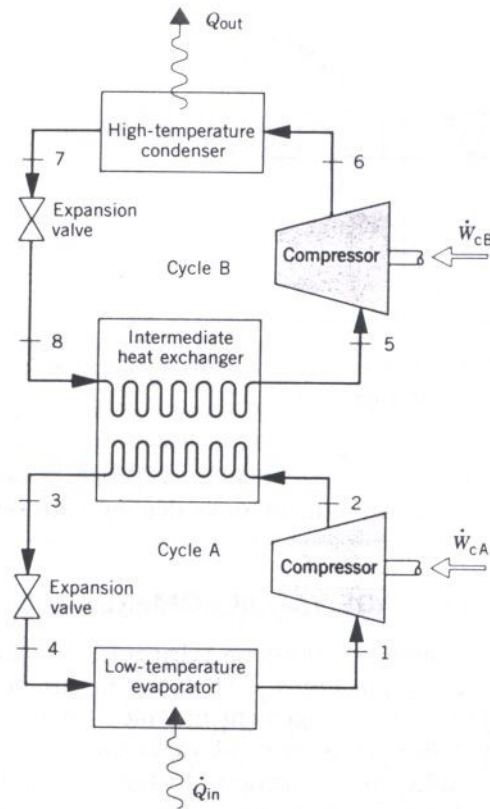
Pemilihan jenis refrigeran didasarkan atas kesesuaian hubungan tekanan-temperatur pada jangkauan aplikasi. Hal lain yang diperhatikan dalam memilih refrigeran adalah kestabilan kimia, toxicity (tingkat keracunan), sifat korosif, dan biaya. Jenis kompresor juga mempengaruhi pemilihan refrigeran. Kompresor sentrifugal cocok digunakan bagi tekanan evaporator rendah dan refrigeran dengan volume spesifik besar pada tekanan rendah. Kompresor torak baik digunakan untuk jangkauan tekanan besar dan refrigeran dengan volume spesifik rendah. Diagram termodinamik yang banyak digunakan dalam bidang refrigerasi adalah diagram $p-h$. Contoh diagram $p-h$ bisa dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Prinsip bentuk diagram tekanan-enthalpi pada refrigeran, dengan memasukkan siklus kompresi uap.

Sistem Kompresi Uap Kaskada

Pengaturan siklus gabungan pada refrigerasi disebut siklus kaskada. Gambar 6 memperlihatkan siklus kaskada ganda dimana dua siklus refrigerasi kompresi-uap, yang diberi label A dan B, disusun berurutan (seri) dengan penukar kalor (heat exchanger) aliran silang yang menghubungkannya.



Gambar 6. Contoh siklus refrigerasi tekanan uap kaskada.

Pada penukar kalor antara (intermediate heat exchanger), energi dilepaskan selama kondensasi oleh refrigeran pada siklus temperatur rendah A yang digunakan untuk menguapkan refrigeran pada siklus temperatur lebih tinggi B. Efek refrigerasi yang diinginkan terjadi pada siklus A dan kalor yang dilepaskan dari keseluruhan siklus terjadi pada kondenser temperatur tinggi. Koefisien performansi adalah perbandingan efek refrigeran terhadap kerja input total.

$$\beta = \frac{\dot{Q}_i}{\dot{W}_{cA} + \dot{W}_{cB}}$$

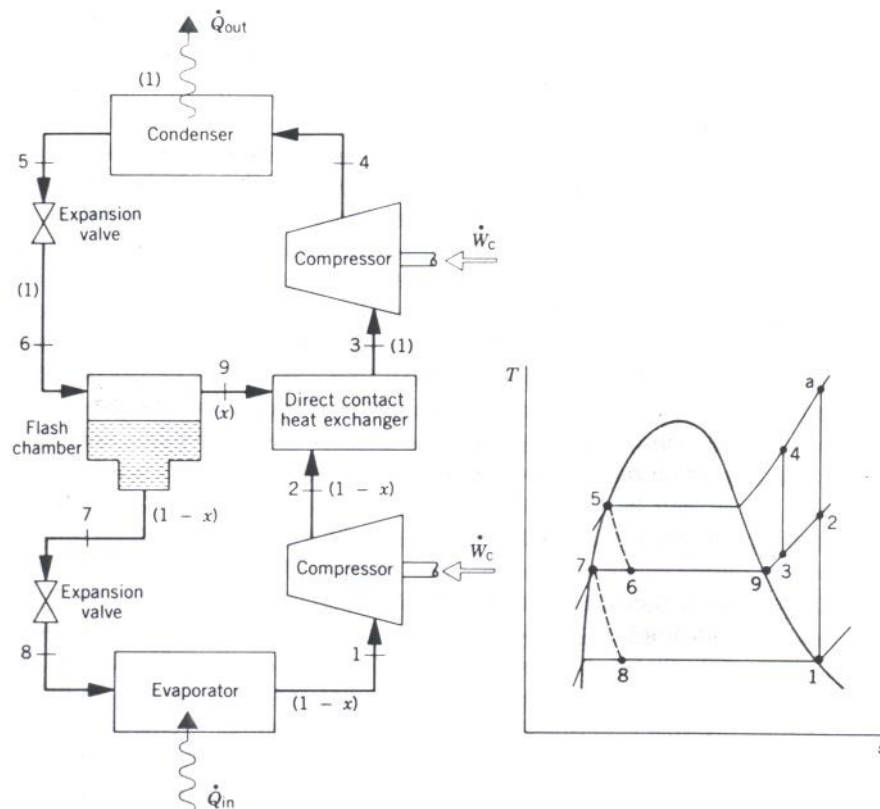
Laju aliran massa pada masing-masing siklus biasanya berbeda. Siklus kaskada bisa memiliki tiga atau lebih siklus.

Keuntungan utama dari siklus kaskada dengan penukar kalor jenis tertutup adalah refrigeran pada dua atau lebih tingkat bisa dipilih sesuai dengan tekanan evaporator dan kondenser dalam dua atau lebih jangkauan temperatur.

Sistem Kompresi-Uap Banyak Tingkat Dengan Pendinginan Antara

Contoh siklus Refrigerasi Banyak Tingkat (Multi stage) bisa dilihat pada gambar 7 berikut ini:

Pendinginan antara dilakukan dengan cara penukar kalor kontak langsung. Uap jenuh temperatur rendah masuk ke penukar kalor pada titik 9, dimana kemudian bercampur dengan refrigeran yang keluar dari kompresor pertama pada titik 2. Campuran refrigeran keluar dari kompresor pada titik 3 untuk kemudian masuk ke kompresor berikutnya untuk di kompresi dan keluar pada titik 4. Sedikit kerja yang dibutuhkan per satuan massa aliran pada kompresi dari 1 ke 2 yang diikuti dengan kompresi dari 3 ke 4 daripada kompresi satu tingkat 1-2-a.



Gambar 7. Siklus refrigerasi dua tingkat, kompresi dan pendinginan antara *flash*.

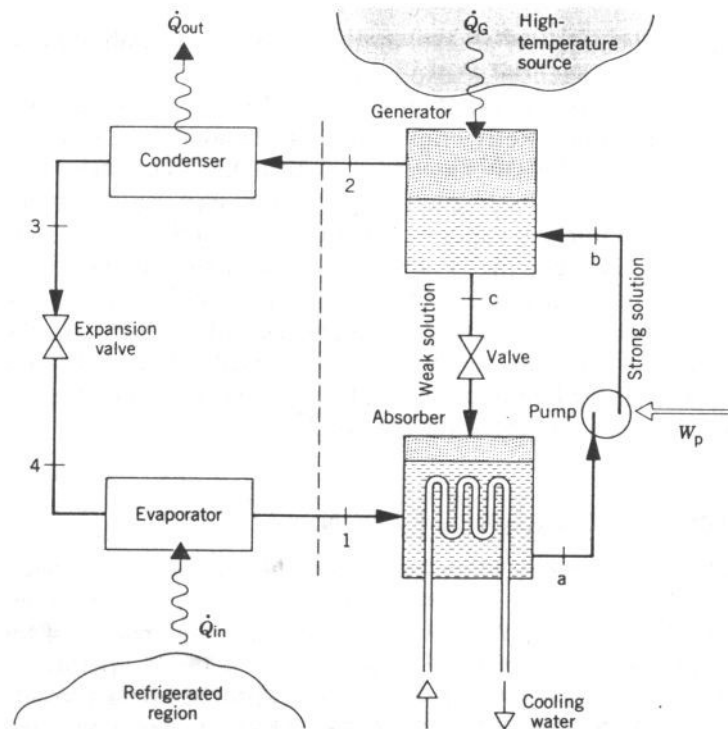
Peran sentral dari siklus pada gambar 7 adalah *separator* (pemisah) cairan-uap yang disebut *flash chamber* (ruang *flash*). Refrigeran memasuki ruang flash pada kondisi campuran dua fase cair-uap. Pada ruang flash, aliran memisah menjadi dua dimana, uap jenuh keluar dari ruang flash menuju penukar kalor pada titik 9, dan cairan jenuh keluar pada titik 7 menuju evaporator.

Refrigerasi Absorpsi

Siklus ini mempunyai beberapa ciri yang sama dengan siklus kompresi-uap tetapi berbeda dalam dua aspek. Pertama dalam hal proses kompresi, refrigeran dalam sistem ini diabsorp/diserap oleh zat kedua yang disebut *absorbent* untuk membentuk larutan cair. Larutan cair kemudian dipompa ke tekanan yang lebih tinggi. Karena volume spesifik rata-rata larutan cair lebih rendah dari uap maka kerja yang dibutuhkan juga lebih rendah, karena itu sistem absorpsi mempunyai keuntungan dalam hal kerja input yang kecil dibandingkan terhadap sistem kompresi uap.

Perbedaan lainnya adalah beberapa cara harus dilakukan pada sistem absorpsi untuk mengangkat uap dari larutan cair sebelum refrigeran memasuki kondenser. Cara yang dilakukan mungkin dengan menggunakan sumber panas dari luar seperti panas dari pembakaran gas alam atau bahan bakar.

Gambar 8 menunjukkan salah satu sistem refrigerasi absorpsi. Pada gambar tersebut amonia adalah refrigerannya dan air sebagai *absorbent*. Pada *absorber*, uap amonia diserap oleh air. Air pendingin disirkulasikan disekitar absorber untuk membuang energi yang dilepaskan ketika amonia menjadi cair dan menjaga temperatur pada absorber serendah mungkin. Pada *generator*, perpindahan kalor terjadi dari sumber yang bertemperatur tinggi yang membuat uap amonia keluar dari larutan, meninggalkan larutan amonia-air di generator yang akan kembali ke absorber.



Gambar 8. Sistem refrigerasi absorpsi ammonia-air sederhana.

Sistem ammonia-air biasanya memerlukan modifikasi dari siklus sederhana diatas. Modifikasi yang umum dilakukan terlihat pada gambar 9.

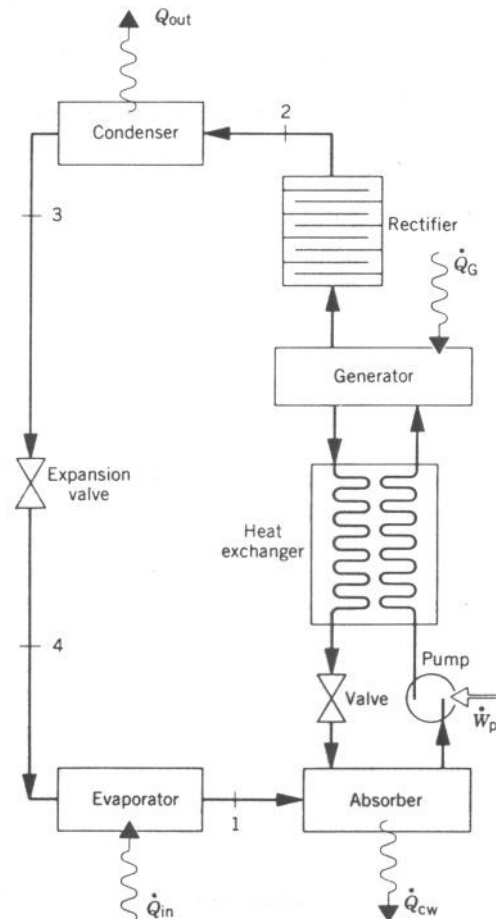
SISTEM POMPA KALOR

Tujuan dari pompa kalor adalah mengatur temperatur dalam gedung atau bentuk lainnya lebih tinggi dari temperatur lingkungan atau memberikan perpindahan kalor untuk proses industri tertentu pada temperatur yang lebih tinggi. Pompa kalor mempunyai kemiripan dengan sistem refrigerasi. Pompa kalor kompresi uap cocok digunakan untuk pemanasan ruang. Pompa kalor absorpsi banyak digunakan pada industri.

Siklus Pompa Kalor Carnot

Gambar 1 adalah skematik pompa kalor hanya dengan merubah sudut pandang dimana yang diperhatikan adalah bagaimana membuang panas, Q_{out} , ke daerah panas. Kalor yang dilepaskan adalah jumlah energi yang disuplai ke fluida kerja ditambah dengankerja input bersih siklus yaitu:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_i + \dot{W}_{net}$$



Gambar 9. Sistem absorpsi ammonia-air yang dimodifikasi.

Koefisien performansi dirumuskan sebagai:

$$\gamma_{\max} = \frac{Q_{out} / m}{W_c / m - W_t / m}$$

$$\gamma_{\max} = \frac{T_H (S_a - S_b)}{(T_H - T_C)(S_a - S_b)} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$

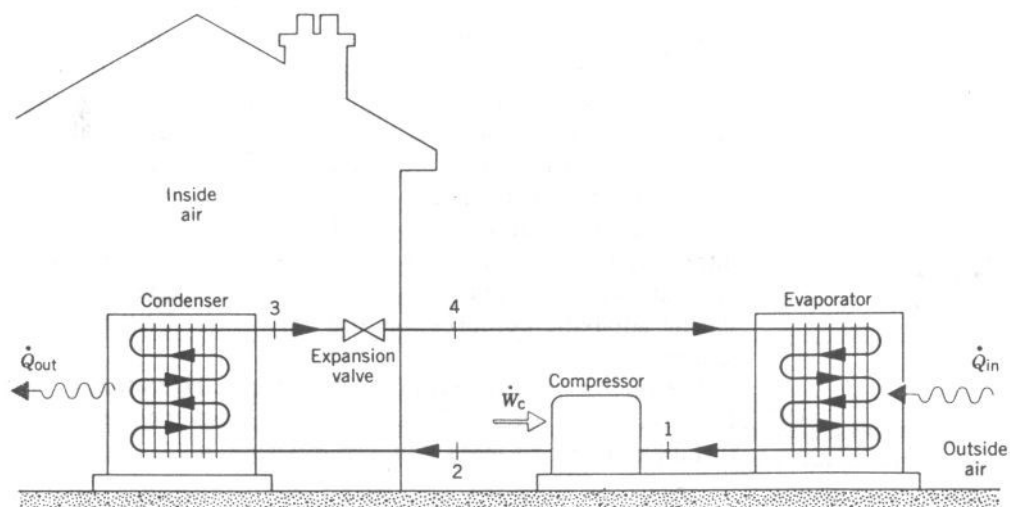
Persamaan diatas adalah koefisien performansi teoritis maksimum untuk pompa kalor yang beroperasi antara temperatur T_C dan T_H . Pompa kalor sebenarnya mempunyai harga koefisien performansi lebih kecil dari koefisien performansi teoritis maksimum tersebut.

Pompa Kalor Kompresi-Uap

Sistem pompa kalor aktual berubah cukup banyak dari model siklus Carnot. kebanyakan sistem yang umum digunakan saat ini adalah jenis kompresi uap.

Analisis pompa kalor kompresi uap adalah sama dengan siklus refrigerasi kompresi uap yang dibahas didepan.

Gambar 10 adalah ilustrasi pompa kalor kompresi uap yang umum yang digunakan untuk pemanas ruangan dan mempunyai beberapa komponen dasar yang sama dengan sistem refrigerasi kompresi-uap yaitu : kompresor, kondenser, katup ekspansi dan evaporator. Tujuan penggunaannya saja yang lain dimana pada pompa kalor kalor masuk berasal darilingkungan dan kalor keluar diarahkan ke daerah yang diinginkan.



Gambar 10. Sistem pompa kalor kompresi uap untuk pemanas ruangan.

Koefisien performansi dari pompa kalor kompresi-uap dengan kondisi seperti gambar 10 adalah :

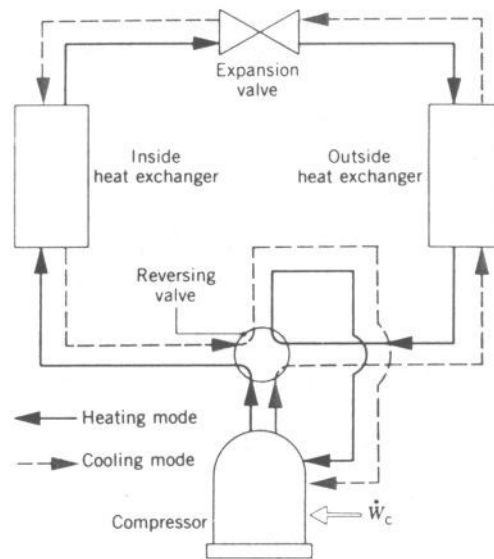
$$\gamma = \frac{\dot{Q}_{out} / \dot{m}}{\dot{W}_c / \dot{m}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Harga γ tidak pernah kurang dari satu.

Banyak sumber energi yang tersedia untuk pertukaran kalor ke refrigeran pada evaporator. Diantaranya termasuk udara luar, tanah, air dari danau, sungai atau sumur. Pada banyak penggunaan untuk penghangat ruangan, evaporator mengambil panas dari udara luar.

Pompa kalor dengan sumber udara bisa dimanfaatkan untuk memberikan efek pendinginan pada musim panas dengan menggunakan katup terbalik seperti

gambar 11. Garis tidak terputus menunjukkan jalur aliran refrigeran dalam fungsi pemanasan, jalur terputus-putus menunjukkan proses kebalikan dimana sistem berfungsi sebagai pendingin ruangan.



Gambar 11. Contoh pompa kalor terbalik, udara ke udara.

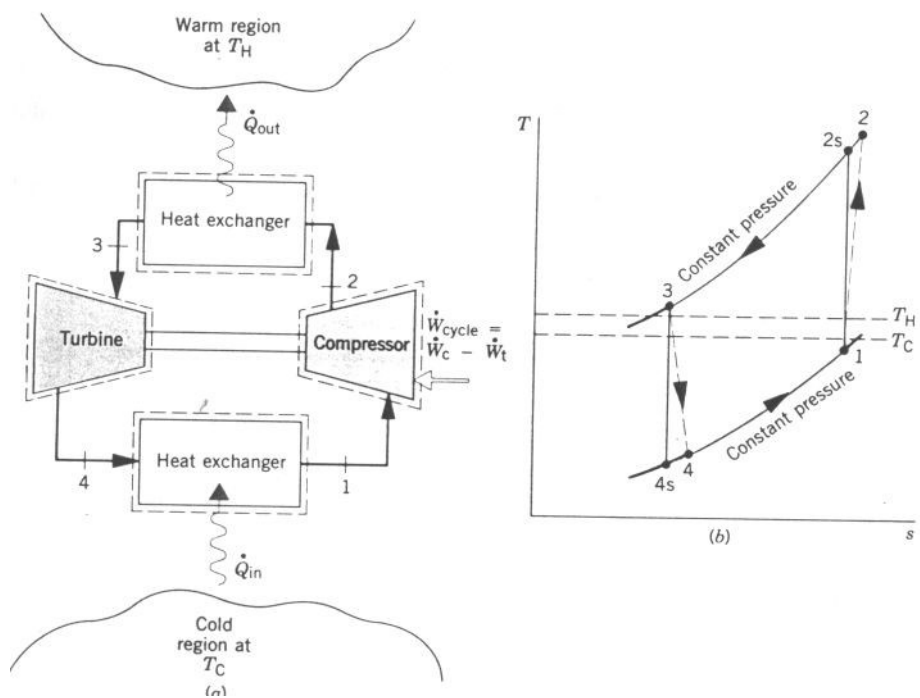
SISTEM REFRIGERASI GAS

Semua sistem refrigerasi yang telah dibahas mengalami perubahan fase. Pada sistem refrigerasi gas, fluida kerjanya tetap pada fase gas diseluruh sistem. Sistem refrigerasi gas mempunyai beberapa aplikasi penting. Sistem ini digunakan untuk mencapai temperatur yang sangat rendah untuk mencairkan udara dan gas lainnya dan untuk tujuan aplikasi lain yang khusus seperti pendinginan kabin pesawat.

Siklus Refrigerasi Brayton

Siklus refrigerasi Brayton adalah kebalikan dari siklus daya Brayton seperti yang telah dipelajari sebelumnya. Skema siklus Brayton yang dibalik diperlihatkan pada gambar 12a. Gas refrigeran, yang bisa saja udara, memasuki kompresor pada titik 1, dimana temperaturnya sedikit dibawah temperatur daerah yang didinginkan, dan dikompresikan ke titik 2. Gas kemudian didinginkan ke titik 3 dengan pertukaran kalor ke lingkungan. Kemudian gas diekspansi ke titik 4 dimana temperatur, T_4 , kurang dari daerah yang didinginkan. Refrigerasi dicapai

melalui perpindahan kalor dari daerah yang didinginkan ke gas yang lewat dari titik 4 ke titik 1.



Gambar 12. Siklus refrigerasi Brayton.

Kerja kompresor dan turbin per satuan massa aliran adalah :

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad \text{dan} \quad \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_3 - h_4$$

Pada sistem refrigerasi gas, kerja turbin tidak bisa diabaikan seperti pada sistem kompresi-uap. Kalor yang dipindahkan ke gas refrigeran adalah :

$$\frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$

Koefisiens performansi adalah:

$$\beta = \frac{\dot{Q}_i / \dot{m}}{\dot{W}_c / \dot{m} - \dot{W}_t / \dot{m}} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)}$$

Ireversibilitas pada turbin dan kompresor akan menurunkan koefisien performansi karena kerja kompresor meningkat dan daya output turbin menurun.