

BAB IV

SISTEM BERTEKANAN BANYAK

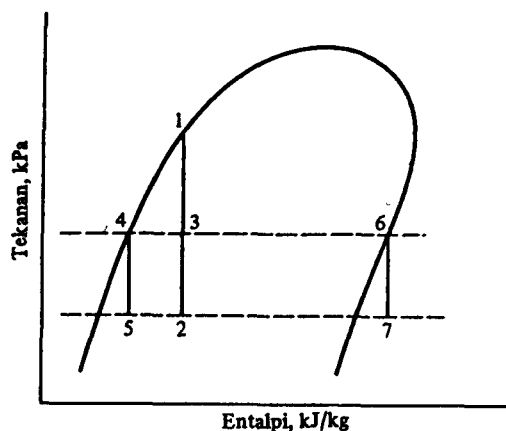
4.1 Sistem bertekanan banyak dalam refrigerasi industri.

Suatu sistem bertekanan banyak adalah sistem refrigerasi yang mempunyai dua atau lebih tekanan sisi rendah. Tekanan sisi rendah (low – side pressure) adalah tekanan refrigeran di antara katup ekspansi dan saluran masuk kompresor. Suatu sistem bertekanan banyak di bedakan dengan sistem bertekanan tunggal yang hanya mempunyai satu tekanan rendah. Sistem bertekanan banyak dapat diumpai misalnya pada tempat penyimpanan produ-produk susu dimana salah satu evaporator bekerja pada suhu -35°C , yaitu untuk mengeraskan eskrim, sementara evaporator lain bekerja pada suhu 2°C untuk mendinginkan susu. Penggunaan lain yang khas yaitu pada industri proses dimana dua atau tiga kompresor dirangkaikan untuk melayani evaporator yang bekerja pada suhu rendah, yaitu -20°C atau lebih rendah lagi.

Bab ini akan meninjau sistem-sistem bertekanan banyak yang mempunyai dua tekanan rendah, tetapi prinsip-prinsip yang di kembangkan di sini akan dapat di gunakan bagi sistem yang bertekanan sisi rendah lebih dari dua. Dua fungsi yang umum terdapat bersama-sama pada sistem bertekanan banyak adalah pemisahan gas cetus (flash gas) dan melakukan intercooling. Keduanya akan di bahas terlebih dahulu, kemudian akan dianalisis kombinasi-kombinasi evaporator berganda dan kompresor.

4.2 Pemisahan gas cetus (flash gas).

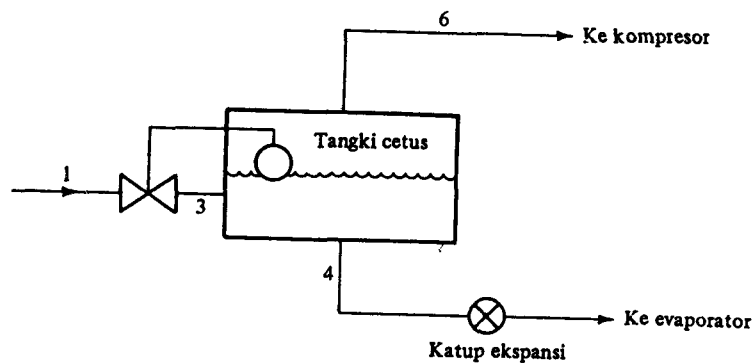
Penghematan daya susu sistem refrigerasi dapat dicapai bila gas cetus yang timbul di dalam proses trotel (throttling) di antara kondensor dan evaporator dipisahkan dan ditekan kembali sebelum campuran tersebut mengalami ekspansi sempurna, bila cairan jenuh diekspansikan melalui suatu katup ekspansi, maka fraksi uap atau gas cetus terus bertambah. Proses ekspansi yang terlihat pada diagram tekanan-entalpi dalam gambar 4-1 terjadi dari titik 1 ke titik 2. Titik keadaan ketika berlangsung proses ekspansi bergeser ke daerah yang fraksi uapnya lebih besar.



Gbr. 4-1 Proses ekspansi yang memperlihatkan perpindahan proses 3-2 menjadi 4-5 dan 6-7.

Titik akhir ekspansi, yaitu titik 2, dapat dicapai dengan menghentikan proses ekspansi di 3 dengan memisahkan fasa cairan dan uap masing-masing menjadi 4 dan 6. Kemudian ekspansi dapat dilanjutkan dengan mengekspansikan cairan di 4, dan uap di 6 ke arah tekanan akhir, yaitu masing-masing 5 dan 7. Penggabungan keadaan-keadaan refrigeran 5 dan 7 menghasilkan titik 2.

Pengamatan terhadap proses ekspansi dari 6 ke 7 menunjukkan bahwa proses tersebut sia-sia. Pada tempat yang pertama, refrigeran di 7 tak dapat melakukan pendinginan; di tempat yang kedua, akan dibutuhkan kerja untuk menekan uap kembali ke tekanannya semula di 6. Mengapa tidak dilakukan ekspansi sebagian, memisahkan cairan dari uap, lalu meneruskan ekspansi cairan, dan kemudian menekan ulang uap tanpa melakukan ekspansi lebih lanjut? Alat yang digunakan untuk pemisahan ini disebut tangki cetus (flash tank), lihat Gambar 4-2. Ekspansi dari 1 ke 3 terjadi melalui satu katup apung, yang kemudian diperlukan untuk mempertahankan tinggi cairan yang tetap di dalam tangki cetus. Untuk menekan kembali uap di 6, karus ada kompresor yang bertekanan hisap sebesar di 6. Jadi dalam sistim diperlukan dua buah kompreor.



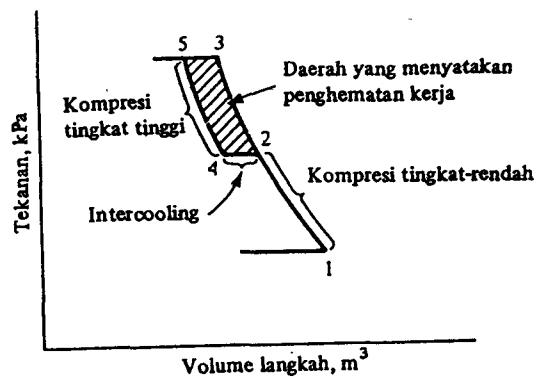
Gambar 4-2 Tangki cetus (Flash tank) untuk memisahkan gas cetus selama proses ekspansi.

Tangki cetus (flash tank) tersebut dapat memisahkan cairan refrigeran dari uapnya. Pemisahan tersebut terjadi ketika kecepatan uap arah ke atas cukup lambat sehingga partikel-partikel cairan jatuh lagi ke dalam tangki. Pada keadaan normal, kecepatan uap kurang dari 1 m/det cukup menghasilkan pemisahan ini. Kecepatan tersebut diperoleh dengan membagi aliran volume uap dengan luas permukaan cairan.

Cara yang paling efisien untuk memisahkan gas cetus adalah dengan memisahkan uap secara sinambung bila gas tersebut berbentuk, dan segera menekannya lagi. Belum ada cara yang lebih praktis yang dikembangkan untuk mengatasi hal ini.

4.3 Intercooling

Intercooling antara kedua tingkatan kompresi akan menurunkan kerja kompresi per-kilogram uap. Untuk kompresi kompresi udara dua tingkat misalnya, intercooling dari titik 2 ke 4 pada diagram tekanan-volume-langkah (Gambar 4.3), menghemat sejumlah kerja. Bila proses tersebut reversibel, penghematannya ditunjukkan dengan daerah yang berarsir.



Gambar 4.3 Intercooling pada kompresi dua tingkat.

Dalam gambar 4-4 dapat dilihat bagaimana kompresi dengan intercooling digambarkan pada diagram tekanan-entalpi suatu refrigeran. Proses 1-2-3 dan 4-5 berada pada satu garis dengan entropi konstan, tetapi proses 2-3 mempunyai kurva yang lebih miring daripada proses 4-5. Karena itu, di antara dua tekanan yang sama, proses 4-5 memperlihatkan kenaikan entalpi yang lebih kecil, yang menunjukkan bahwa kerja yang dibutuhkan lebih sedikit dibandingkan dengan proses 2-3.

Cara lain untuk menunjukkan bahwa kerja kompresi naik bila proses bergerak lebih jauh ke dalam daerah lanjut-panas adalah dengan menyelesaikan persamaan kerja pada proses kompresi politropik reversibel untuk gas ideal, yaitu

$$w = -\int v dp = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]$$

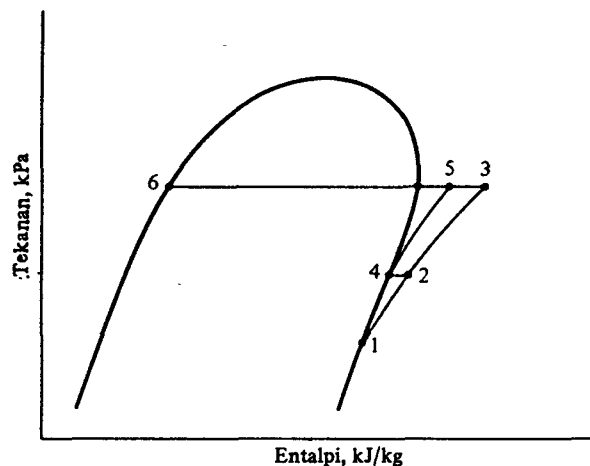
Dengan p = tekanan, pa

V = volume spesifik, m^3/kg

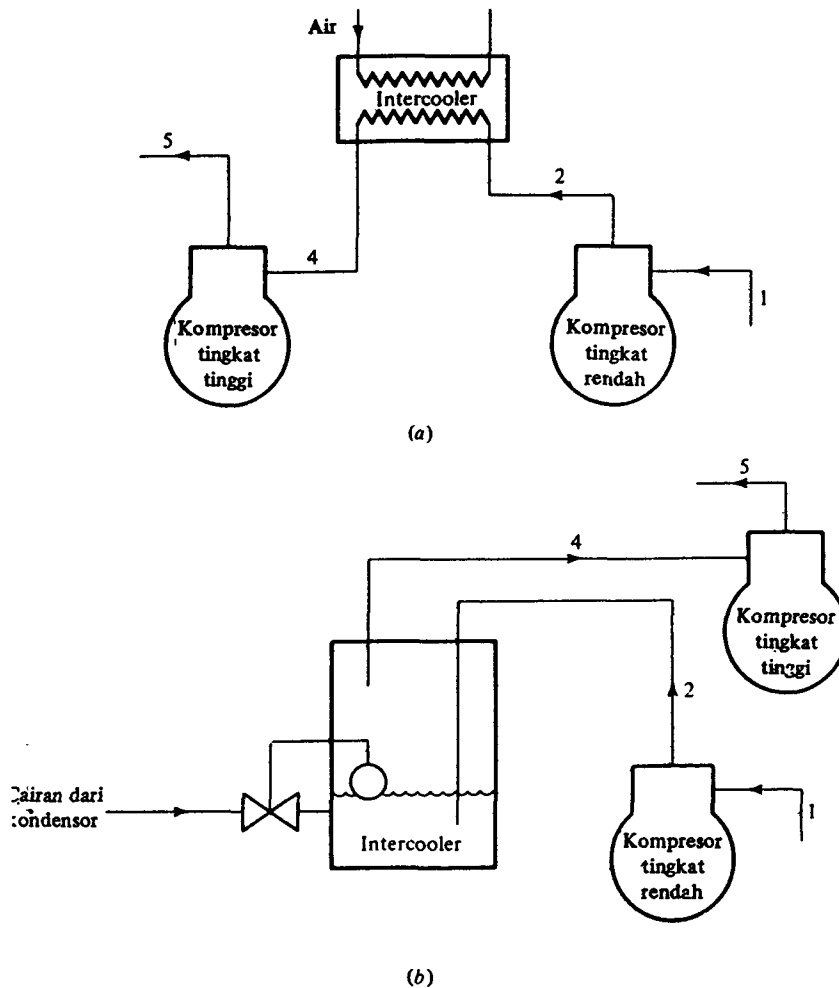
n = eksponen politropik yang berkaitan dengan tekanan dan volume spesifik selama kompresi, $p v^n = \text{konstanta}$

Di mana subskrip 1 menyatakan masukan dan 2 menyatakan keluaran kompresor. Di antara dua tekanan tertentu, kerja kompresi sebanding dengan volume spesifik gas yang masuk. Volume spesifik di titik 2 (Gambar 4-4) lebih besar dari titik 4; sehingga kerja yang dibutuhkan untuk kompresi dari 2 ke 3 lebih besar dari kerja kompresor 4 ke 5.

Intercooling di dalam suatu sistim refrigerasi dapat dilakukan dengan suatu penukar kalor berpendingin-air (water-cooled heat exchanger) atau dengan menggunakan refrigeran. Lihat Gambar 4-5a dan (b). Intercooler berpendingin air mungkin dapat mencukupi bagi kompresi udara dua tingkat, tetapi untuk kompresi refrigeran, air biasanya tidak cukup dingin. Metode lain, yang terlihat dalam Gambar 4-5b adalah dengan menggunakan refrigeran cair dari kondensor untuk intercooling. Gas yang dikeluarkan dari kompresor tingkat rendah menerobos cairan di dalam intercooler. Refrigeran meninggalkan intercooler pada titik 4 dalam bentuk uap jenuh.



Gambar 4-4 Intercooling suatu refrigeran pada kompresi dua tingkat



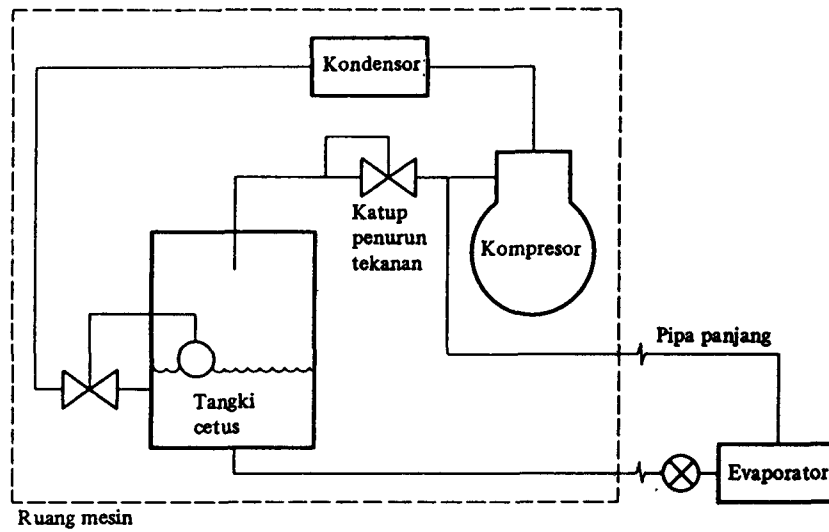
Gambar 4-5 Intercooling dengan (a) penukar kalor berpendingin air, dan (b) refrigeran cair.

4.4 Satu evaporator dan satu kompresor.

Tangki cetus (flash tank) dan intercooler terdapat pada hampir semua sistim bertekanan banyak dan sekarang akan di tinjau dari berbagai kombinasi kompresor-evaporator.

Dengan satu kompresor dan satu evaporator, tangki cetus akan berfungsi seperti yang terlihat dalam gambar 4-7. Sebuah katup penurun tekan mentrol gas cetus (throttles the flash gas) dari tekanan menengah ke tekanan evaporator. Trotel ini di perlukan karena tiak ada kompresor yang tersedia dengan tekanan hisap yang tinggi. Perhitungan-perhitungan akan menunjukkan bahwa tangki cetus tidak memperbaiki prestasi sistim. Satu-satunya alasan penggunaan tangki cetus adalah untuk menjaga agar

gas cetus tetap berada didalam ruang mesin dan tidak di kirim ke evaporator. Gas cetus di dalam tabung / pipa evaporator dan di dalam pipa hisap yang panjang tidak melakukan kerja pendinginan, tetapi memperbesar penurunan tekanan. Sistem ini tidak begitu sering di gunakan.

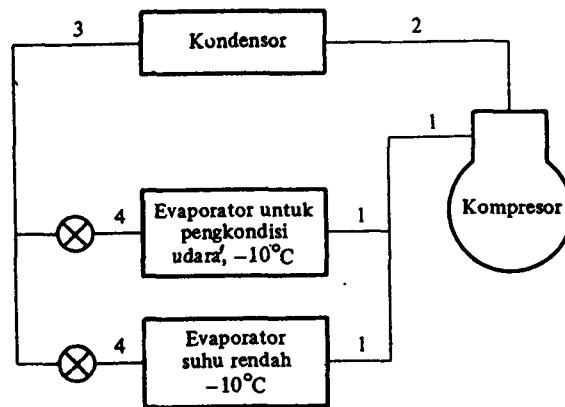


Gambar 4-6 sistem dengan satu kompresor dan satu evaporator, menggunakan sebuah tangki cetus (flash tank).

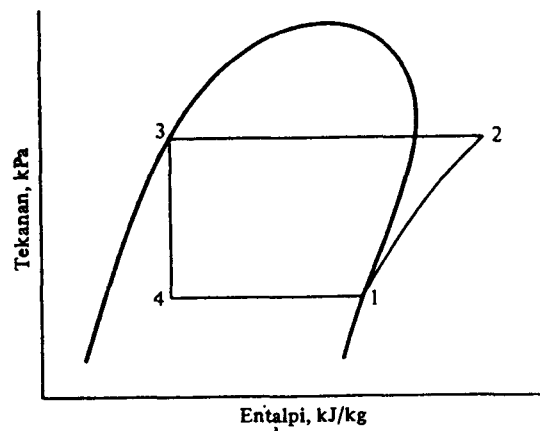
4-5 Dua evaporator dan satu kompresor.

Pada banyak situasi, satu kompresor melayani dua evaporator yang berlainan suhunya. Sebagai contoh adalah pada suatu industri yang memerlukan refrigerasi suhu rendah untuk suatu proses dan juga harus melakukan pengkondisian udara untuk beberapa ruang kantor. Dalam gambar 4-8a ditunjukkan satu cara menata sistim ini, dan gambar 4-8b menunjukkan diagraf tekanan-entalpi yang bersangkutan. Dalam gambar 4-8a, evaporator pengkondisi udara bekerja pada suhu -10°C walaupun sebenarnya suhu evaporator yang lebih tinggi dari ini sudah cukup untuk mendinginkan udara. Selanjutnya, akan timbul kesulitan bila suatu evaporator bekerja pada suhu rendah yang tidak diperlukan: Evaporator yang mendinginkan udara untuk pengkondisian udara (AC)

akan diselimuti es, yang menghambat aliran udara; Evaporator yang mendinginkan suatu cairan dapat membekukan cairan tersebut; dan evaporator yang mendinginkan udara untuk suatu ruangan tempat penyimpanan daging atau suatu produk, akan mengeringkan udara tersebut sehingga produk yang ada di dalamnya akan mengering (dehydrated).



(a)



(b)

Gambar 4-7. (a) Satu kompresor dan dua evaporator, dengan evaporator AC yang bekerja pada suhu -10°C . (b) Diagram tekanan-entalpi untuk sistem (a).

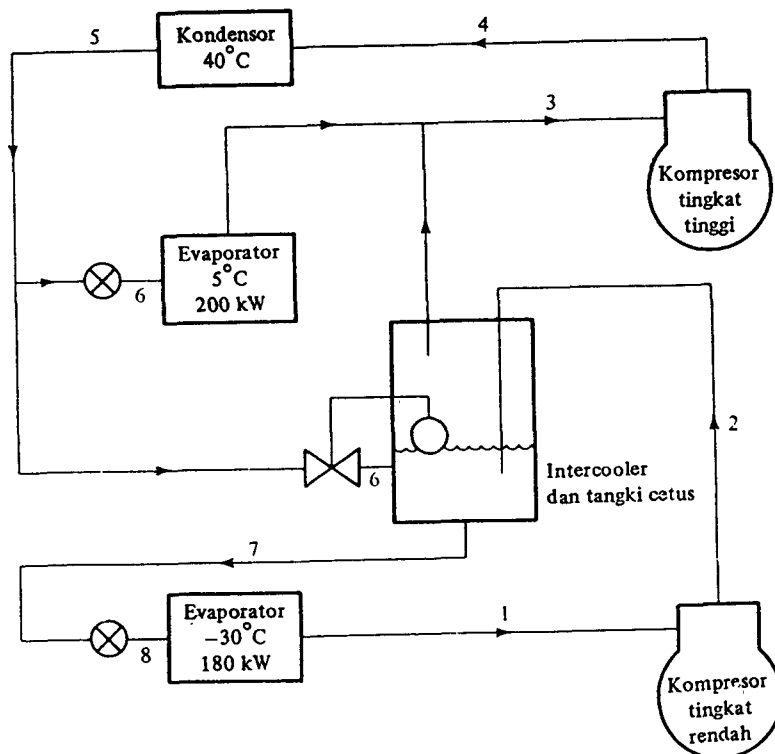
4.6 Dua kompresor dan satu evaporator.

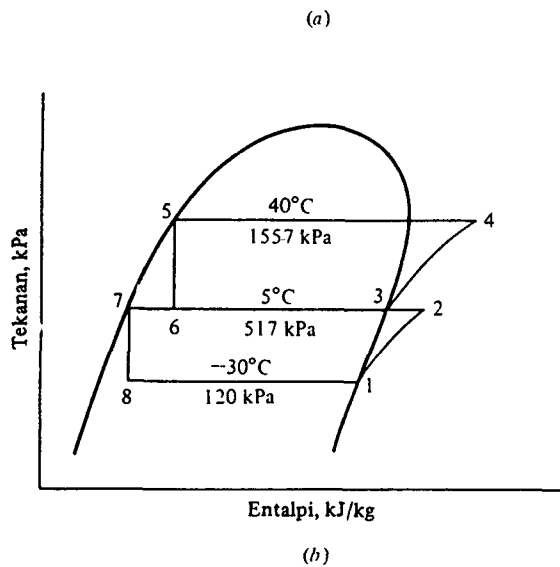
Kompresi dua tingkat dengan intercooling dan pemisahan gas cetus seringkali merupakan cara yang paling ideal untuk melayani satu evaporator bersuhu rendah. Sistem ini memerlukan daya yang lebih sedikit dari pada sistem kompresor tunggal, dan seringkali penghematan daya ini akan menentukan harga peralatan ekstra. Kompresor tersebut yang satu disebut kompresor tingkat tinggi dan yang lain disebut kompresor tingkat rendah.

4.7. Dua Kompresor dan dua Evaporator

Sistem yang mempunyai dua evaporator, yang bekerja pada suhu yang berbeda merupakan hal yang umum di dalam refrigerasi industri. Pendinginan susu hewan dan pembuatan eskrim telah disebutkan pada bagian terdahulu. Suatu pabrik makanan beku mungkin membutuhkan dua evaporator yang berbeda suhunya, yang satu -40°C untuk pendinginan cepat bahan makanan dan yang lain -25°C untuk menyimpan makanan setelah dibekukan (cold storage). Industri kimia dan proses seringkali membutuhkan suhu-suhu refrigerasi yang berbeda dalam beberapa bagian pabrik. Evaporator-evaporator yang suhunya berbeda-beda dapat ditangani secara efisien oleh suatu sistem kompresi dua tingkat yang menggunakan intercooling dan pemisah gas cetus.

Gb. 4-8 (a) Dua kompresor dan dua evaporator yang bekerja dengan intercooling dan flash -gas





Gbr. 4-8 (b). Diagram Tekanan-entalpi sistim yang bersangkutan pada (a)

Contoh : Pada suatu sistim amonia, satu evaporator diperlukan untuk 180 kW refrigerasi pada suhu -30°C , dan evaporator yang lain 200 kW pada suhu 5°C . Sistem ini menggunakan kompresi dua tingkat dengan intercooling dan ditata seperti terlihat dalam gambar 4-8(a). Suhu pengembunan 40°C . Hitunglah daya yang dibutuhkan oleh kompresor.

Penyelesaian:

Lukis diagram tekanan-entalpi untuk daur seperti tampak dalam gambar 4-8(b). Tekanan buang kompresor tingkat-rendah dan tekanan hisap kompresor tingkat tinggi berharga sama seperti pada evaporator yang bershu 5°C .

Selanjutnya tentukan entalpi-entalpi pada setiap titik keadaan.

$$h_1 = h_g \text{ pada } -30^{\circ}\text{C} = 1423 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h \text{ pada } 517 \text{ kPa setelah isentropik} = 1630$$

$$h_3 = h_g \text{ pada } 5^{\circ}\text{C} = 1467$$

$$h_4 = h \text{ pada } 1557 \text{ kPa setelah kompresi isentropik} = 1625$$

$$h_5 = h_f \text{ pada } 40^{\circ}\text{C} = 390,6 \quad h_6 = h_5 = 390,6$$

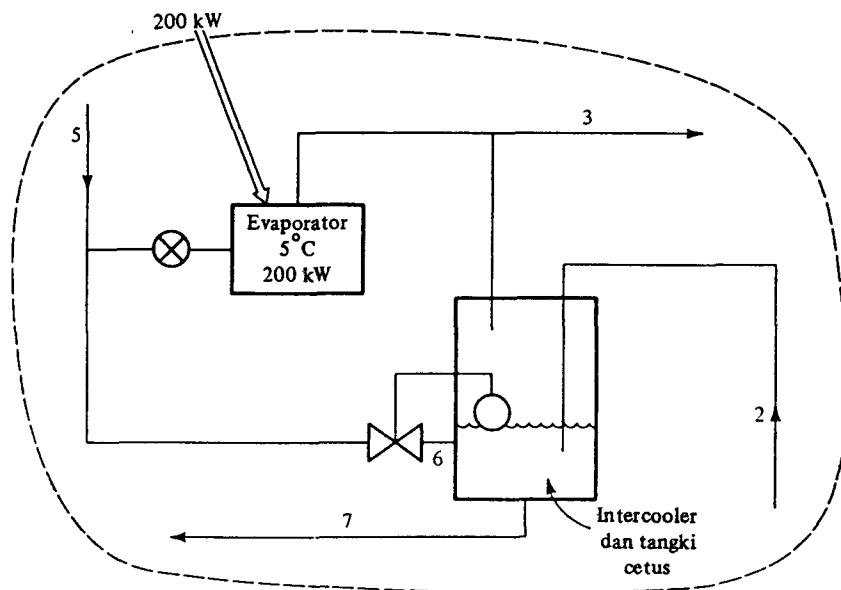
$$h_7 = h_f \text{ pada } 5^{\circ}\text{C} = 223 \quad h_8 = h_7 = 223$$

laju alir massa,

$$w_1 = \frac{180 \text{ kW}}{1423-223} = 0,150 \text{ kg/det}$$

$$w_7 = w_8 = w_2 = w_1 = 0,150 \text{ kg/det}$$

Untuk menyederhanakan perhitungan laju alir massa yang dihasilkan oleh kompresor tingkat-tinggi tersebut adalah dengan membuat keseimbangan kalor dan massa di sekitar evaporator suhu tinggi dan intercooler, seperti yang terlihat dalam gambar 4-9.



Gambar 4-9. Keseimbangan kalor dan massa di sekitar evaporator tingkat-tinggi dan intercooler

Keseimbangan kalor ;

$$W_5 h_5 + 200 \text{ kW} = w_2 h_2 = 3 h_3 + w_7 h_7$$

Keseimbangan massa ;

$$W_2 = w_7 = 0,150 \text{ kg/det}$$

Sehingga

$$W_5 = w_3$$

Penggabungan menghasilkan

$$390,6w_3 + 200 + 0,150 (1630) = 1467w_3 + 0,150 (223)$$

Hasilnya

$$W_3 = 0,382 \text{ kg/det}$$

Daya yang diperlukan oleh kompresor sekarang dapat dihitung;

$$\text{Daya tingkat-rendah ; } 0,150 (1630 - 1423) = 31,1 \text{ kW}$$

$$\text{Daya tingkat-tinggi; } 0,382 (1625 - 1467) = 60,4 \text{ kW}$$

$$\text{Total} = 91,5 \text{ kW}$$

Bila satu kompresor melayani masing-masing evaporator pada kompresi tingkat tunggal, kebutuhan daya untuk dua kompresor adalah sebagai berikut ;

Aliran melalui evaporator suhu-rendah ;

$$\frac{180 \text{ kW}}{1423 - 390,6} = 0,174/\text{det}$$

Aliran melalui evaporator suhu tinggi :

$$\frac{200 \text{ kW}}{1467 - 390,6} = 0,186 \text{ kg/det}$$

$$\text{Daya untuk sistem suhu-rendah : } 0,174(1815 - 1423) = 68,2 \text{ kW}$$

$$\text{Daya untuk sistem suhu-tinggi : } 0,186 (1625 - 1467) = 29,4$$

$$\text{Total} = 97,6 \text{ kW}$$

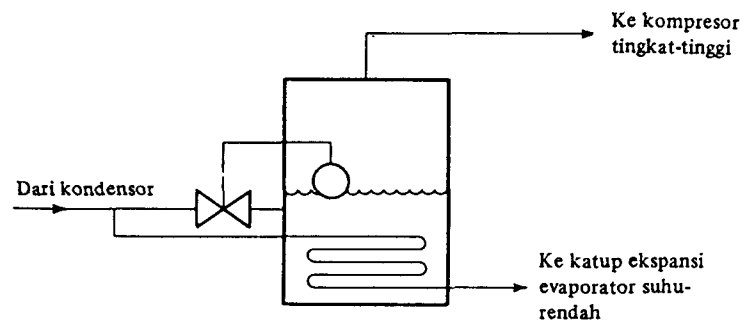
Jumlah daya kompresor-kompresor yang melayani evaporator secara sendiri-sendiri lebih besar dari daya untuk sistem gabungan dalam Gambar 4-8. Daya yang dibutuhkan untuk evaporator suhu-tinggi sama dalam kedua kasus, sehingga semua penghematan disebabkan oleh pemisahan gas-cetus dan intercooling refrigeran yang melayani evaporator suhu-rendah.

Tekanan menengah (intermediate pressure) dalam sistim (Gambar 4-8(a). adalah tekanan jenuh yang sesuai dengan suhu 5°C. Jadi, tekanan ini cocok dengan suhu evaporator suhu-tinggi. Dalam sistem satu evaporator dan dua kompresor yang telah dibicarakan, tekanan menengah dapat diatur dengan mengubah kapasitas pemompaan relatif kedua kompresor.

4-8 Peralatan tambahan.

Pada peralatan intercooling dan pemisah gas-cetus kadang-kadang dilakukan beberapa perbaikan. Bila suhu gas buang dari kompresor tingkat-rendah cukup tinggi, maka penukar kalor berpendingin-air akan dapat menyerap kalor dari gas buang tersebut sebelum mengalir ke intercooling utama.

Suatu alat yang dapat menghasilkan hal yang sama dengan pemisah gas-cetus disebut sebuah liquid subcooler (pembawa dingin cairan, seperti gambar 4-10). Alat ini mendinginkan cairan refrigeran dengan cara menguapkan sebagian kecil cairan tersebut. Dibandingkan dengan tangki-cetus sentuh-langsung (direct-contact flash tank), subcooler ini tidak dapat mendinginkan cairan menjadi katup ekspansi, lebih kecil kemungkinan penurunan tekanan di dalam pipa tersebut mencetuskan cairan menjadi uap, yang menghambat aliran melalui katup ekspansi.



Gambar 4-10. Sebuah subcooler cairan (alat penurunan suhu cairan dari suhu jenuh menjadi suhu bawah dingin)

Penting untuk diperhatikan bahwa pada sistem bertekanan banyak, pemisahan dan kompresi gas cetus sebelum berekspansi lengkap, akan menurunkan daya yang dibutuhkan oleh kompresor. Intercooling di antara tingkat-tingkat kompresi juga menurunkan kebutuhan daya terutama pada refrigeran amonia. Intercooling menurunkan suhu buang refrigeran dari kompresor tingkat tinggi. Suhu buang yang tinggi menyebabkan karbonisasi minyak yang melengketkan katup-katup kmpresor torak.

Jadi setiap rencana untuk menggunakan sistim bertingkat ganda harus juga dipikirkan dari segi ekonomi. Penghematan daya harus dibandingkan dengan penambahan biaya peralatan, untuk menentukan apakah penambahan investasi tersebut memberikan nilai tambah. Beberapa faktor yang berpengaruh seperti jenis refrigeran, jenis kompresor (torak atau sekrup) serta ukuran sistem. Kompresor sekrup lebih mampu bekerja dengan perbandingan tekanan yang lebih tinggi daripada kompresor torak.