

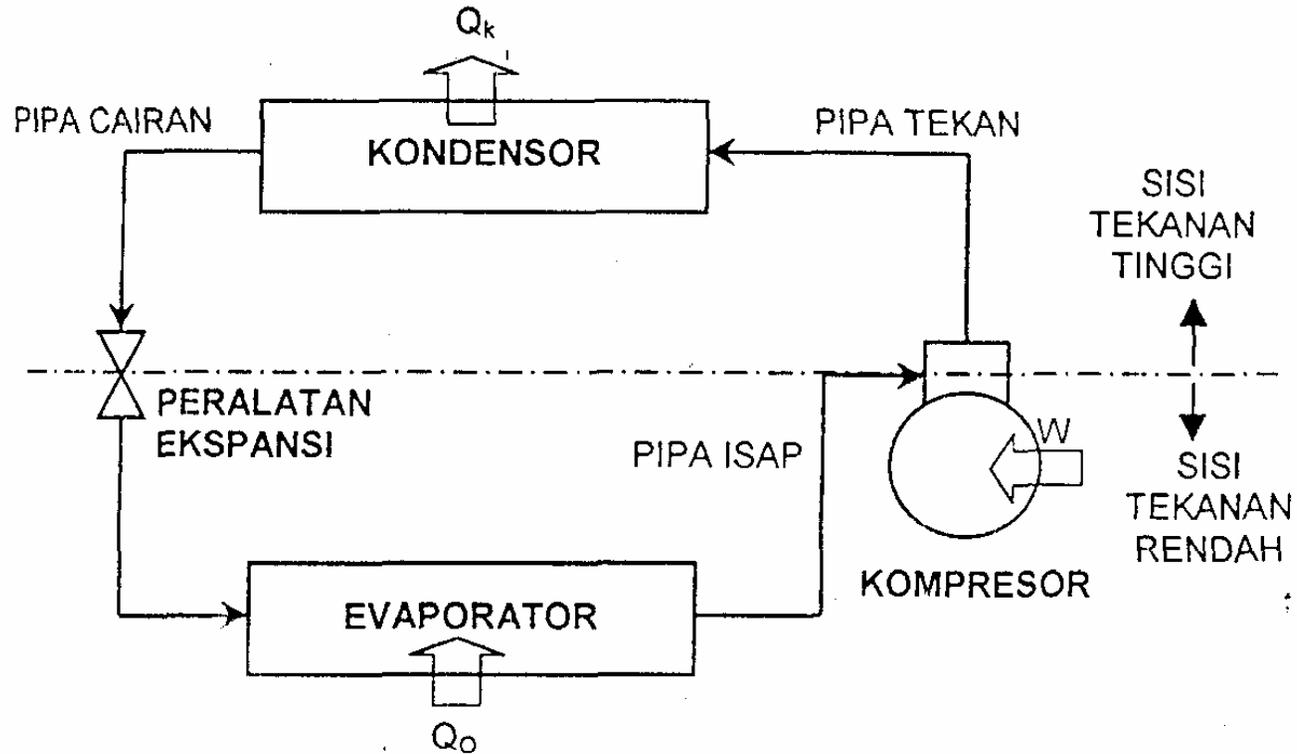
MULTIREFRIGERASI SISTEM



Oleh:

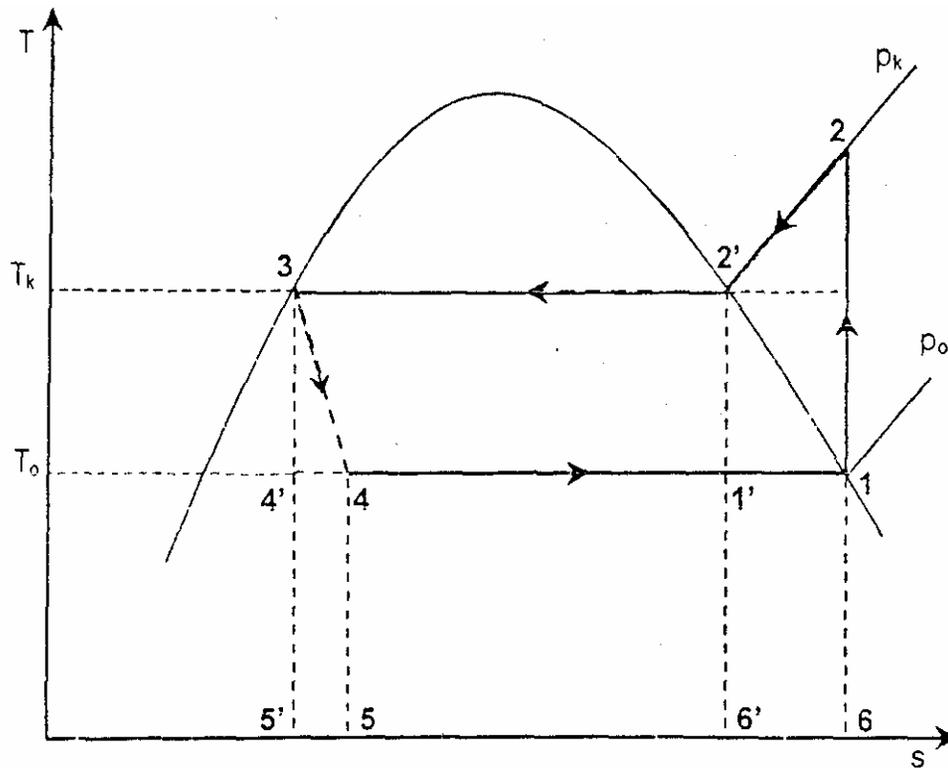
Ega T. Berman, S.Pd., M,Eng

SIKLUS REFRIGERASI

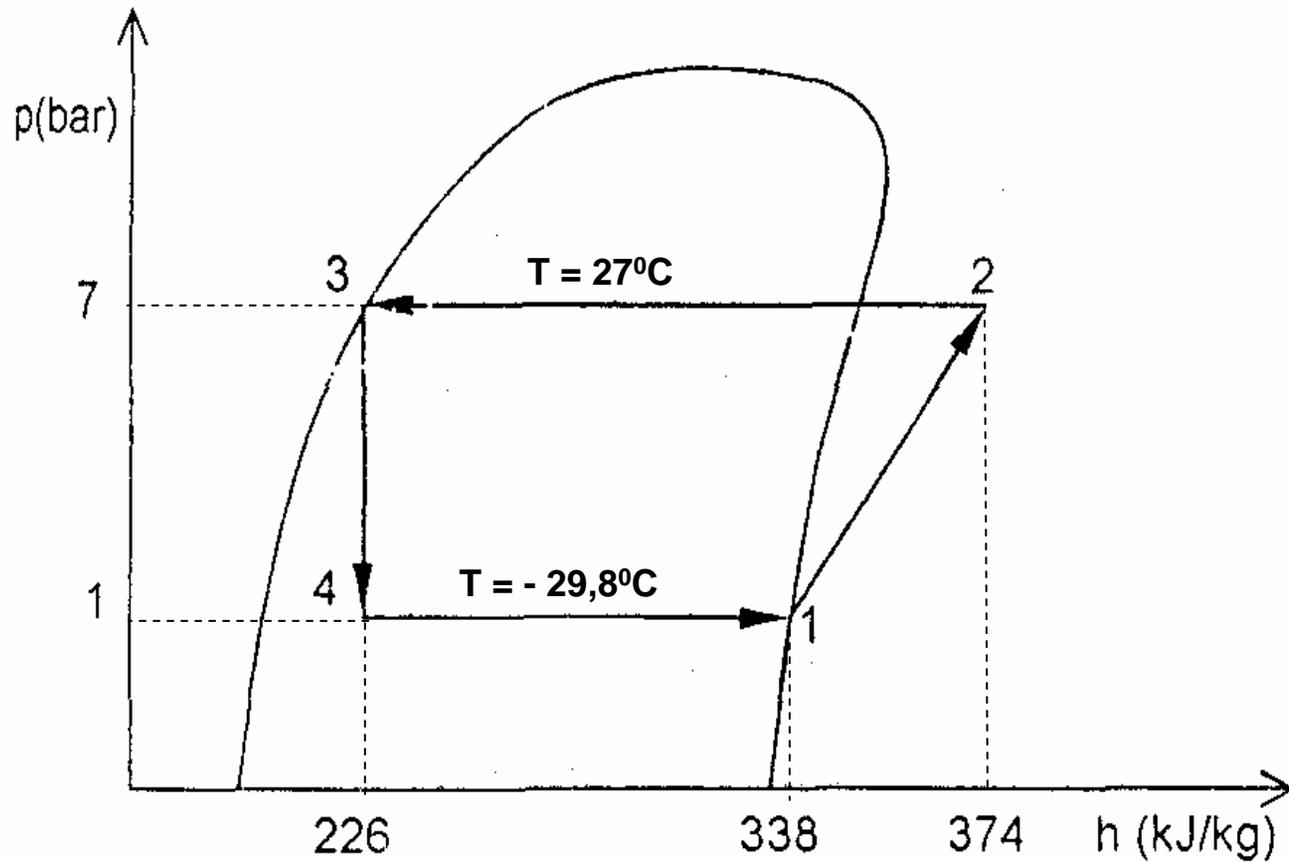


Sistem refrigerasi dengan siklus kompresi uap

- Proses 1 – 2 : Kompresi isentropik
- Proses 2 – 2' : Desuperheating
- Proses 2' – 3 : Kondensasi (pembuangan kalor) isotermis
- Proses 3 – 4 : Ekspansi isentalpik (entalpi konstan)
- Proses 4 – 1 : Evaporasi (penyerapan kalor) isotermis



Siklus kompresi uap dalam diagram T-s



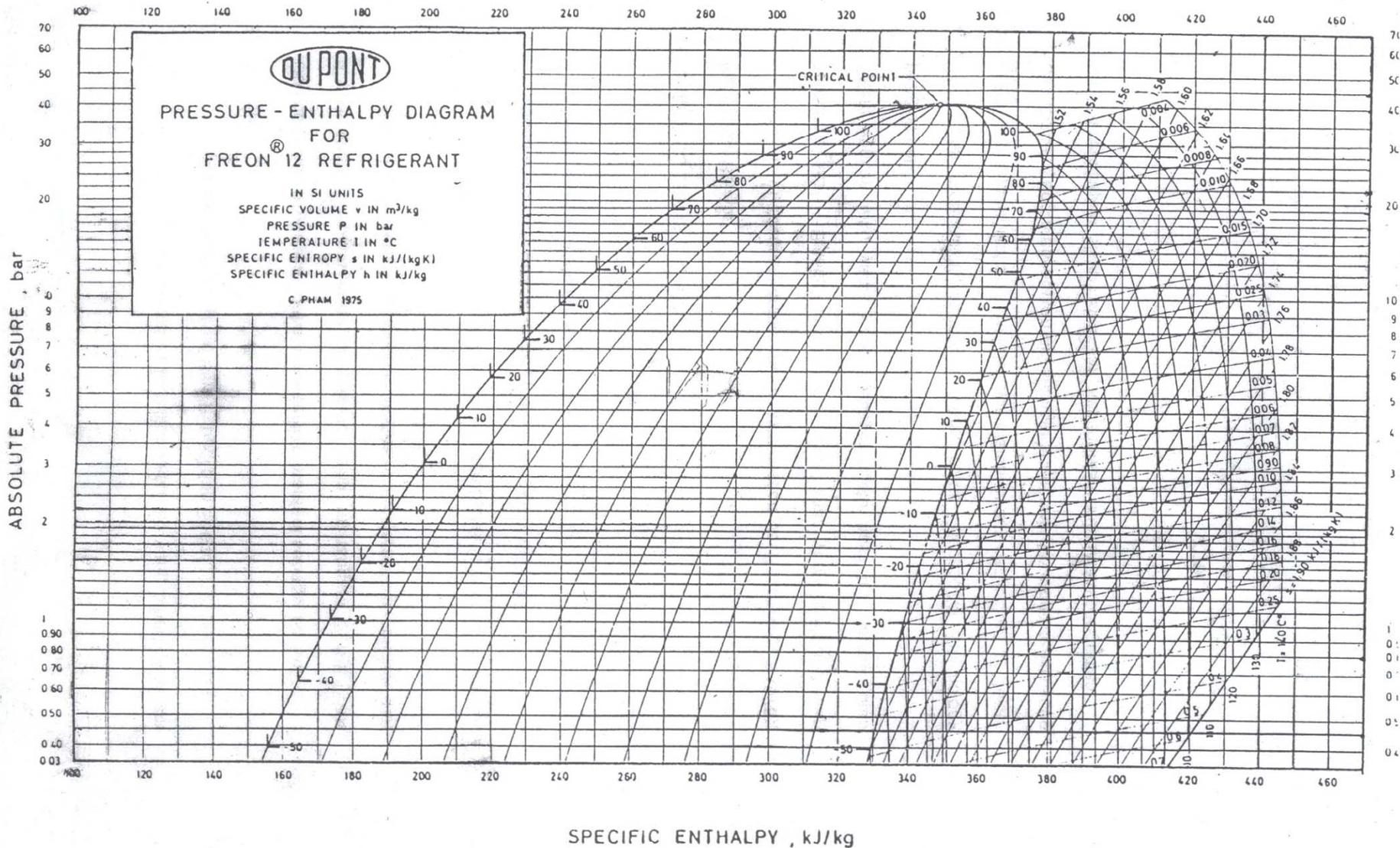
Siklus kompresi uap dalam diagram p-h



PRESSURE - ENTHALPY DIAGRAM FOR FREON[®] 12 REFRIGERANT

IN SI UNITS
SPECIFIC VOLUME v IN m^3/kg
PRESSURE P IN bar
TEMPERATURE T IN $^{\circ}C$
SPECIFIC ENTROPY s IN $kJ/(kgK)$
SPECIFIC ENTHALPY h IN kJ/kg

C. PHAM 1975



Siklus refrigerasi terdiri atas proses-proses:

- Proses 1 – 2 : kompresi adiabatik reversibel (isentropis). Energi kompresi yang diperlukan setiap kg uap adalah $w_k = h_2 - h_1 = 374 - 338 = 36 \text{ kJ/kg}$.
- Proses 2 – 3 : uap mengalami **desuperheating** sampai menjadi uap jenuh kemudian terjadi kondensasi sampai menjadi cair jenuh. Energi kalor yang dilepas selama proses tersebut adalah $q_k = h_2 - h_3 = 374 - 226 = 148 \text{ kJ/kg}$
- Proses 3 – 4 : ekspansi dengan **entalpi konstan**. Tekanan turun dari 7 bar menjadi 1 bar dan temperatur turun dari 27°C menjadi $-29,8^\circ\text{C}$.
- Proses 4 – 1 : penguapan refrigeran pada tekanan 1 bar dan temperatur $-29,8^\circ\text{C}$. Kalor yang diperlukan untuk menguapkan 1 kg refrigeran pada evaporator disebut **efek pendinginan atau efek refrigerasi (RE)**. Efek refrigerasi dalam contoh ini adalah $RE = h_1 - h_4 = 338 - 226 = 112 \text{ kJ/kg}$.

Jika mesin pendingin mempunyai **beban pendinginan** sebesar Q_0 kW, maka jumlah refrigeran yang diperlukan adalah sebesar : $m = Q_0 / RE$ (kg/s).
Beban pendinginan dinyatakan dalam satuan **Ton Refrigerasi (TR)**.

$1 \text{ TR} = 200 \text{ Btu/min.} = 12.000 \text{ Btu/hr.} = 3,5 \text{ kW.}$

$COP = RE / w_k = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1) = 112/36 = 3,1.$

Daya kompresor yang diperlukan adalah $P_{komp} = m \cdot w_k$

Pemilihan temperatur kerja:

- Pemilihan temperatur evaporator (T_0) ditentukan oleh temperatur benda/ruang yang diinginkan.
- Untuk pemakaian tertentu, pemilihan temperatur T_0 akan berpengaruh pada: (1) luas permukaan atau harga penukar kalor, (2) volume aliran fluida yang didinginkan dan energi penggerakannya, (3) COP sistem atau biaya operasi.

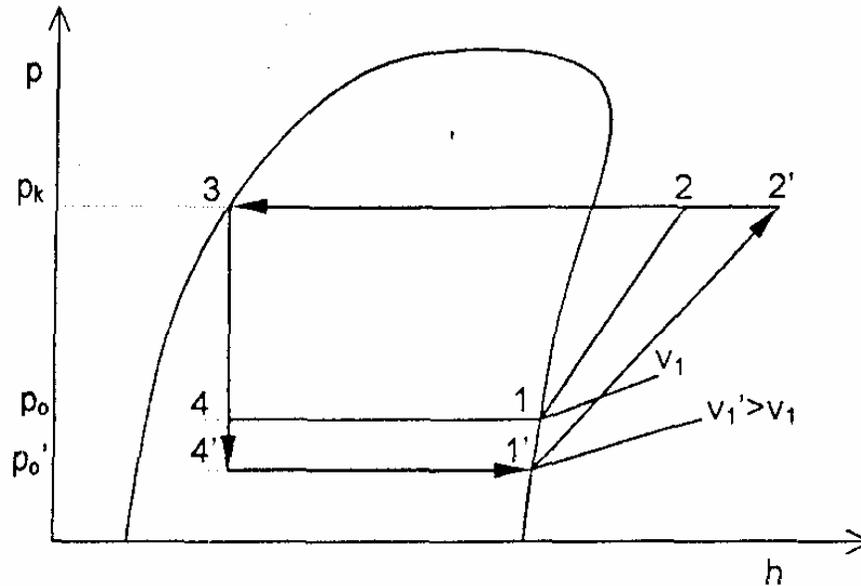
Contoh pemakaian:

Pengkondisian udara	$T_0 = 0 \text{ s.d. } 10 \text{ }^\circ\text{C}$
Cold storage	$T_0 = - 10 \text{ }^\circ\text{C}$
Lemari pendingin	$T_0 = - 15 \text{ }^\circ\text{C}$
Makanan beku	$T_0 = - 35 \text{ }^\circ\text{C}$
Freeze drying	$T_0 = - 35 \text{ s.d. } - 45 \text{ }^\circ\text{C}$

- Pemilihan temperatur kondensator (T_k) ditentukan oleh : (1) jenis media pendingin yang digunakan untuk pelepasan kalor, yaitu air atau udara. (2) Temperatur media pendingin

Pengaruh kondisi operasi terhadap kinerja mesin refrigerasi

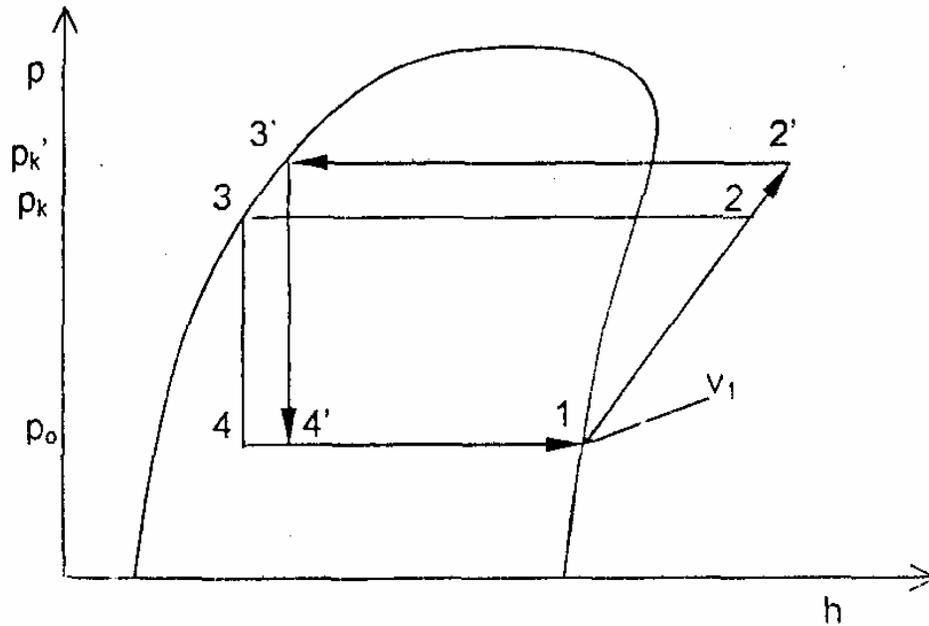
- Pengaruh penurunan tekanan evaporator



Jika tekanan evaporator turun dari P_0 menjadi P_0' , maka:

1. Efek pendinginan berkurang
2. Volume spesifik naik
3. Efisiensi volumetrik naik
4. COP turun

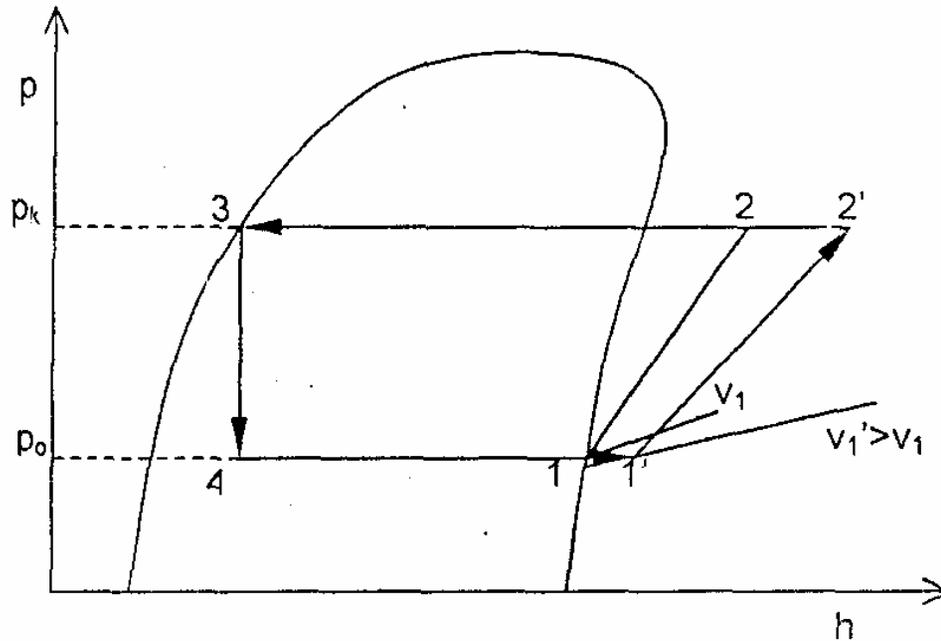
- Pengaruh kenaikan tekanan kondensor



Jika tekanan kondensor naik, maka:

1. Efek pendinginan berkurang
2. Efisiensi volumetrik turun
3. Kerja kompresor bertambah
4. COP turun

- **Pengaruh panas lanjut uap**



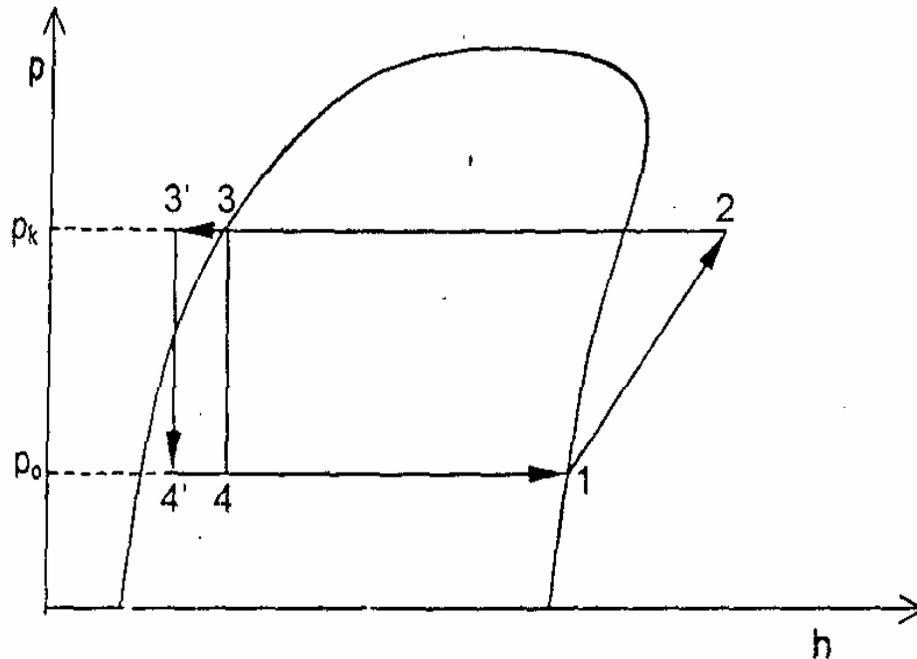
Jika terjadi pemanasan lanjut uap, maka:

- Volume spesifik uap bertambah besar, sehingga Q_0 berkurang
- RE bertambah
- w_k bertambah atau berkurang, bergantung pada T_0 dan jenis refrigeran.

Pemansan lanjut uap dianjurkan dalam praktek untuk menjamin agar kompresor tidak mengisap cairan. Pemanasan lanjut dapat terjadi pada:

1. Evaporator, hal ini akan meningkatkan efek pendinginan
2. Pipa isap di luar evaporator, ada dua kemungkinan : (a) di dalam ruang yang didinginkan, akan membantu penyerapan kalor. (b) di luar ruangan yang didinginkan, tidak menguntungkan.

- Pengaruh pendinginan lanjut cairan (sub-cooling)



Pengaruh sub-cooling:

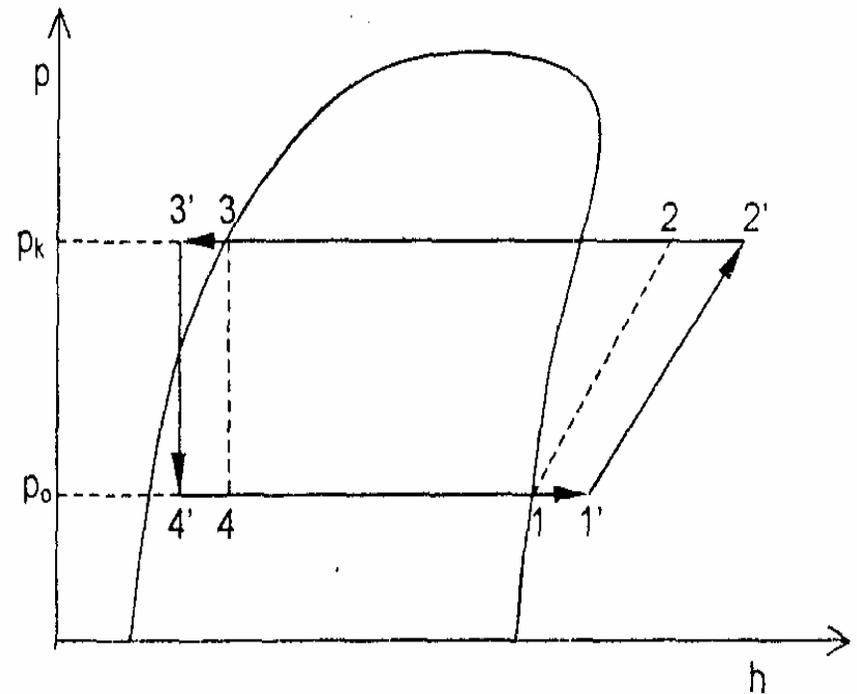
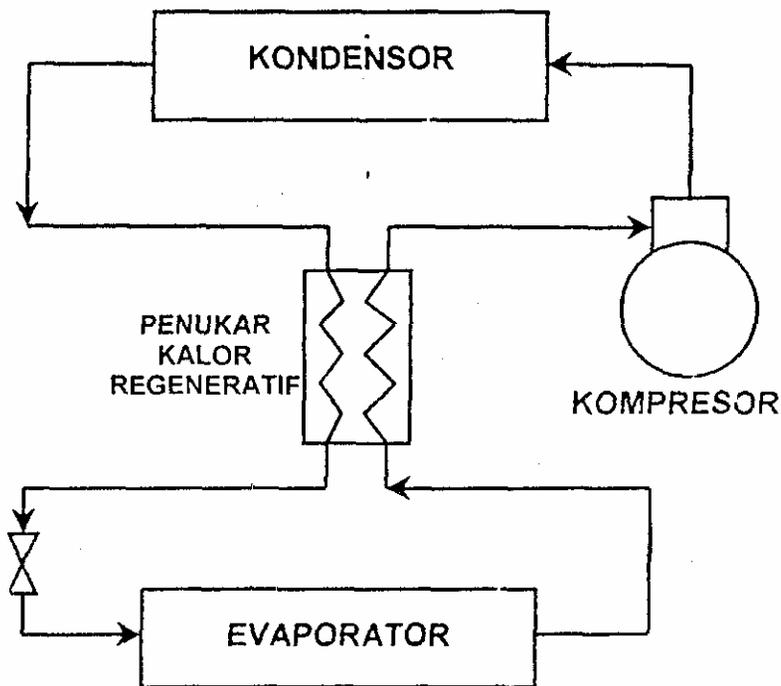
- Mengurangi terbentuknya uap setelah ekspansi
- RE bertambah
- Ukuran dan daya kompresor per TR turun

Pendinginan lanjut dapat dilakukan dengan cara :

1. Memperbesar luas permukaan kondensor
2. Menggunakan subcooler terpisah, yaitu (a) Air pendingin parallel dengan air pendingin kondensor. (b) menggunakan pendingin refrigeran.

Pemakaian penukar kalor regeneratif uap-cairan

Kalor yang dilepas untuk pendinginan lanjut cairan yang keluar dari kondensator digunakan untuk pemanasan lanjut uap yang keluar dari evaporator. Alat penukar kalor dapat dibuat secara khusus atau pipa cair dan pipa isap ditempelkan kemudian diisolasi.

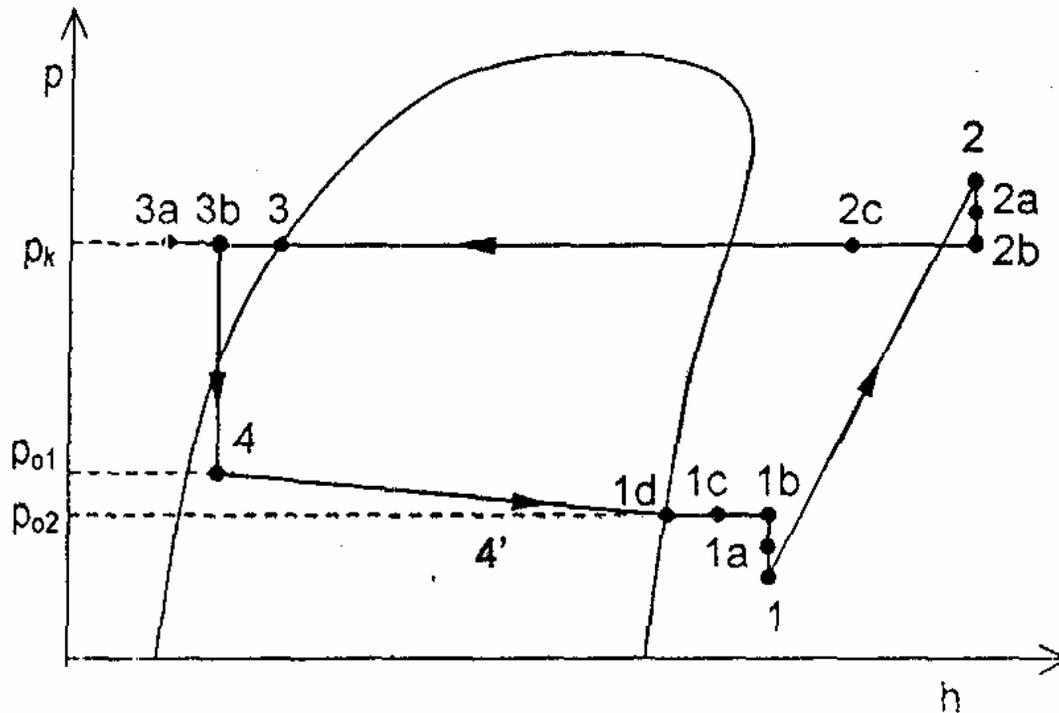


Contoh soal:

Refrigeran R-12 digunakan sebagai fluida kerja pada mesin refrigerasi kompresi uap. Temperatur refrigeran ketika meninggalkan evaporator adalah -20°C dan tekanan kondensor yang terjadi adalah 9 bar. Jika laju aliran massa refrigeran yang mengalir sebesar 3 kg/min, tentukan:

- a. Beban pendinginan (Q_0)
- b. Daya kompresor (P_{komp})
- c. COP

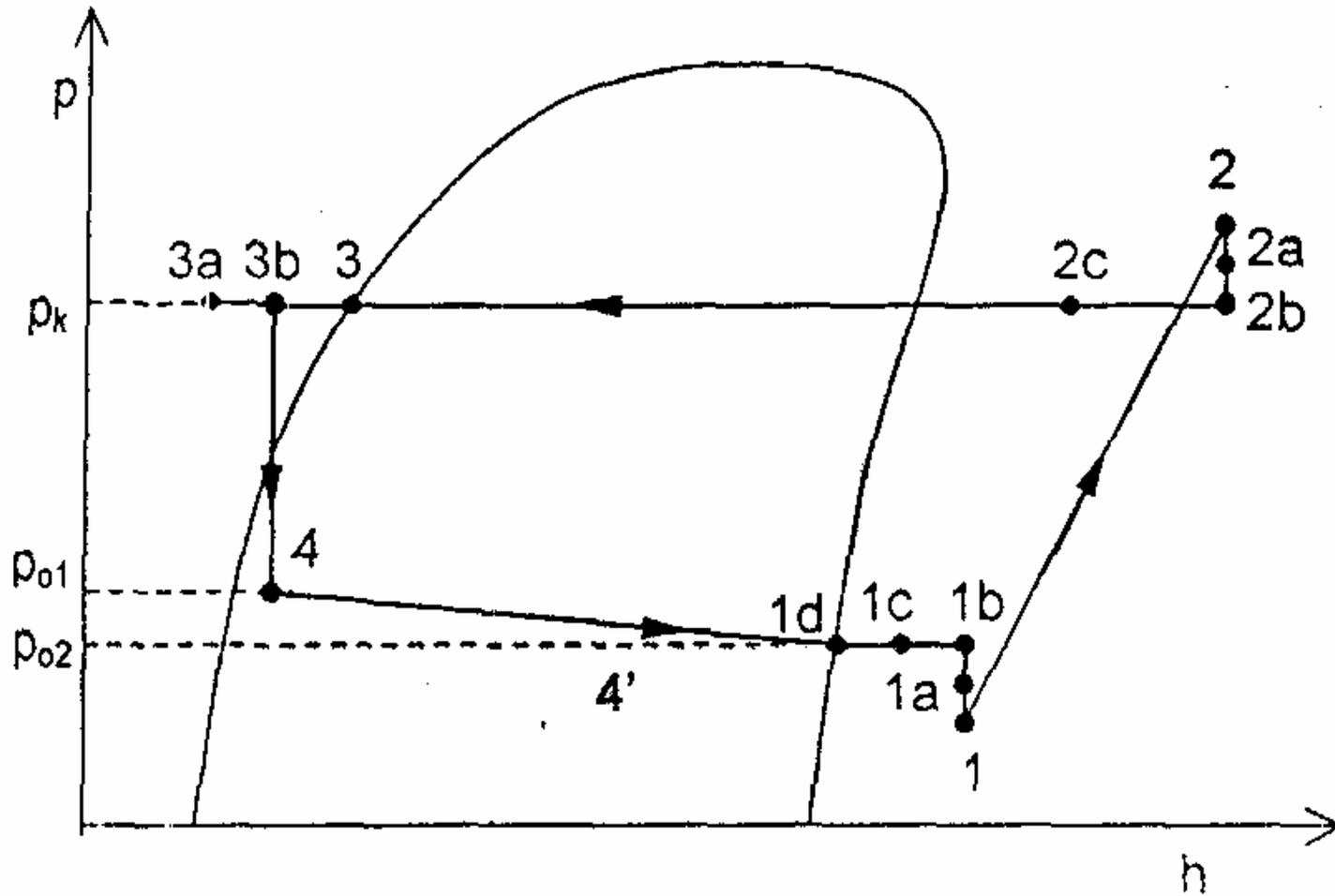
Siklus kompresi uap yang sebenarnya



Penyimpangan terhadap siklus standar terjadi karena :

1. Terdapat penurunan tekanan akibat aliran refrigeran ketika melalui kondensor, evaporator, perpipaan, maupun pada katup-katup kompresor.
2. Terjadi perpindahan kalor dari sistem atau sebaliknya akibat perbedaan antara temperatur di dalam dan di luar sistem.
3. Kompresi berlangsung politropik disertai pelepasan kalor.

Siklus kompresi uap yang sebenarnya



Penyimpangan-penyimpangan terjadi antara lain :

- Pemansan lanjut uap di dalam evaporator, 1d – 1c.
- Pemansan lanjut di dalam pipa isap, 1c – 1b.
- Penurunan tekanan di dalam pipa isap, 1b – 1a.
- Penurunan tekanan pada katup isap kompresor, 1a – 1.
- Proses kompresi berlangsung politropik disertai pelepasan kalor, 1 – 2.
- Penurunan tekanan pada katup tekan kompresor, 2 – 2a.
- Penurunan tekanan pada pipa tekan, 2a – 2b.
- Pendinginan uap pada pipa tekan, 2b – 2c.
- Penurunan tekanan pada kondensor, 2b – 3a.
- Pendinginan lanjut cairan, 3 – 3a.
- Kenaikan temperatur cairan pada pipa cair, 3a – 3b.
- Penurunan tekanan pada evaporator, 4 – 1d.

Contoh soal:

Dalam sebuah mesin refrigerasi refrigeran R-12 masuk ke kompresor sebagai uap panas lanjut pada tekanan 1,4 bar, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan laju aliran massa refrigeran 0,05 kg/s. Refrigeran keluar kompresor pada 8 bar dan $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Refrigeran didinginkan dalam kondensor sampai $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada 7 bar, selanjutnya diekspansikan sampai 1,5 bar. Dengan mengabaikan rugi-rugi kalor dan rugi tekanan dalam pipa sambungan, tentukan :

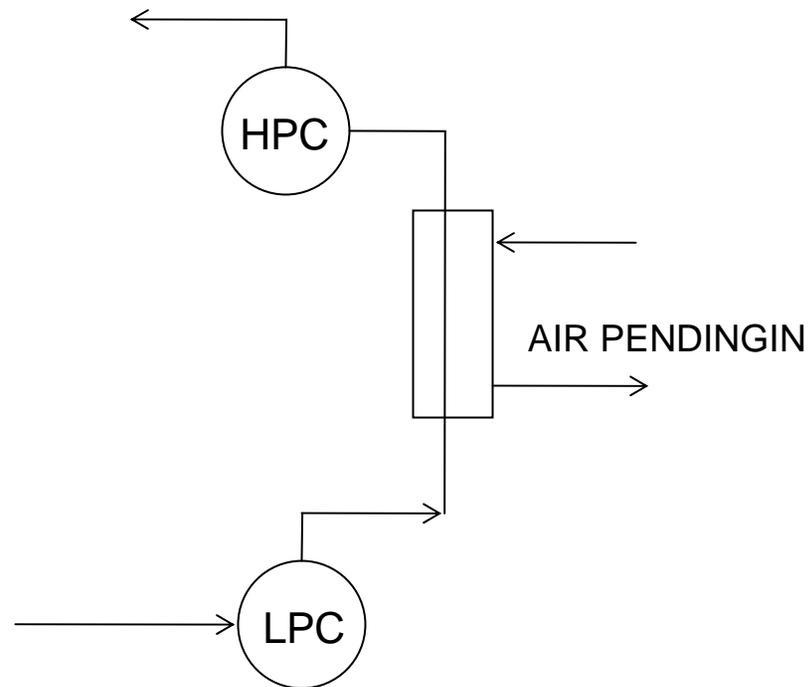
- a. Beban pendinginan (Q_0)
- b. Daya kompresor (P_{komp})
- c. COP mesin refrigerasi

SISTEM TEKANAN GANDA (MULTIPRESSURE SYSTEM)

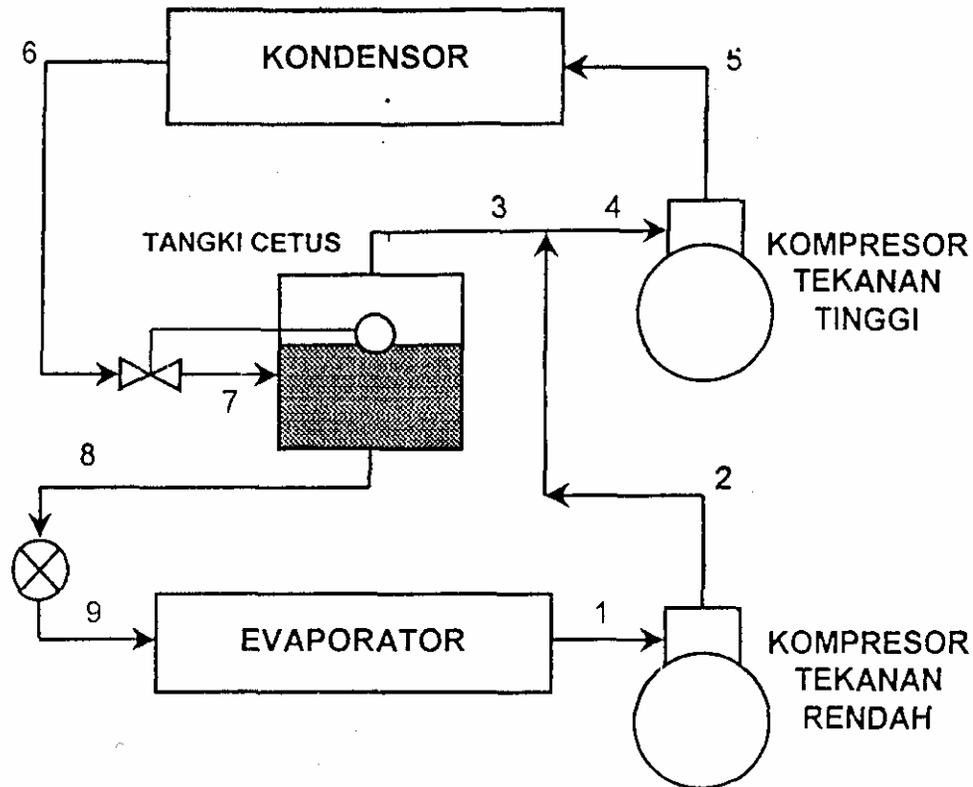
- Diperlukan bila perbandingan tekanan (P_d/P_s) pada kompresor lebih dari 4 atau 5.
- Perbandingan kompresi menjadi tinggi apabila temperatur kerja kondensor tinggi atau temperatur kerja evaporator rendah.
- Perbandingan kompresi tinggi mengakibatkan :
 1. Ekspansi cairan akan menghasilkan uap cukup banyak.
 2. Efek pendinginan yang dihasilkan menjadi lebih kecil.
 3. Perpindahan kalor pada evaporator menjadi kurang efektif.
 4. Efisiensi volumetrik kompresor torak lebih kecil
 5. Daya kompresor besar
 6. COP kecil.

Sistem Pendinginan Uap Antar Tingkat

1. Digunakan sistem pendinginan dengan air (water intercooling).

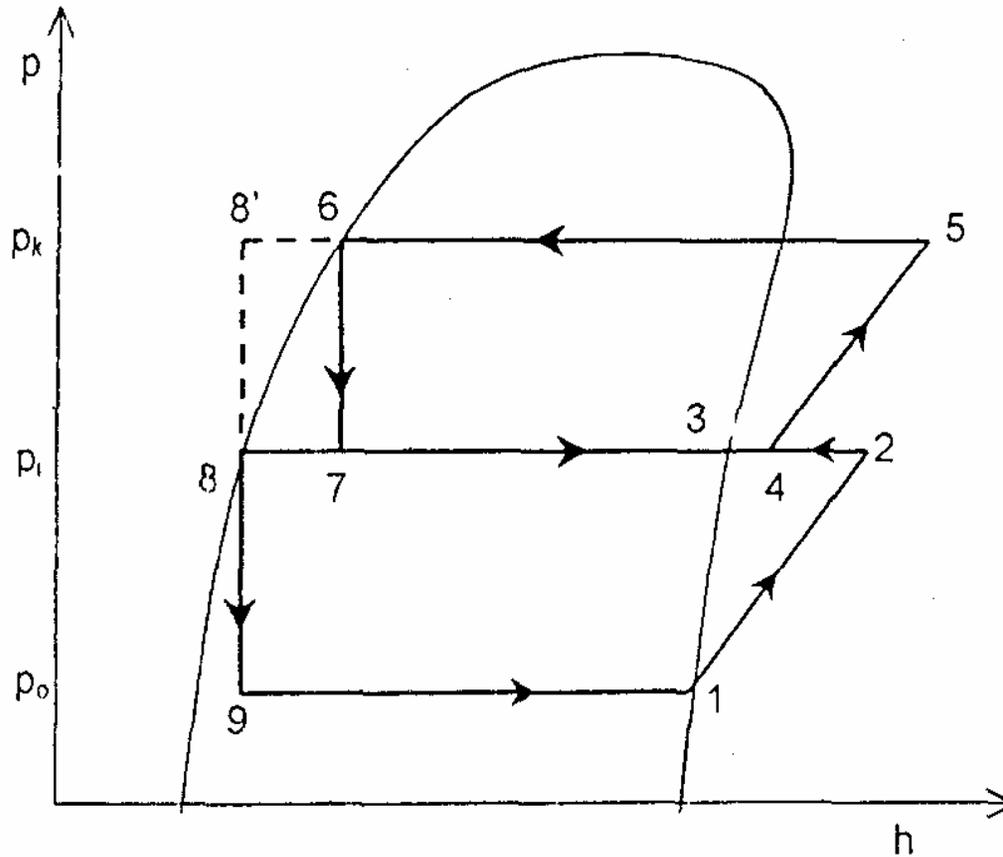


2. Menggunakan tanki cetus (flash tank)

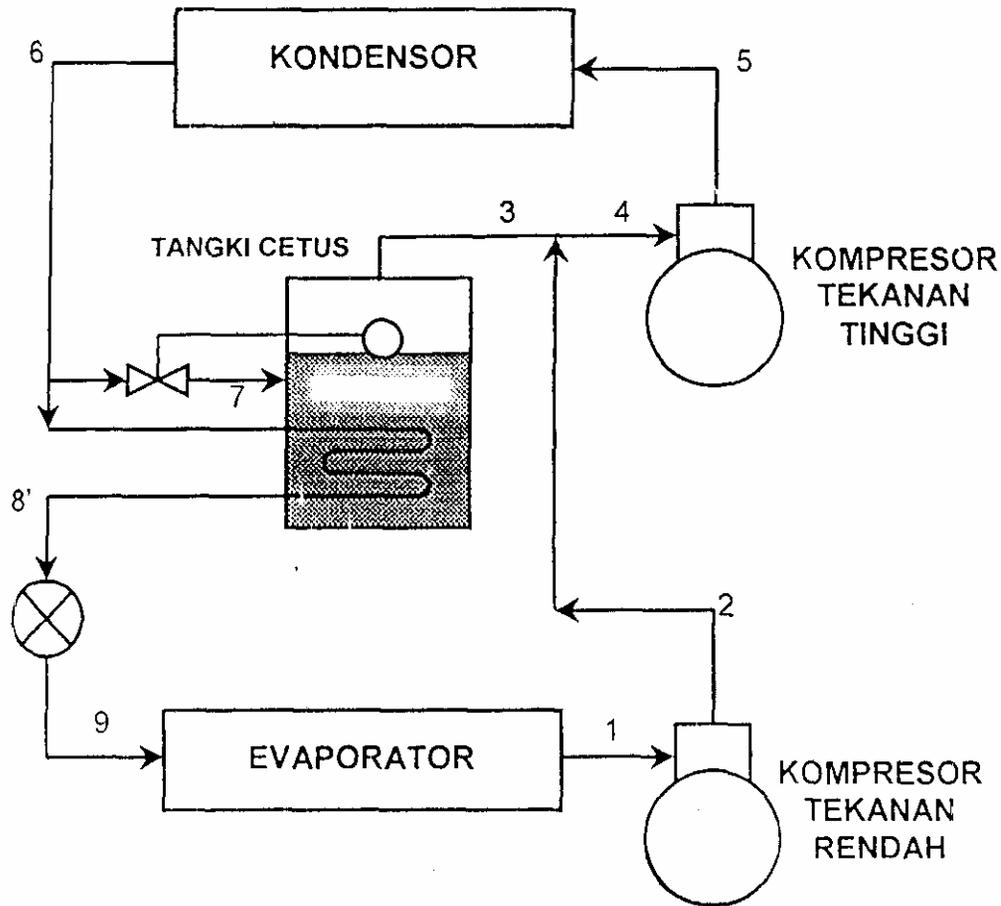


Cairan diekspansikan sampai tekanan tertentu menuju ke tanki cetus yang berfungsi untuk memisahkan antara uap dan cairan. Cairan dari tanki diekspansikan menuju ke evaporator dan uap yang dipisahkan dicampur dengan uap yang berasal dari kompresor tekanan rendah.

Penggunaan tanki cetus sebagai pemisah uap-cairan

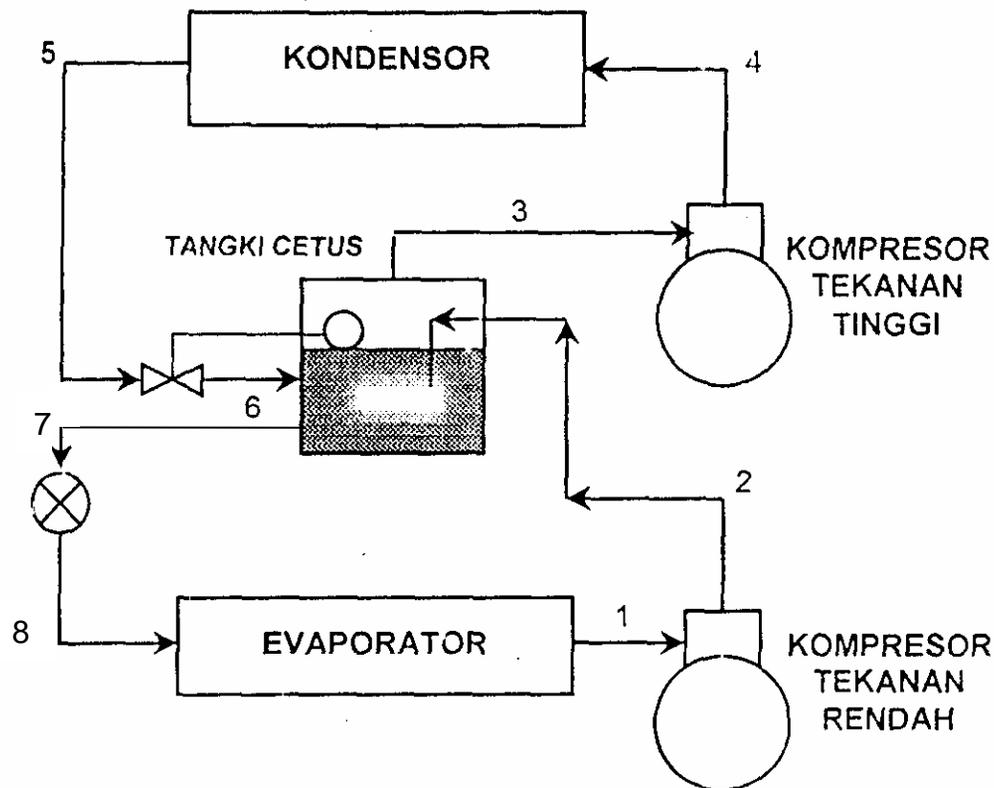


Penggunaan tanki cetus sebagai subcooler cairan

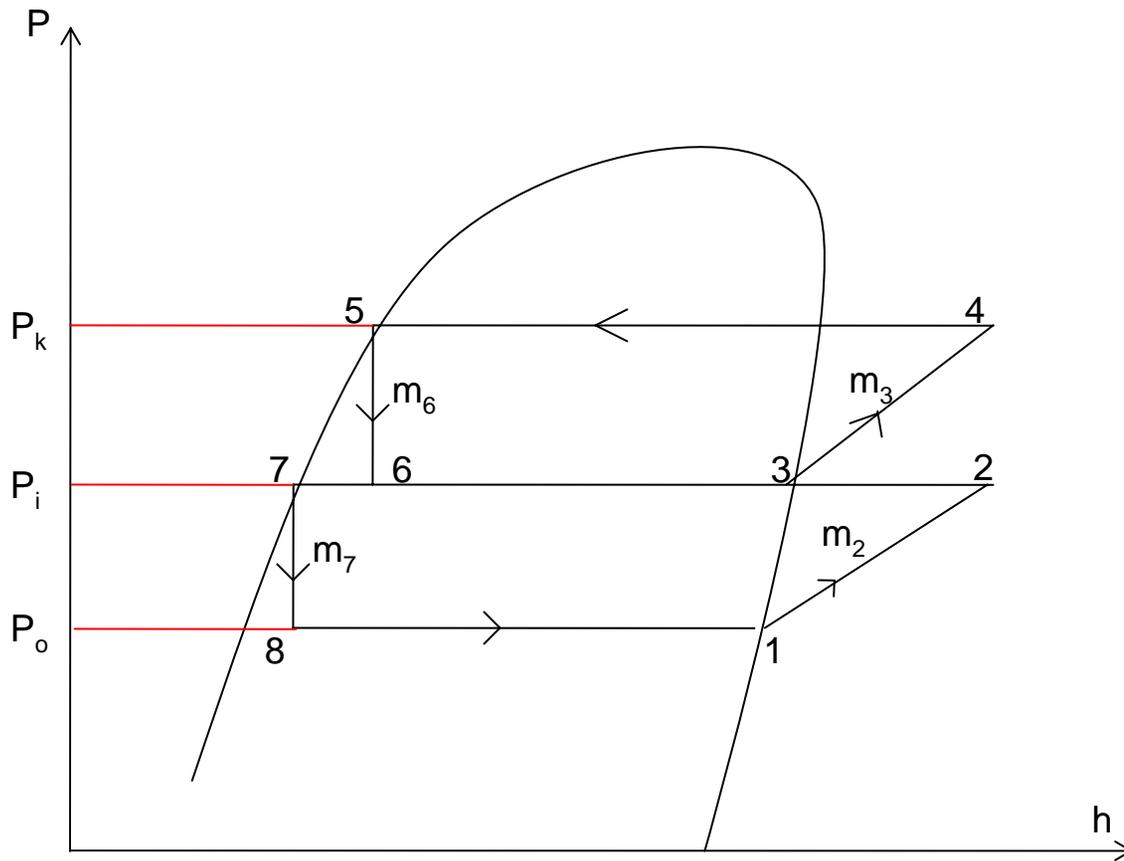


Tanki cetus digunakan sebagai subcooler cairan yang keluar dari kondensor. Pendinginan lanjut cairan di gambarkan dengan proses dari 6 ke 8 dan cairan diekspansikan dari 8 ke 9.

Penggunaan tanki cetus sebagai intercooler



Uap dari kompresor tekanan rendah di masukkan ke flash intercooler sehingga uap didinginkan menjadi uap jenuh. Uap masuk kompresor tekanan tinggi dalam keadaan jenuh dan proses kompresi mengikuti garis isentropis yang lebih tegak. Flash intercooling hanya efektif untuk amoniak karena mempunyai kalor laten tinggi dan garis isentropis yang lebih landai daripada freon.



Tekanan intermediate
(pada intercooler) :

$$P_i = (P_e \cdot P_k)^{0,5}$$

Kesetimbangan energi dan massa pada intercooler:

$$m_2 h_2 + m_6 h_6 = m_7 h_7 + m_3 h_3$$

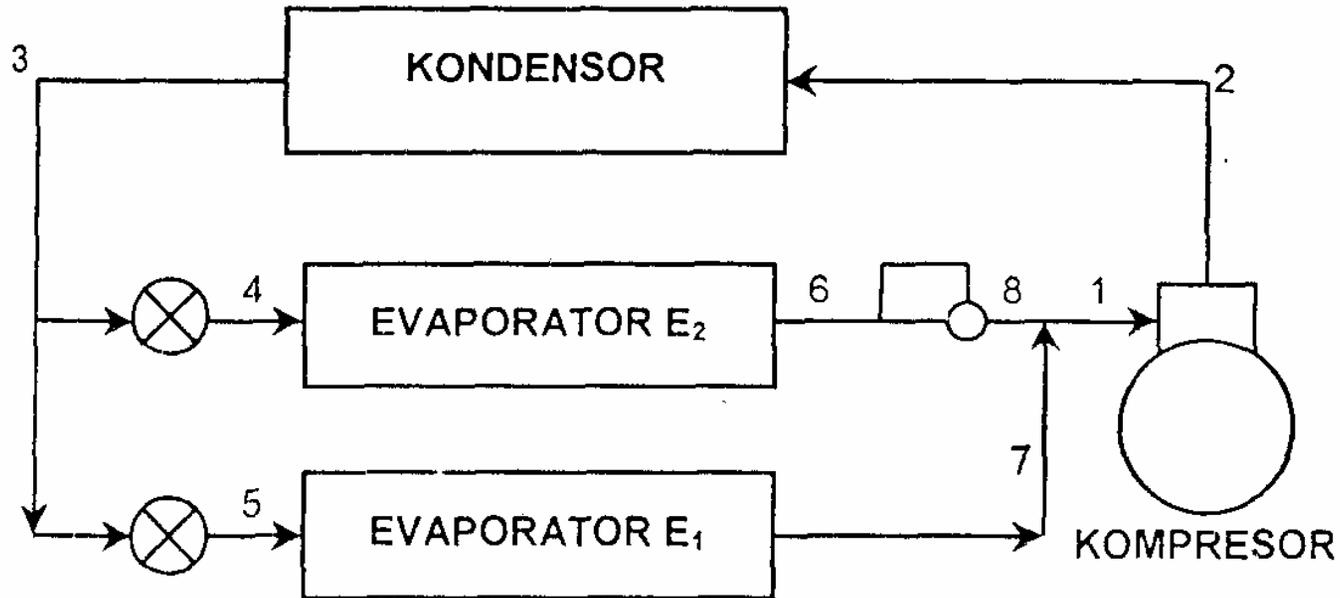
$$m_6 = m_3 \text{ dan } m_7 = m_2$$

Contoh soal:

Sebuah mesin refrigerasi beroperasi berdasarkan siklus ideal dengan dua kompresor (sistem tekanan bertingkat) menggunakan R-12 sebagai refrigeran. Kapasitas pendinginan 250 kW, temperatur evaporator dan kondensor masing-masing $T_o = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $T_k = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Hitung daya yang diperlukan oleh kedua kompresor dan COP mesin tersebut.

MULTI EVAPORATOR

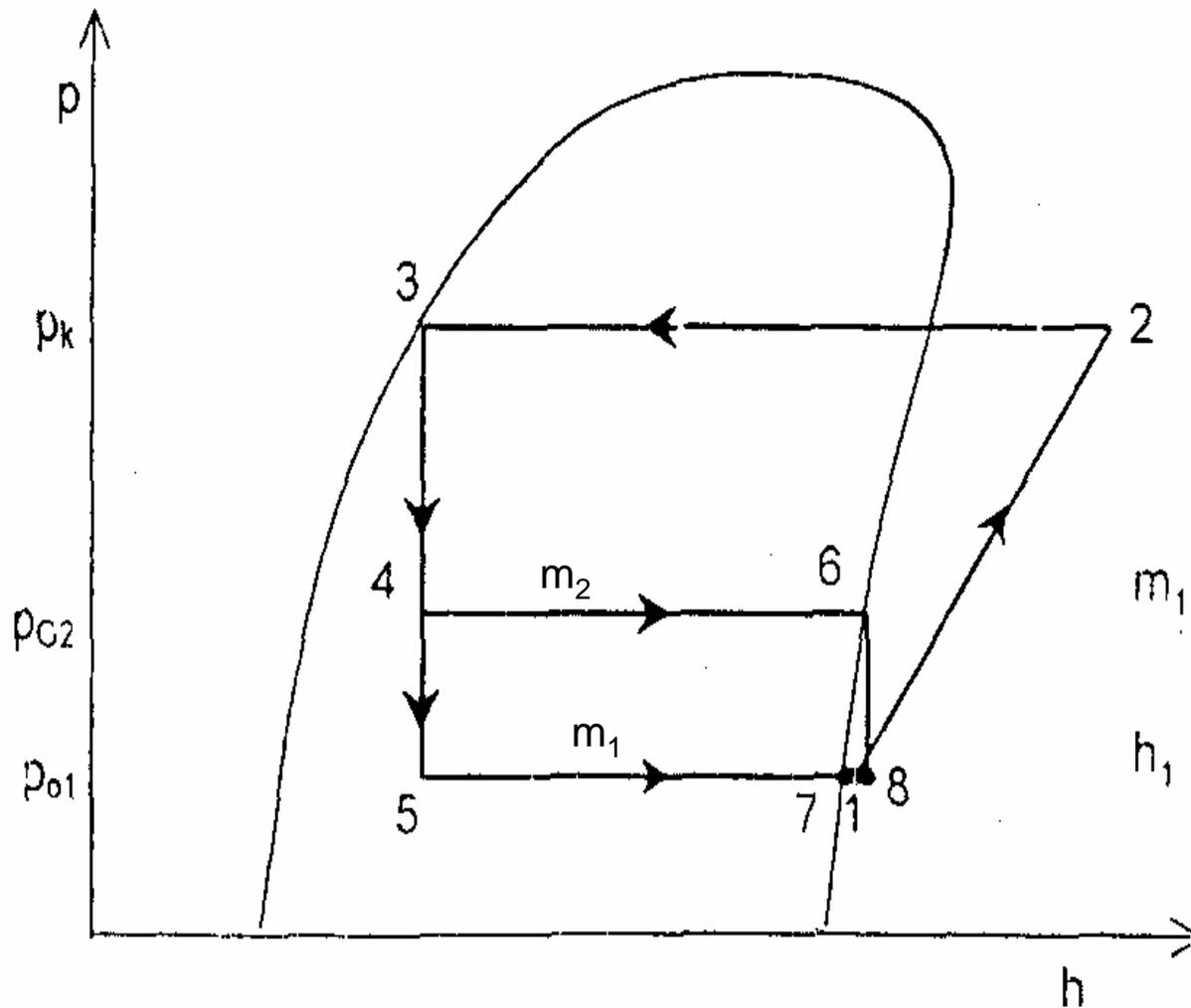


$$P_6 > P_8$$

$$P_7 = P_8$$

$$T_7 \neq T_8$$

Sistem dua evaporator satu kompresor dengan katup ekspansi individual



$$m_1 = \frac{Q_{o1}}{RE_1}; m_2 = \frac{Q_{o2}}{RE_2}$$

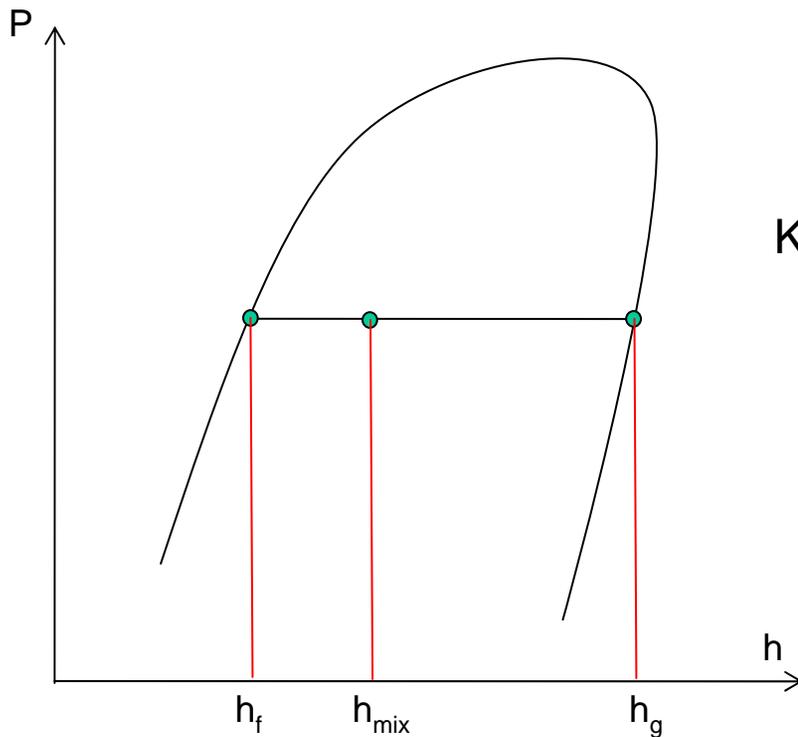
$$h_1 = \frac{m_1 h_7 + m_2 h_6}{m_1 + m_2}$$

Siklus refrigerasi untuk sistem dua evaporator satu kompresor dengan katup ekspansi individual

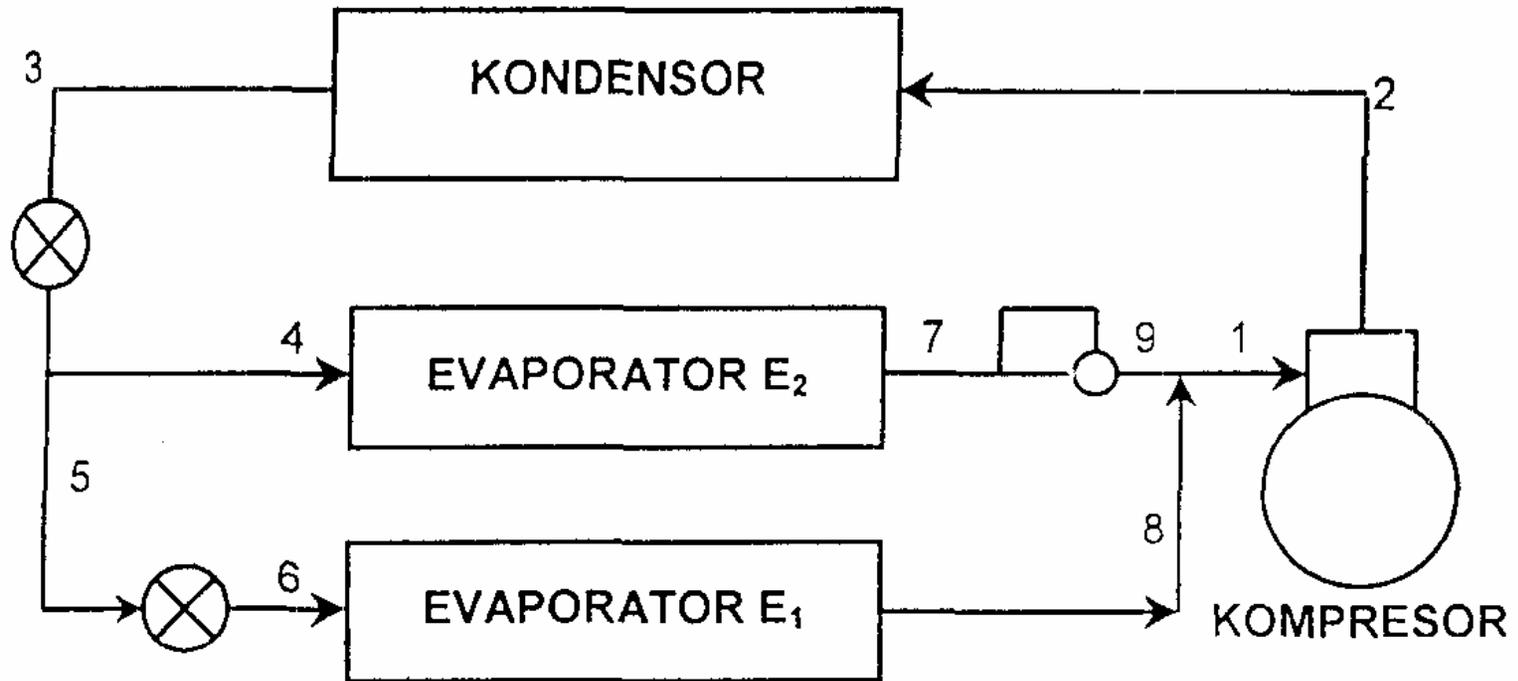
Kerja kompresi: $W_k = (h_2 - h_1)$

Daya kompresor: $P_{\text{komp}} = (m_1 + m_2) \cdot (h_2 - h_1)$

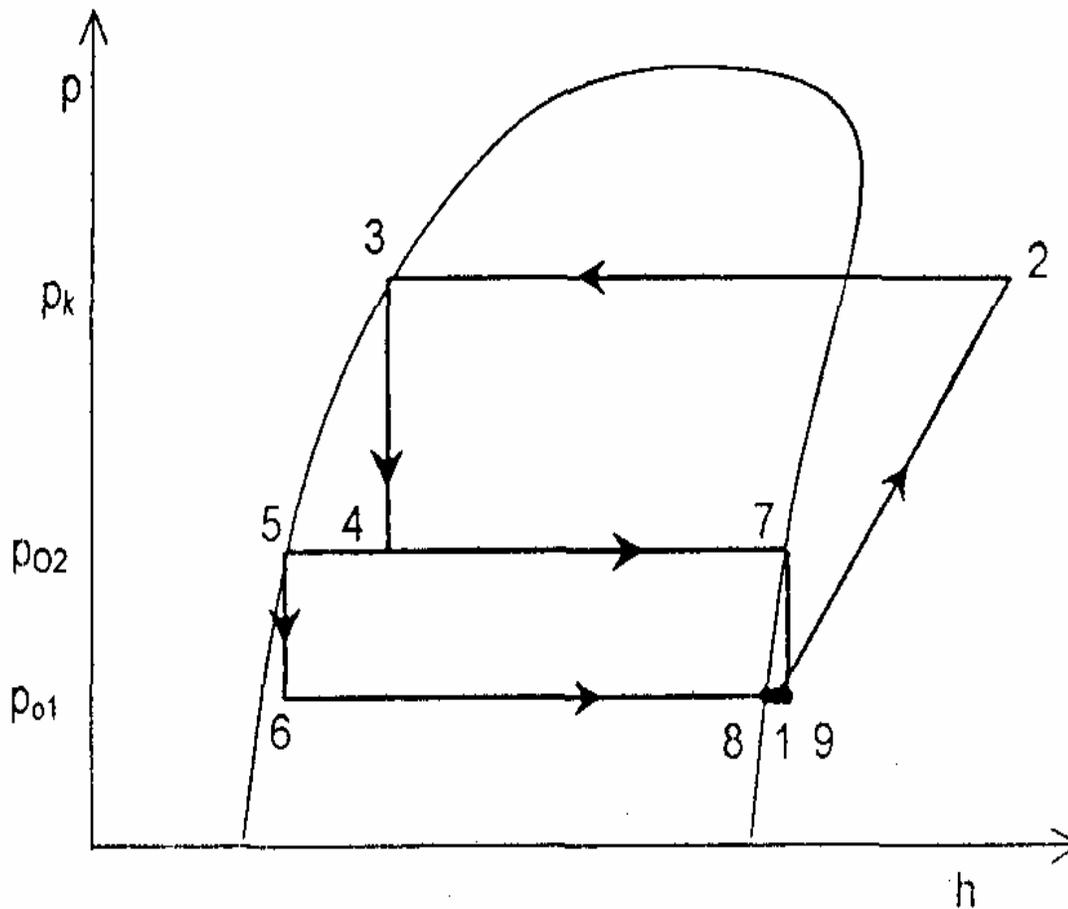
$\text{COP} = (Q_{o1} + Q_{o2}) / P_{\text{komp}} = ((m_1 \cdot RE_1) + (m_2 \cdot RE_2)) / ((h_2 - h_1) \cdot ((m_1 + m_2)))$



Kualitas : $x = (h_{\text{mix}} - h_f) / (h_g - h_f)$



Sistem dua evaporator satu kompresor dengan katup ekspansi bertingkat



Laju aliran massa pada evaporator E_1 :

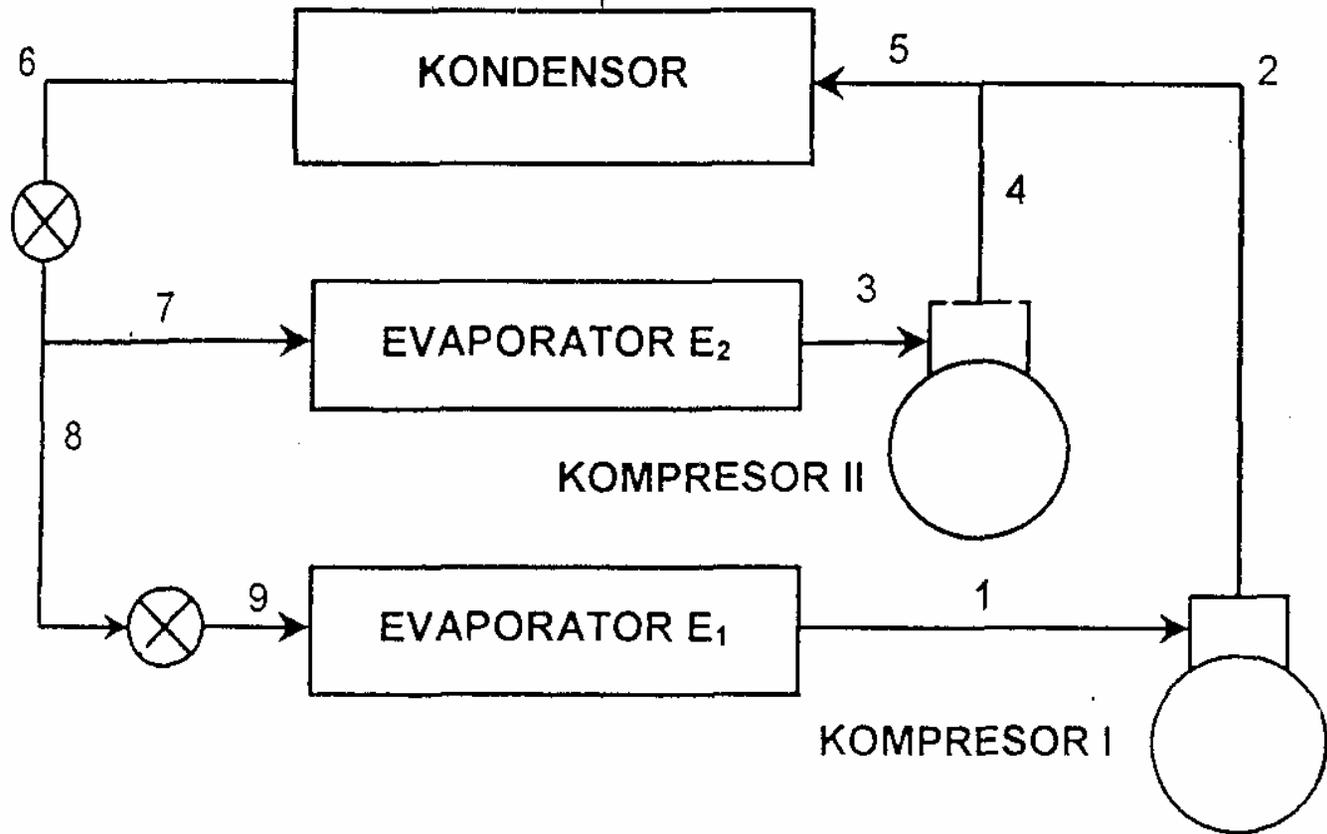
$$m_1 = \frac{Q_{o1}}{RE_1} = \frac{Q_{o1}}{h_8 - h_6}$$

Laju aliran massa pada evaporator E_2 :

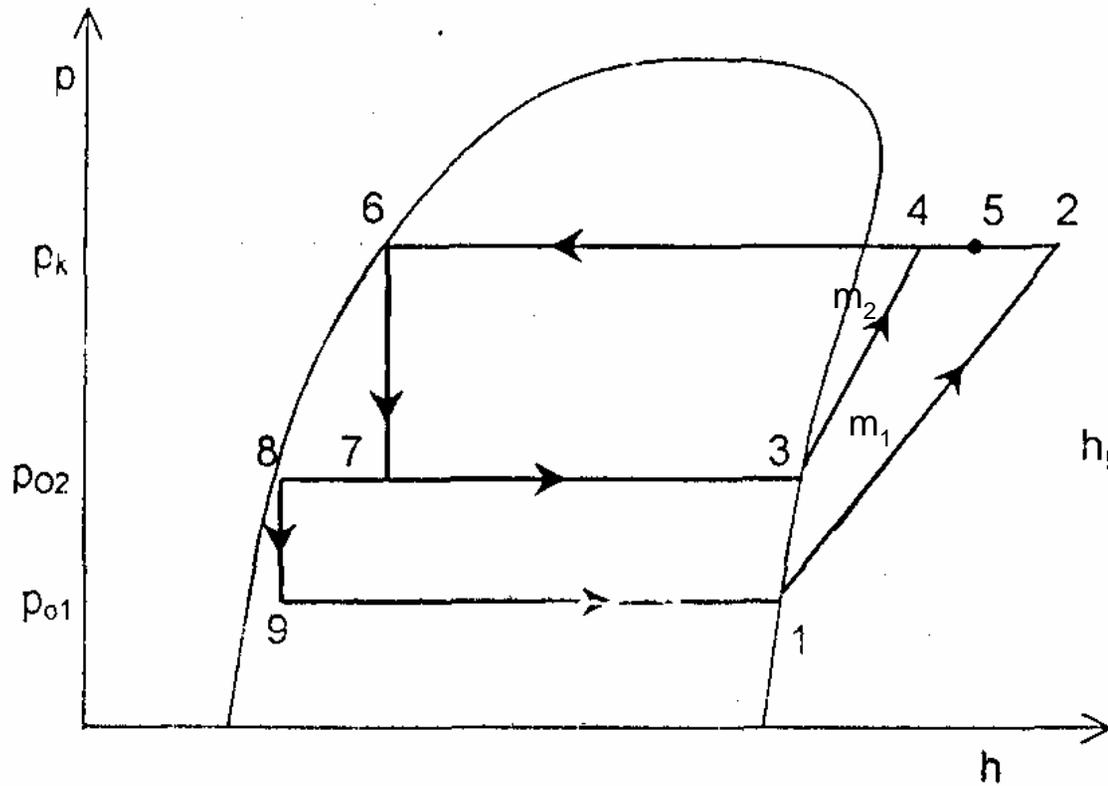
$$m_2 = \frac{Q_{o2}}{RE_2} + m_1 \frac{x_4}{1 - x_4}$$

$$= \frac{Q_{c2}}{h_7 - h_4} + m_1 \frac{x_4}{1 - x_4}$$

Siklus refrigerasi untuk sistem dua evaporator satu kompresor dengan katup ekspansi bertingkat



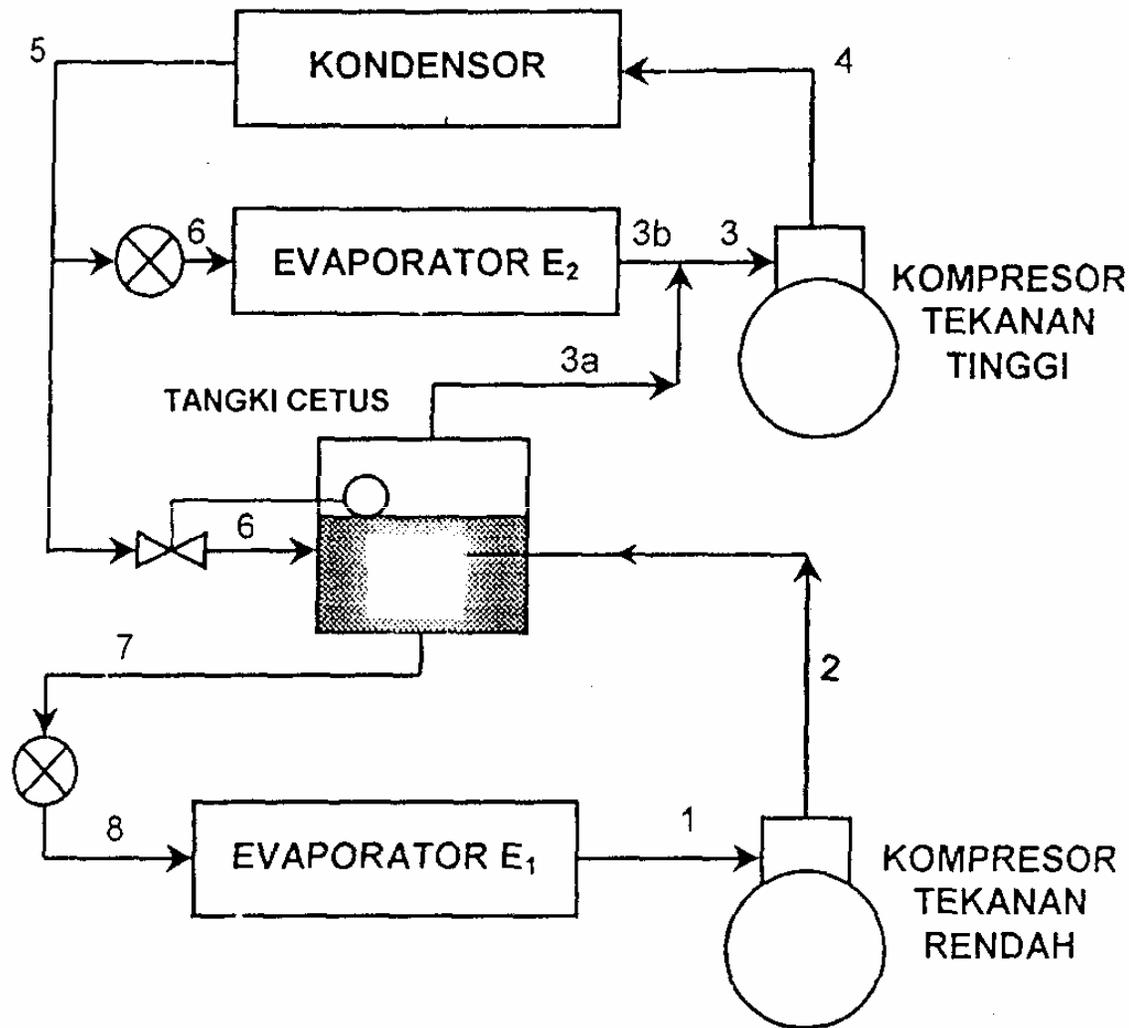
Sistem dua evaporator dengan katup ekspansi bertingkat menggunakan individual kompresor



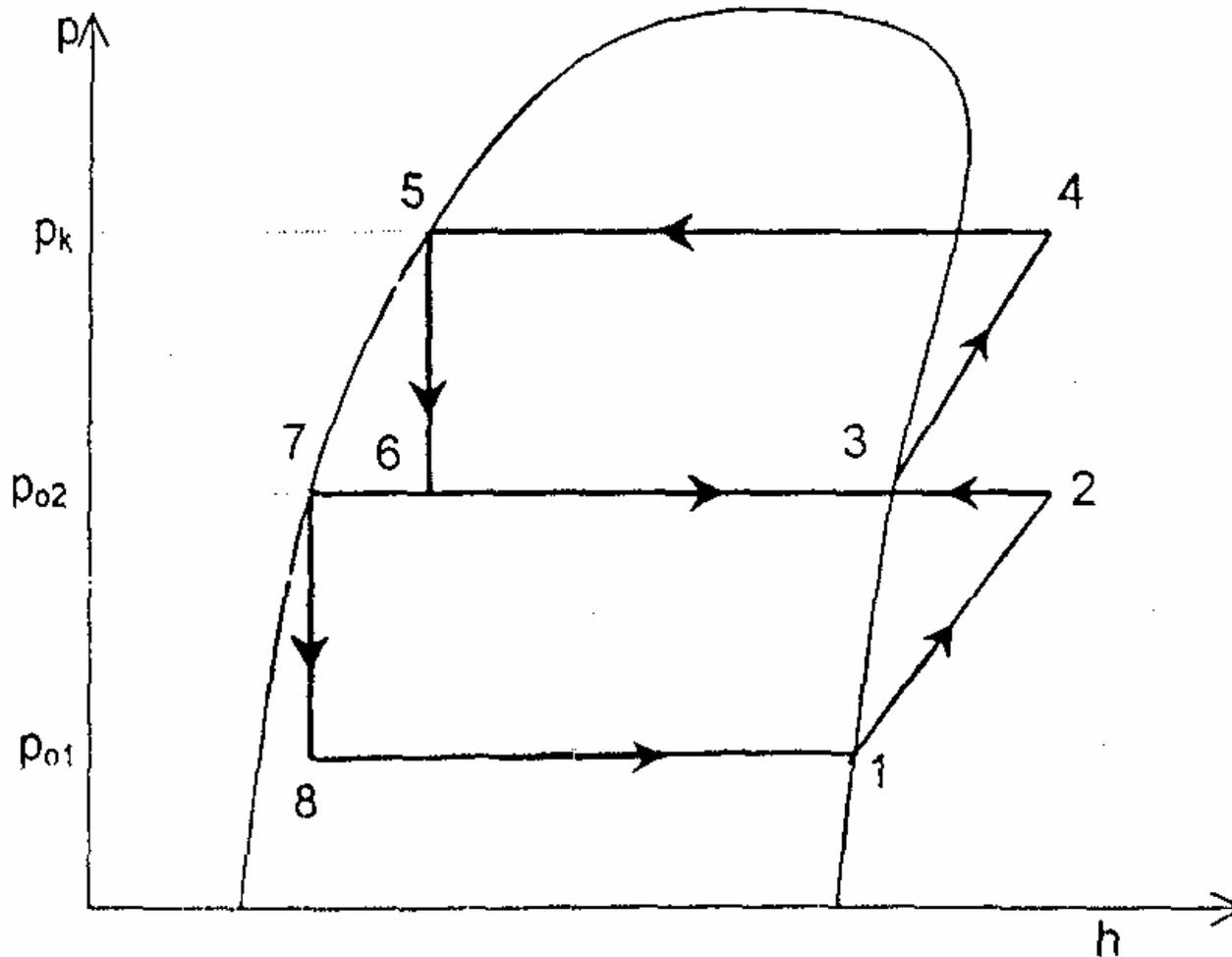
$$h_5 = \frac{m_1 h_2 + m_2 h_4}{m_1 + m_2}$$

Laju aliran massa pada evaporator E₁: $m_1 = \frac{Q_{o1}}{RE_1} = \frac{Q_{o1}}{h_1 - h_9}$

Laju aliran massa pada evaporator E₂: $m_2 = \frac{Q_{o2}}{RE_2} + m_1 \frac{x_7}{1 - x_7}$



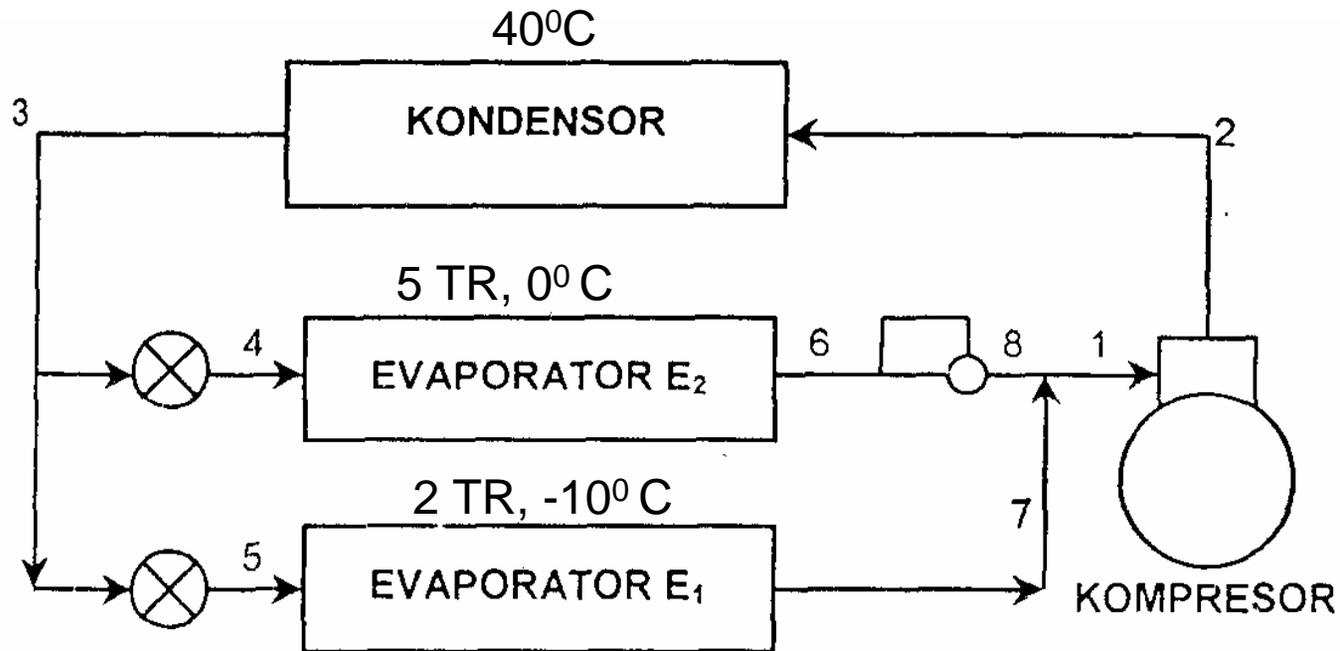
Sistem dua evaporator dengan kompresi bertingkat menggunakan flash intercooler



Siklus termodinamika untuk sistem dua evaporator dengan kompresi bertingkat menggunakan flash intercooler

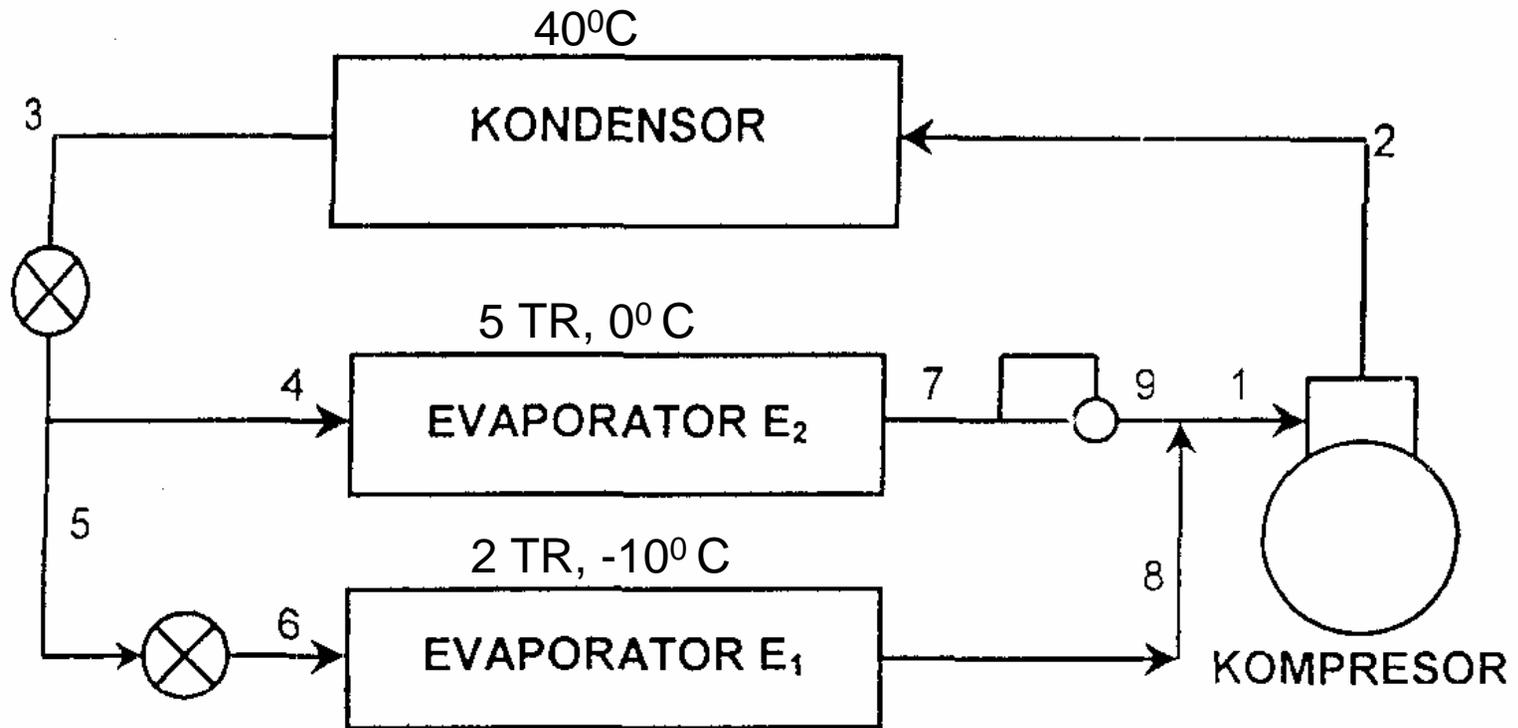
Contoh soal:

1. Tentukan Daya kompresor dan COP !



Contoh soal:

2. Tentukan Daya kompresor dan COP !



Contoh soal:

3. Tentukan Daya kompresor dan COP !

