

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Mesin Refrigerasi

Refrigerasi adalah suatu proses penyerapan panas dari suatu zat atau produk sehingga temperaturnya berada di bawah temperatur lingkungan. Mesin refrigerasi atau disebut juga mesin pendingin adalah mesin yang dapat menimbulkan efek refrigerasi tersebut, sedangkan refrigeran adalah zat yang digunakan sebagai fluida kerja dalam proses penyerapan panas. Secara umum bidang refrigerasi mencakup kisaran temperatur sampai 123 K. Sedangkan proses-proses dan aplikasi teknik yang beroperasi pada kisaran temperatur di bawah 123 K disebut kriogenika (*cryogenics*). Perbedaan ini disebabkan karena adanya fenomena-fenomena khas yang terjadi pada temperatur di bawah 123 K dimana pada kisaran temperatur ini gas-gas seperti nitrogen, oksigen, hidrogen dan helium dapat mencair. (Arora, C. P, 2001)

**Tabel 2.1 Kelompok Aplikasi Mesin Refrigerasi**

Jenis Mesin refrigerasi	Contoh
Refrigerasi Domestik	Lemari es, dispenser air
Refrigerasi Komersial	Pendingin minuman botol, <i>box</i> es krim, lemari pendingin <i>supermarket</i>
Refrigerasi Industri	Pabrik es, <i>cold storage</i> , mesin pendingin untuk industri proses
Refrigerasi transport	<i>Refrigerated truck, train and containers</i>
Pengkondisian udara domestik dan komersial	<i>AC window, split, dan package.</i>
Chiller	<i>Water cooled and air cooled chillers</i>
<i>Mobile Air Conditiong (MAC)</i>	AC mobil

Saat ini aplikasi refrigerasi meliputi bidang yang sangat luas, mulai dari keperluan rumah tangga, pertanian, sampai ke industri gas, petrokimia, perminyakan dsb. Berbagai jenis mesin refrigerasi yang bekerja berdasarkan berbagai proses dan siklus dapat ditemui dalam praktek. Namun demikian yang paling banyak digunakan adalah mesin refrigerasi siklus kompresi uap, termasuk untuk penggunaan kulkas,

AC ruangan dan kendaraan. Berdasarkan aplikasinya mesin refrigerasi dapat dikelompokkan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. (Pasek, A.D., Tandian, N.P., Adriansyah W., 2004).

Proses pengambilan/penyerapan energi tersebut terjadi di evaporator dengan laju perpindahan panas sebesar  $Q_e$ . Sedangkan proses pembuangan energi dalam bentuk panas ke lingkungan terjadi di kondensor dengan laju sebesar  $Q_k$ . (Stoecker, W.F. and Jones, J.W. 1994).

## 2.2 Mesin Refrigerasi Siklus Kompresi Uap

Secara prinsip untuk mendinginkan suatu ruangan atau benda, kita harus mendekati ruang atau benda tersebut dengan suatu permukaan atau fluida yang bertemperatur lebih rendah dari temperatur yang didinginkan. Dengan demikian energi dalam bentuk panas dapat dipindahkan dari ruang/benda ke permukaan /fluida dingin. Apabila diinginkan agar fluida tidak terbuang, fluida harus didaurkan melalui sistem sedemikian rupa, sehingga energi yang diambil dari ruang dingin dapat dibuang keluar/lingkungan. Proses pengambilan energi tersebut terjadi di evaporator dengan laju perpindahan panas sebesar  $Q_e$ . Sedangkan proses pembuangan energi dalam bentuk panas ke sekeliling tersebut akan terjadi di kondensor dengan laju sebesar  $Q_k$ .

Siklus kompresi uap dibedakan antara siklus kompresi uap ideal dan siklus kompresi uap nyata. Pada siklus kompresi uap ideal proses berlangsung di dalamnya dengan kondisi ideal yang tidak akan ditemukan dalam penerapannya, sedangkan siklus kompresi sebenarnya berlangsung pada siklus kompresi uap nyata.

### 2.2.1 Siklus Kompresi Uap Ideal

Secara umum ada dua bagian penting dalam siklus kompresi uap yaitu :

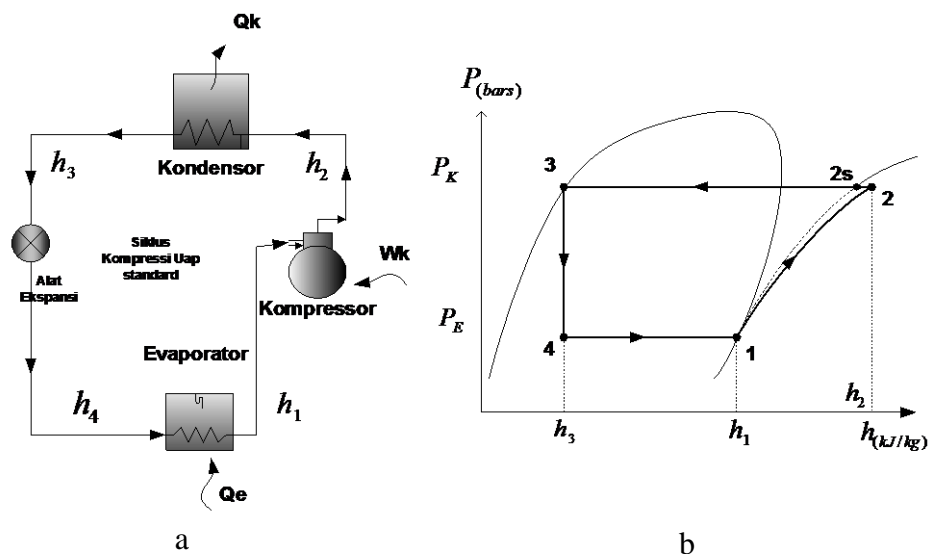
1. Bagian yang bertekanan tinggi mulai dari sisi keluar kompresor hingga sisi masuk katup ekspansi.
2. Bagian yang bertekanan rendah mulai sisi keluar katup ekspansi hingga sisi masuk kompresor.

Sebuah siklus kompresi uap memiliki empat komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator, seperti digambarkan pada gambar 2.1.

Keempat komponen tersebut sekaligus juga mewakili 4 proses termodinamika yang dialami oleh refrigeran pada siklus kompresi uap ideal, yaitu :

1. Proses 1-2 : Kompresi isentropik (adibatik dan reversibel) dari uap jenuh ke tekanan kondensasi.
2. Proses 2-3 : Pelepasan panas reversibel pada tekanan konstan sampai kondisi cair jenuh.
3. Proses 3-4 : Ekspansi irreversibel pada entalpi konstan sampai tekanan evaporasi.
4. Proses 4-1: Pemasukan panas reversibel pada tekanan konstan dari fasa campuran ke tingkat keadaan uap jenuh.

Pada siklus kompresi uap jika pemanfaatannya adalah dari sisi evaporator dimana evaporasi berlangsung pada temperatur rendah (dingin) disebut mesin refrigerasi. Sedangkan jika pemanfaatannya adalah dari sisi kondensor dimana kondensasi berlangsung pada temperatur yang lebih tinggi (panas) disebut mesin pompa kalor. Sehingga penamaan siklus kompresi uap tersebut selalu diikuti oleh fungsi yang dibawakannya.



**Gambar 2.1 Siklus Kompresi Uap Ideal**

Untuk menyatakan unjuk kerja dari suatu siklus kompresi uap, yang ditinjau dampak refrigerasi, laju pelepasan kalor, kerja kompresi, *Coefficient of*

*Performance* (COP) dan *Performance Factor* (PF), yang dapat dijelaskan sebagai berikut (lihat gambar 2.1) :

1. **Dampak Refrigerasi** adalah besarnya panas yang dapat diserap oleh refrigeran persatuan massa. Besarnya dihitung dengan selisih entalpi refrigeran masuk dan keluar kondensor

$$q_e = \frac{Q_E}{m} = h_1 - h_4 \quad (2.1)$$

2. **Kerja Kompresi** adalah kerja yang diterima oleh refrigeran untuk tiap satuan massa refrigeran

$$w_k = \frac{W_k}{m} = h_2 - h_1 \quad (2.2)$$

3. *Coefficient of Performance* (COP) adalah perbandingan dampak refrigerasi dengan kerja kompresor

$$COP = \frac{q_e}{w_k} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (2.3)$$

4. **Dampak pelepasan** adalah jumlah kalor yang dilepaskan refrigeran tiap satuan massa refrigeran

$$q_k = \frac{Q_k}{m} = h_2 - h_3 \quad (2.4)$$

5. **Faktor Prestasi** adalah perbandingan jumlah kalor yang dilepaskan kondensor dengan kerja kompresor

$$PF = \frac{q_k}{w_k} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_1)} \quad (2.5)$$

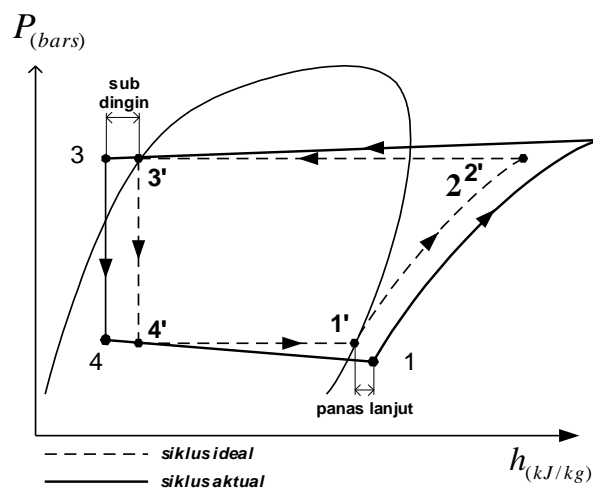
Pada mesin refrigerasi hibrida ,karena kedua sisinya sudah dimanfaatkan maka ditambahkan satu lagi performansi yang menyatakan jumlah total panas yang diserap dan dilepas dibandingkan dengan kerja kompresi , secara matematik dituliskan dengan :

$$TP = \frac{(q_k + q_e)}{w_k} \quad (2.6)$$

Siklus kompresi uap yang diuraikan di atas adalah siklus ideal. Sementara pada prakteknya siklus yang sebenarnya mengalami beberapa penyimpangan dari siklus ideal ini.

### 2.2.2 Siklus Kompresi Uap Nyata

Siklus kompresi uap ideal yang diuraikan di atas tidak mungkin terjadi, sehingga pada siklus kompresi uap nyata terjadi beberapa penyimpangan. Pada kenyataannya siklus kompresi uap mengalami penyimpangan dari kompresi uap ideal. Penyimpangan dari siklus yang sebenarnya ini dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut :



**Gambar 2.2 Diagram P-h siklus kompresi uap ideal dan aktual**

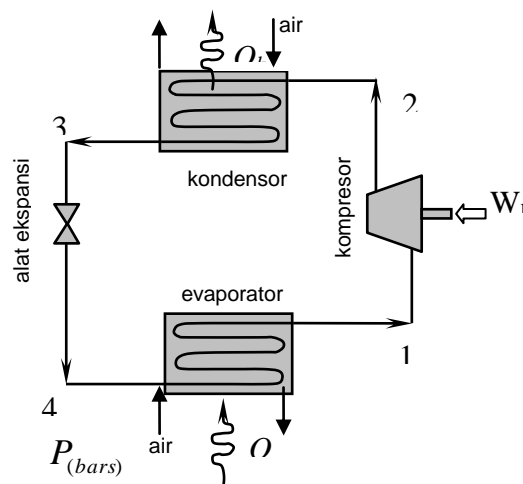
Penyimpangan ini terjadi karena penurunan tekanan di sepanjang pipa kondensor dan evaporator sehingga proses perubahan fasa tidak lagi isobarik. Cairan mengalami proses pembawahdinginan (*sub-cooling*) saat meninggalkan kondensor sebelum memasuki alat ekspansi. Uap refrigeran mengalami proses pemanasan lanjut saat meninggalkan evaporator sebelum memasuki kompresor. Pada saat proses kompresi, terjadi kenaikan entropi (kompresi tak isentropik). Pada katup ekspansi, proses ekspansi berlangsung non-adiabatik.

Penurunan tekanan terutama disebabkan oleh adanya gesekan yang terjadi antara refrigeran dan dinding pipa saluran, sehingga kerja kompresi akan mengalami peningkatan. Pendinginan lanjut di kondensor sebenarnya dianggap menguntungkan karena dapat memastikan fluida yang memasuki katup ekspansi berada dalam fasa

cair dan dapat meningkatkan efek refrigerasi. Pemanasan lanjut dianggap menguntungkan karena dapat memastikan refrigeran yang memasuki kompresor seluruhnya berada pada fasa uap. Pemanasan lanjut dibedakan menjadi pemanasan lanjut internal dan pemanasan lanjut eksternal. Pemanasan lanjut internal merupakan pemanasan lanjut yang terjadi di dalam evaporator, sedangkan pemanasan lanjut eksternal terjadi di luar evaporator. Pada sistem pendinginan, pemanasan lanjut eksternal cenderung berdampak negatif terhadap kinerja sistem yaitu akan mengakibatkan turunnya efek refrigerasi dan koefisien performansi.

### 2.2.3 Mesin Refrigerasi Hibrida

Alasan paling umum digunakan dalam usaha memodifikasi siklus kompresi uap sederhana adalah efisiensi penggunaan energi. Pengembangan mesin kompresi uap ideal dilakukan untuk mendapatkan efisiensi penggunaan energi yang lebih baik sehingga dapat melayani berbagai kebutuhan untuk pendinginan dan pemanasan yang memanfaatkan energi buangan sistem. Berdasarkan keterangan ini, diambil suatu terobosan untuk meningkatkan efisiensi maka kedua sisi dingin dan panasnya dimanfaatkan sekaligus. Siklus kompresi uap seperti ini dikenal sebagai mesin refrigerasi hibrida. Mesin refrigerasi hibrida ini tentu saja memiliki keunggulan dan kekurangan salah satu yang merupakan keunggulannya adalah peningkatan efisiensi penggunaan energi tetapi karena kedua sisinya sudah dimanfaatkan maka perubahan pada suatu sisi diharapkan tidak akan mengganggu proses di sisi yang lainnya, sehingga umumnya dilengkapi dengan penambahan komponen *dummy*.



Gambar 2.3 Siklus Kompresi Uap Ideal dengan Pendingin Air



Pada mesin refrifgerasi hibrida dengan siklus ideal, jika prestasinya ditinjau dari sisi air (gambar 2.3), maka kapasitas pendinginan pada evaporator adalah :

$$Q_e = \dot{m}_{ae} \times C_{P,ae} \times \Delta T_{ae} \quad (2.7)$$

dimana :  $Q_e$  = dampak pendinginan evaporator (Watt)

$\dot{m}_{ae}$  = laju masa air masuk evaporator (kg/s)

$C_{Pae}$  = kalor jenis air (J/(kgK))

$\Delta T_{ae}$  = perbedaan temperatur air di evaporator ( $^{\circ}$ C)

Kapasitas pemanasan pada kondensor :

$$Q_k = \dot{m}_{ak} \times C_{P,ak} \times \Delta T_{ak} \quad (2.8)$$

dimana :  $Q_k$  = dampak pemanasan kondensor (Watt)

$\dot{m}_{ak}$  = laju masa air masuk kondensor (kg/s)

$C_{Pak}$  = kalor jenis air (J/(kgK))

$\Delta T_{ak}$  = perbedaan temperatur air di kondensor ( $^{\circ}$ C)

Daya kompresor :

$$W_k = \eta_m \times V \times I \times \text{Cos}\phi \quad (2.9)$$

dimana :  $W_k$  = daya kompresor (Watt)

$\eta_m$  = efisiensi motor = 0,7

$\text{cos}\phi$  = faktor daya = 0,7

$V$  = tegangan motor listrik (V)

$I$  = arus motor listrik (A)

Untuk mengetahui sampai dimana tingkat keandalan sistem pendingin, dikenal beberapa besaran yang biasa dipakai, yaitu COP (*coefficient of performance*) dan PF (*performance factor*). Koefisien performansi adalah perbandingan antara efek pendinginan yang diperoleh terhadap energi yang digunakan untuk menggerakkan kompresor.

Koefisien performansi pada evaporator utama :

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_k} \quad (2.10)$$

PF atau faktor performansi didefinisikan sebagai perbandingan efek pemanasan di kondensor terhadap energi yang digunakan untuk menggerakkan kompresor.

$$PF = \frac{Q_k}{W_k} \quad (2.11)$$

Di samping kedua parameter di atas (COP dan PF), untuk mesin refrigerasi kompresi uap hibrida dikenalkan parameter baru yaitu total performansi (TP). Total performansi didefinisikan sebagai perbandingan antara dampak pendinginan ditambah dampak pemanasan terhadap daya yang dibutuhkan kompresor.

### 2.3 REFRIGERAN

Refrigeran adalah fluida kerja yang digunakan untuk memindahkan panas di dalam siklus refrigerasi. Berdasarkan fungsinya selama refrigeran dibagi menjadi dua jenis yaitu *refrigeran primer* yang digunakan dalam siklus kompresi uap dan *refrigeran sekunder* yang digunakan untuk membawa kalor bertemperatur rendah. Pada sistem kompresi uap, refrigeran menyerap kalor dari suatu ruang melalui proses evaporasi dan membuang kalor ke ruang lain melalui proses kondensasi.

Sifat-sifat yang dipertimbangkan dalam memilih refrigeran, adalah: *sifat kimia, sifat fisik dan sifat termodinamik*. Berdasarkan sifat-sifat kimianya refrigeran yang baik : tidak beracun, tidak bereaksi dengan komponen refrigerasi, dan tidak mudah terbakar, serta tidak berpotensi menimbulkan pemanasan global (GWP rendah (*Global Warming Potential*)) dan tidak merusak lapisan ozon (ODP rendah (*Ozone Depleting Potential*)). Hal ini diperlukan agar kelestarian lingkungan terjaga, karena lapisan ozon di stratosfir berfungsi melindungi bumi dari radiasi sinar ultra violet yang berbahaya (antara lain dapat menimbulkan kanker kulit, dapat membunuh phytoplankton yang merupakan bagian dari rantai kehidupan laut). Berdasarkan sifat fisik dan termodinamiknya refrigeran yang baik mampu menghasilkan kapasitas refrigerasi per satuan daya kompresi yang tinggi.



### 2.3.1 Refrigeran Alternatif untuk R-22

Hidrokarbon (HC) merupakan salah satu refrigeran alternatif pengganti R-22. Refrigeran HC tidak berpotensi merusak ozon karena ODP = 0 dan GWP yang kecil. Refrigeran HC juga tidak mengalami reaksi kimia dengan oli pelumas yang digunakan untuk refrigeran R-22.

**Tabel 2.2 Refrigeran alternatif sebagai pengganti R-22**

Parameter	Refrigeran			
	R-22	R-12	Propana	Iso-butana
Rumus kimia	CHClF <sub>2</sub>	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Temperatur kritis [°C]	97	111,8	97,0	135,1
Titik didih pada 1 atm [°C]	-41,4	-26,8	-41,9	-11,6
Massa jenis				
- uap jenuh pada 0°C [kg/m <sup>3</sup> ]	21,2	18,2	10,39	4,56
- cair jenuh pada 45°C [kg/m <sup>3</sup> ]	1108	1232	459	525
Kapasitas Panas Spesifik				
- uap jenuh pada 0°C [kJ/kgK]	0,614	0,642	1,85	1,61
- cair jenuh pada 45°C [kJ/kgK]	1,46	1,02	2,8	2,58
Konduktifitas Termal				
- uap jenuh pada 0°C [mW/mK]	9,4	8,3	15,6	12,98
- cair jenuh pada 45°C [mW/mK]	63,4	60,7	83,7	82,4
ODP	0,06	1	0	0
GWP	1700	7300	3	3

Pada Tabel 2.2 ditampilkan beberapa jenis refrigeran yaitu : R-22, R-12, propana dan isobutana. Kelemahan utama R-22, karena potensi perusakan ozon dan pemanasan globalnya relatif tinggi dari ke tiga jenis refrigeran lainnya. Berbeda dengan refrigeran hidrokarbon untuk mesin yang sebelumnya menggunakan refrigeran R-22 maka refrigeran hidrokarbon dapat langsung menggantikannya tanpa melakukan penggantian komponen.

Berdasarkan uraian di atas, maka refrigeran yang baik pengganti R-22 adalah hidrokarbon. Kelemahan hidrokarbon yang menonjol adalah mudah terbakar, namun hal ini tidak terlalu mengkhawatirkan jika prosedur keamanan penggunaan hidrokarbon diterapkan dengan baik serta telah diakui dan diatur oleh berbagai

standar internasional yaitu : BS4434:1995(Inggris) , AS/NZ 1677:1998 (Australia / New Zeland) dan DIN 7003 (Jerman ).

### 2.3.2 Hidrokarbon Sebagai Refrigeran

Beberapa kelebihan yang dimiliki refrigeran hidrokarbon, campuran propana-butana-isobutana, sebagai refrigeran alternatif pengganti R-22, yaitu :

1. Pengganti langsung (*drop in substitute*) tanpa penggantian komponen.
2. Ramah lingkungan, potensi kerusakan ozon nol (non-ODP) dan potensi pemanasan global dapat diabaikan (non-GWP).
3. Hidrokarbon, gas alam yang mudah didapat di Indonesia.

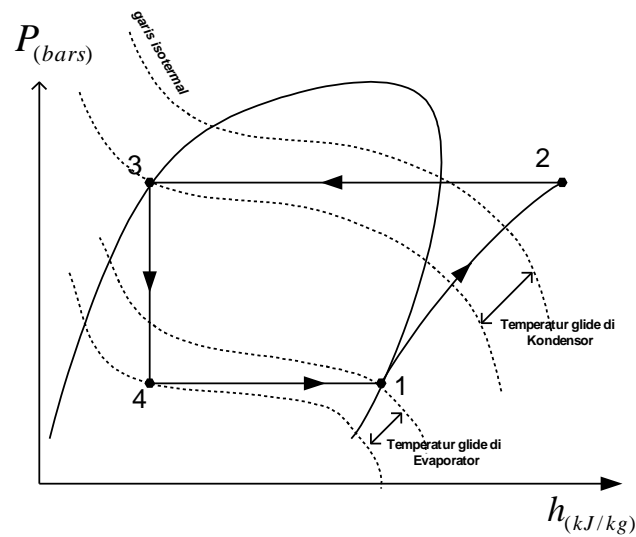
Refrigeran hidrokarbon dapat terbakar jika bercampur dengan udara pada komposisi yang tepat dan titik nyalanya tercapai. Komposisi yang harus dihindari ini adalah jika hidrokarbon berada pada komposisi 2% –10% volume. Kedua kondisi ini, komposisi dan titik nyalanya, tidak boleh terjadi secara serentak baik didalam sistem refrigerasi maupun diluar sistem. Agar tidak mudah terbakar refrigeran hidrokarbon dapat diberi substansi tambahan agar sifat mampu nyalanya turun (LFS – *Low Flammable Substance*). Penelitian refrigeran hidrokarbon dengan LFS sudah mulai banyak dilakukan beberapa sudah mulai digunakan.

Refrigeran hidrokarbon berasal dari campuran propana-butana-isobutana merupakan campuran zeotropik, yang sifat-sifat dari senyawa pembentuknya masih terbawa (tidak berubah). Campuran ini bukan zat tunggal, tetapi merupakan campuran yang senyawa-senyawa pembentuknya masih dapat dipisahkan melalui proses distilasi.

Refrigeran campuran hidrokarbon akan mengalami kenaikan atau penurunan temperatur (*temperature glide*) selama terjadi perubahan fasa dalam siklus refrigerasi (lihat Gambar 2.4). Titik didih campuran berubah seiring dengan berubahnya komposisi campuran dalam fasa cair. Hal ini disebabkan karena laju penguapan komponen campuran tidak sama.

Campuran fasa uap lebih kaya dengan komponen yang memiliki titik didih lebih rendah, sedangkan campuran fasa cair lebih kaya dengan komponen yang titik didihnya lebih tinggi. Akibatnya apabila campuran mengalir sepanjang evaporator, maka titik didih campuran akan naik, dan temperatur evaporasi juga akan bertambah. Pada tekanan evaporator, titik cair jenuh akan lebih rendah daripada titik uap jenuh.

Fenomena serupa juga terjadi pada kondensor, yaitu temperatur kondensasi akan menurun di sepanjang kondensor.



**Gambar 2.4. Temperatur Glide pada Campuran HC**

Akibat yang timbul karena adanya *temperature glide* adalah sebagai berikut:

1. Komposisi campuran mungkin berbeda antara fasa uap dan fasa cair, oleh karena itu pengisian refrigeran ke dalam sistem refrigerasi sebaiknya dilakukan dalam fasa cair.
2. Kalau sistem refrigerasi mengalami kebocoran, ada kemungkinan komposisi kebocoran berbeda dengan komposisi refrigeran. Sebagai akibatnya komposisi refrigeran di dalam sistem berubah dan dapat mempengaruhi kinerja sistem.