

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

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

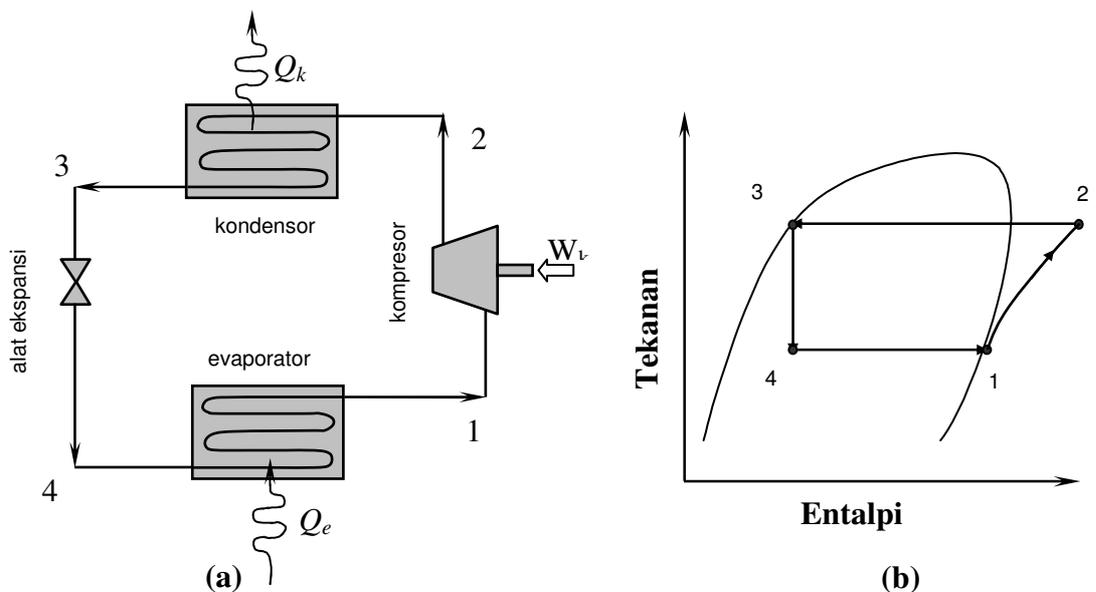
Proses pengambilan/penyerapan energi tersebut terjadi di evaporator dengan laju perpindahan panas sebesar  $Q_e$ . Sedangkan proses pembuangan energi dalam bentuk panas ke lingkungan terjadi di kondensor dengan laju sebesar  $Q_k$ . (Stoecker, W.F. and Jones, J.W. 1994).

Berdasarkan aplikasinya mesin refrigerasi dapat dikelompokkan seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 . (Pasek, A.D.,Tandian, N.P., Adriansyah W., 2004).

## 2.1 Siklus Kompresi Uap Standar

Siklus yang paling banyak digunakan untuk merealisasikan uraian di atas pada sistem refrigerasi adalah siklus kompresi uap. 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.



Gambar 2.1. Siklus Kompresi Uap Standar

Sebuah siklus kompresi uap standar memiliki empat komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator (gambar 1.).

Proses-proses termodinamik yang terjadi pada siklus kompresi uap standar adalah:

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.

Unjuk kerja mesin refrigerasi kompresi uap ditentukan oleh beberapa parameter, di antaranya adalah kapasitas pendinginan, kapasitas pemanasan, daya kompresi, koefisien performansi (*COP*) dan performansi faktor (*PF*). Diagram tekanan-entalpi pada gambar 1.b dapat membantu dalam menentukan parameter-parameter tersebut.

## 2.2. Thermal Energy Storage

*Thermal Energy Storage* merupakan alat tempat penyimpanan kalor. Kalor yang disimpan bisa berupa kalor sensibel maupun kalor laten. Menurut media penyimpan energi yang digunakan, *thermal storage* dapat dibedakan menjadi 2 tipe yaitu *Water Tank* dan *Ice Storage*. *Water Tank* merupakan *thermal storage* yang paling sederhana dan kalor disimpan dalam bentuk kalor sensibel (air). Waktu diluar jam puncak sistem, *thermal storage* menyerap kalor sensibel dan menyimpannya, kemudian kalor tersebut akan dipergunakan pada waktu jam puncak. *Ice Storage* merupakan *thermal*

*storage* yang menyimpan kalor dalam bentuk kalor laten (es). Dibandingkan dengan kalor sensibel air, kalor laten air lebih besar, yaitu 80 cal./gr atau 4180 J/kg. Sehingga volume penyimpanan kalor laten lebih kecil dibandingkan dengan volume penyimpanan kalor sensibel. Akibatnya investasi *ice storage* lebih murah daripada *water tank*.

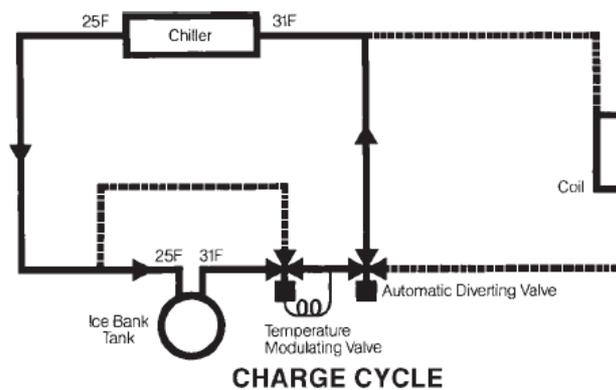
### **2.2.1. Sistem *Ice Storage***

Sistem *ice storage* biasanya menggunakan larutan *ethylene glycol*, yang dikenal dengan *brine* sebagai media perpindahan panas. Sehingga air yang umumnya digunakan sebagai media perpindahan panas pada unit *chiller* harus diganti dengan *brine* apabila dikombinasikan dengan sistem *ice storage*. Karena *brine* memiliki kemampuan untuk bekerja pada temperatur rendah sehingga memungkinkan penurunan temperatur yang cukup besar untuk mengubah fasa air menjadi es. *Brine* sebenarnya merupakan campuran 25% *ethylene glycol* dan 75 % air.

*Chiller* sentrifugal memiliki kemampuan menghasilkan *brine* yang keluar dari evaporator bersuhu sekitar 23 ° F - 26 ° F (- 5 ° C s/d - 3 ° C), sehingga sangat cocok untuk aplikasi sistem *ice storage*. Untuk merencanakan kontrol pada sistem *ice storage* agar dapat menjalankan tugas dengan baik tidaklah mudah. Hal ini dapat diawali dengan perencanaan sistem pengkondisian udara yang nyaman bagi para penghuni. Setelah dapat mengetahui beban pendinginan yang harus diatasi maka baru merancang kapasitas tangki *ice storage*. Beban pendinginan ini bisa diatasi secara penuh atau sebagian baik oleh *chiller* maupun *ice storage*. Agar hal tersebut di atas dapat berjalan dengan baik maka pembagian beban tersebut harus dikontrol oleh kontrol taktik dan kontrol strategi. Kontrol taktik mengontrol sistem kerja *chiller* dan *ice storage*, sedangkan kontrol strategi mengontrol penghematan pemakaian listrik.

### 2.2.2. Mode Operasi Sistem *Ice Storage*

Mode operasi kontrol taktik sistem dapat dibagi menjadi 5 mode operasi, yaitu *Charging Storage*, *Charging Storage and Live Chiller*, *Live Chiller*, *Discharging and Live Chiller*, *Discharging*. Dalam pengoperasiannya mode operasi dikontrol oleh *bypass valve* dan *blending valve*. *Blending valve* adalah katup pencampur yang berperan mengalirkan *brine* untuk melewati atau tidak melewati *storage*. Sedangkan *bypass valve* merupakan sebuah katup dengan dua arah posisi yang dapat mencegah aliran *brine* dingin menuju atau melewati unit pengolah udara selama mode operasi pembekuan. Dengan pemrograman kontrol *bypass valve* yang tepat maka katup ini dapat digunakan secara tepat. *Direct Digital Control* (DDC) digunakan untuk mengatur penggunaan *blending valve*.

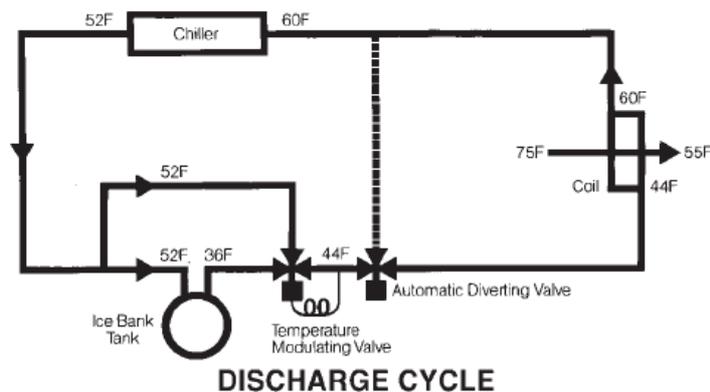


**Gambar 2.2. Proses charging (siklus pembentukan es) (OPC)**

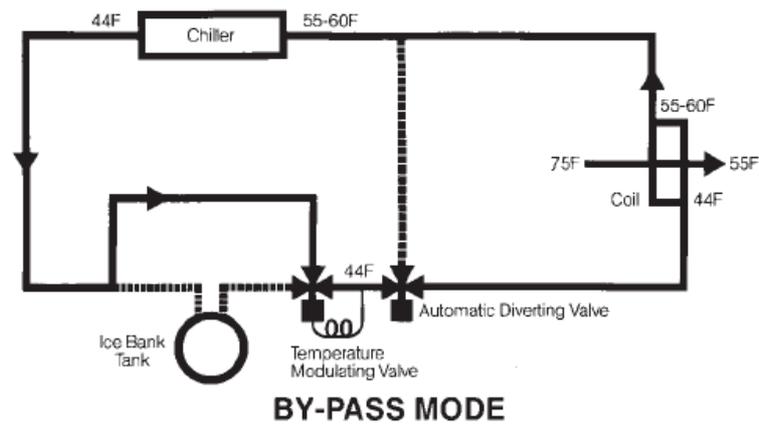
*Charging Storage* merupakan mode operasi untuk mempersiapkan *storage* berfungsi sebagai sumber pendingin. Dalam mode operasi ini *brine* bersirkulasi dari *chiller* ke *storage* saja dengan cara mengontrol *bypass valve*. *Charging Storage and Live Chiller* adalah mode operasi dimana beban *chiller* sebagian untuk mendinginkan *storage* dan sebagian ke unit pengolah udara (beban pendinginan). Mode operasi yang ketiga, yaitu *Live Chiller* adalah mode operasi dimana beban pendinginan seluruhnya diatasi oleh *chiller* sehingga *brine* hanya bersirkulasi dari *chiller* menuju

unit pengolah udara. Hal ini dapat diatasi secara mudah dengan menaikkan *setpoint* DDC *blending valve* sampai pada temperatur larutan *brine* yang mengalir menuju ke *chiller*. Karena larutan *brine* didinginkan lagi oleh *chiller* maka suhu menjadi lebih rendah daripada suhu yang mengalir ke *chiller*. Maka *blending valve* tidak akan mengalirkan larutan *brine* menuju *storage*.

*Discharging and Live Chiller* merupakan mode operasi dimana beban pendinginan sebagian diatasi oleh *chiller* dan sebagian oleh *storage*. Sebelum mode operasi ini dilakukan, dipastikan seluruh air dalam *storage* sudah berubah fase menjadi es. Dan mode operasi yang terakhir adalah *Discharging*, merupakan mode operasi dari *storage* untuk mengatasi seluruh beban pendinginan dari unit pengolah udara. Dalam situasi ini *chiller* dalam keadaan *off*. Mode – mode operasi ini perlu diatur sedemikian hingga terjadi penghematan biaya operasional listrik *chiller*. Pengaturan kerja mode operasi agar lebih efisien ini dilakukan oleh kontrol strategi. Untuk dapat merancang kontrol strategi yang baik maka sistem *ice storage* harus dengan efektif dapat menyeimbangkan penggunaan pencairan es dan pengoperasian *chiller* didalam lima mode operasi di atas.



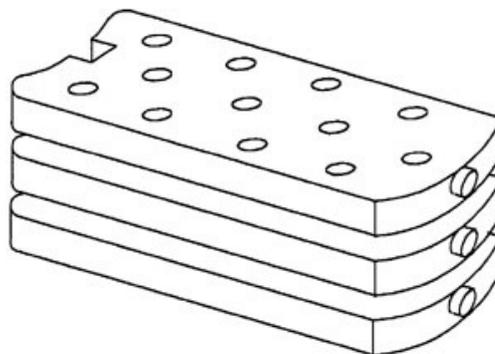
**Gambar 2.3. Proses discharging (proses pendinginan dengan pencairan es)**



**Gambar 2.4. Proses ByPass (proses pendinginan langsung dari Chiller) (OPC)**

### 2.2.3. Encapsulated Ice system

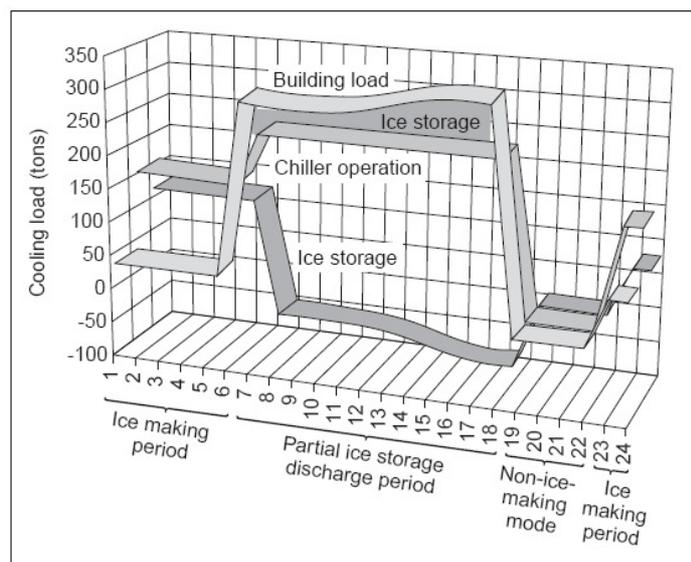
*Encapsulated Ice system* terdiri dari air atau gel yang terdapat dalam wadah atau kontainer plastik yang dicelupkan dalam cairan pendingin, yang terdapat dalam sebuah tangki penyimpanan. Selama siklus pembekuan (*charging*) cairan pendingin di bawah titik beku disirkulasikan ke dalam tangki penyimpanan sehingga membekukan cairan dalam kontainer plastik. Pada proses penggunaan (*discharging*) cairan pendingin bersuhu lingkungan atau normal disirkulasikan ke dalam tangki penyimpanan dan melewati kontainer plastik dan mencairkan es dalam kontainer tersebut. *Encapsulated Ice* biasanya berbentuk kotak plastik persegi, kemasan plastic yang lentur, kemasan bola plastik.



**Gambar 2.5. Encapsulated Ice**

### 2.3. Pemakaian Energi

Dasar penggunaan *thermal energy storage* ada dua alasan utama , yaitu untuk menurunkan biaya awal (investasi) dan biaya operasional pemakaian. Biaya investasi dapat ditekan jika lamanya beban yang harus diatasi pendek sehingga *thermal storage* memiliki waktu yang panjang sebelum bebannya dipergunakan. Misalnya sebuah gedung pertemuan atau fasilitas gedung olah raga atau rumah dengan kapasitas pengkondisian udara yang cukup besar, pemakaiannya kurang dari 6 jam per hari dan frekwensi pemakaian pun beberapa hari dalam satu minggu. Hal ini perlu dipertimbangkan pemakaian *thermal energy storage* dengan tujuan agar kapasitas sistem refrigerasi yang dipilih bisa lebih kecil. Biaya kapital sekunder *thermal storage* lebih rendah, karena kebutuhan energinya lebih rendah. Jika temperatur es yang berada dalam *ice storage* makin rendah maka temperatur distribusi udara makin turun. Hal ini akan menyebabkan pemakaian *fan* dan saluran udara (*duct*) lebih kecil, dan pada akhirnya akan mengurangi jumlah luas ruang yang dibutuhkan.



**Gambar 2.6. Beban pendinginan harian suatu bangunan gedung**

## 2.4. 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*)).

### 2.4.1 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.

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 ).

**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

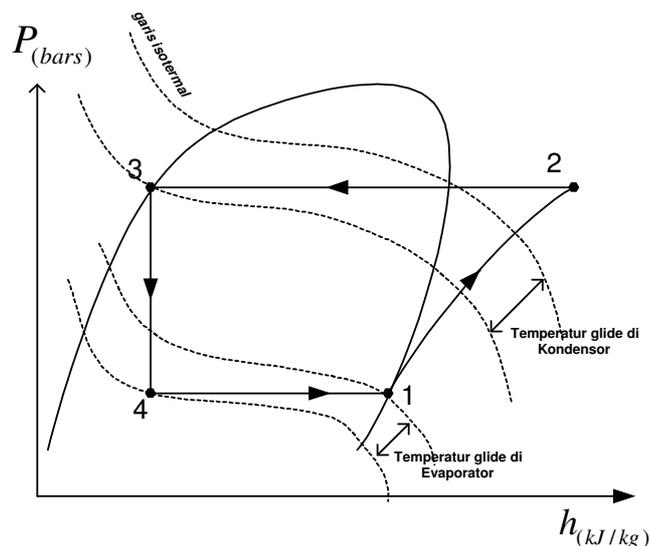
#### 2.4.2 Hidrokarbon Sebagai Refrigeran

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 campuran hidrokarbon akan mengalami kenaikan atau penurunan temperatur (*temperature glide*) selama terjadi perubahan fasa dalam siklus refrigerasi (lihat Gambar 2.7). Titik didih campuran berubah seiring dengan berubahnya komposisi campuran dalam fasa cair. Hal ini disebabkan karena laju penguapan komponen campuran tidak sama.



**Gambar 2.7. 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.