

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 SEJARAH REFRIGERAN

Sistem kompresi uap untuk refrigerasi pertama kali dipatenkan pada tahun 1834 oleh Jacob Perkins, seorang warga Amerika, dengan menggunakan *ethyl ether* sebagai refrigeran atau fluida pendingin. Paten tersebut mencakup sistem tertutup yang meliputi kompresor, kondenser, katup ekspansi dan evaporator. Melalui patennya, penelitian akan refrigeran pun mulai berkembang.

Pada tahun 1863, Charles Tallier menggunakan *methyl ether* sebagai refrigeran pada sistem kompresi uap. Dalam aplikasinya *methyl ether* memiliki tekanan kerja yang lebih tinggi dibanding *ethyl ether* sehingga mengurangi resiko masuknya udara kedalam sistem pada saat kebocoran yang dapat mengakibatkan ledakan.

Adanya resiko yang cukup besar dari *ethyl* dan *methyl ether* terhadap ledakan membuat pengembangan terus berlanjut. Diawal tahun 1862, Thaddeus Lowe, menggunakan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) sebagai refrigeran. Dalam percobaannya ia menggunakan kompresor khusus yakni kompresor hidrogen dikarenakan tekanan kerja dari karbon dioksida yang sangat tinggi. Refrigeran ini memiliki sifat yang aman terhadap lingkungan namun masih memiliki kelemahan yakni temperatur kritis yang masih rendah ( $31.6^\circ\text{C}$ ).

Upaya untuk menghasilkan refrigeran dengan *properties* yang lebih baik dilakukan oleh Carl Von Linde pada tahun 1875. Ia menggantikan peran *methyl ether* dengan ammonia ( $\text{NH}_3$ ) sebagai refrigeran dan menggunakan kompresor amonia yang saat itu sudah mulai diproduksi secara massal. Pengujian tersebut menghasilkan *properties* yang sangat baik bahkan sifat-sifat yang dimiliki oleh amonia dianggap sebagai refrigeran ideal. Namun, refrigeran ini pun masih memiliki beberapa kekurangan yang dianggap merugikan diantaranya: sangat beracun dan bersama dengan uap air menjadi sangat reaktif terhadap tembaga dan beberapa logam lainnya.

Sebelum akhir abad ke-19, untuk pertama kalinya *methyl chloride* digunakan sebagai refrigeran di Prancis. Memiliki *properties* yang cukup baik tidak membuat refrigeran ini banyak digunakan. Hal ini dikarenakan banyaknya kecelakaan terjadi yang disebabkan sifatnya yang beracun dan mudah terbakar dibanding dengan amonia dan sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>).

Sulfur dioksida, menjadi populer pada tahun 1920-an. Refrigeran ini menjadi jawaban bagi sistem refrigerasi yang membutuhkan tekanan yang rendah, sistem yang lebih ringan dan berukuran kecil. Harganya pun merupakan yang termurah dibanding refrigeran lainnya. Dalam aplikasinya, sulfur dioksida dapat bereaksi dengan uap air dan menyebabkan korosi terhadap jaringan pipa. Hal ini pada akhirnya juga menimbulkan kerugian dan resiko yang membahayakan apabila terjadi kebocoran karena sifatnya yang sangat beracun.

Pada tahun 1930, Dr. I. Midgeley berhasil memproduksi refrigeran dengan sebutan *dichlorodifluoromethane* (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) atau yang lebih dikenal sebagai freon 12 atau R12. Penelitiannya merupakan pengembangan dari *methyl chloride*. Ia menemukan bahwa *methyl chloride* menjadi tidak stabil karena atom H tidak cukup kuat terikat dengan atom C. Oleh sebab itu ia menggantikan posisi atom H dengan atom halogen yang dapat berikatan kuat dengan atom C sehingga menghasilkan senyawa yang lebih stabil.

Berhasilnya penelitian Midgeley membuat perkembangan refrigeran menjadi berkembang pesat dibanding tahun-tahun sebelumnya. Penurunan *methane* dengan cara menggantikan tiga posisi atom H dengan dua atom F dan satu atom Cl menghasilkan refrigeran baru yakni freon 22 atau R22 (CHClF<sub>2</sub>). Selanjutnya penurunan *methane* ataupun senyawa lainnya yang memiliki atom karbon (hidrokarbon) dengan halogen disebut sebagai refrigeran halokarbon.

Tingginya temperatur *discharge* dari R22 membuat pengembangan refrigeran diteruskan kembali. Pengembangan dilakukan dengan cara mencampurkan dua atau lebih refrigeran halokarbon dengan komposisi tertentu hingga menghasilkan suatu senyawa yang baru. Campuran yang menghasilkan suatu refrigeran baru dengan sifat yang berbeda dari penyusunnya disebut azeotrop. Salah satu jenisnya adalah R502 (campuran 48.8% R22 dan 51.2% R115).

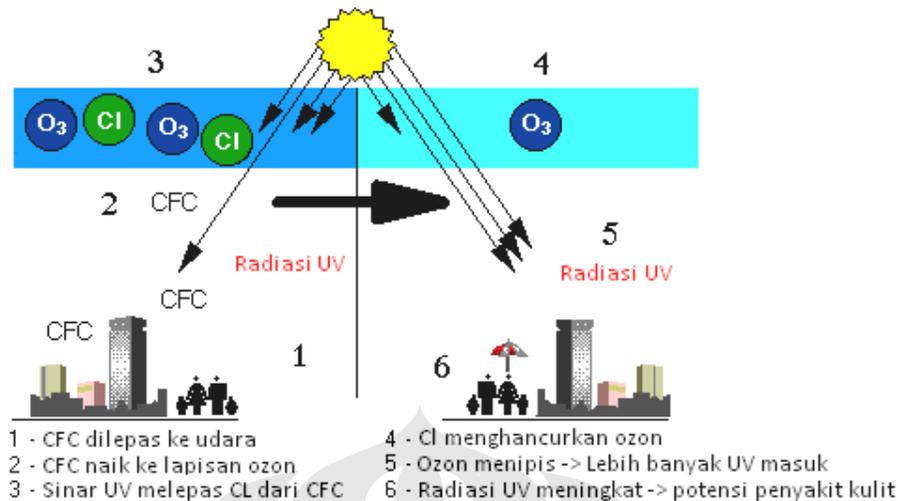
Berkembangnya refrigeran juga menuntut perkembangan dari sistem refrigerasi. Pada tahun 1967, D.J Missimer dan W.L Holladay[1] mengembangkan sistem refrigerasi *cascade* dengan menggunakan *shell and tube heat exchanger*. Refrigeran yang digunakan adalah R12 pada *high-stage* dan R13 pada *low-stage*. Hasil yang dicapai menunjukkan bahwa sistem refrigerasi *cascade* lebih ekonomis karena biaya operasi serta kebutuhan listrik yang lebih rendah. Selain itu, sistem refrigerasi *cascade* juga lebih stabil dalam bekerja dan lebih mudah dalam hal perawatan dan perbaikan.

Penelitian berlanjut hingga pengujian yang dilakukan oleh Souvic Bhattacharyya[2] pada tahun 2005 terhadap sistem refrigerasi *cascade* dengan menggunakan propana pada *high-stage* dan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) pada *low-stage*. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan temperatur, efisiensi isentropis kompresor, dan efisiensi exergetik sistem. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa kinerja sistem yang diukur melalui COP mengalami peningkatan yang diikuti dengan penurunan pada saat mencapai temperatur tertentu. Hal tersebut menunjukkan bahwa temperatur dan tekanan yang lebih rendah atau lebih tinggi ternyata tidak menjamin kinerja sistem lebih baik.

## 2.2 PENIPISAN OZON

Populernya penggunaan halokarbon pada pertengahan 1960 hingga tahun 1970 ternyata mengundang perhatian para ahli. Bahkan diantaranya mengatakan bahwa tidak perlu untuk membeli freon karena di atmosfer freon dapat dikondensasikan. Sindiran ini diucapkan karena tidaklah sulit untuk mendeteksi keberadaan freon di atmosfer. Hal ini dipertegas melalui hipotesis yang dikemukakan oleh Roland dan Molina pada tahun 1974.

Dalam hipotesisnya Roland dan Molina mengatakan bahwa CFC (*Chlorofluorocarbon*) akan terurai menjadi unsur penyusunnya oleh karena radiasi sinar ultraviolet pada lapisan stratosfer. Munculnya unsur klorin sebagai katalis pada lapisan tersebut menyebabkan terjadinya dekomposisi atau penguraian dari ozon ( $\text{O}_3$ ) menjadi oksigen ( $\text{O}_2$ ). Selanjutnya penguraian lapisan ozon dapat mengakibatkan terjadinya radiasi langsung sinar ultraviolet ke atas permukaan bumi yang sangat membahayakan bagi kehidupan makhluk hidup.



Gambar 2.1 Proses penipisan ozon[3]

Pada tahun 1985, nampaknya hipotesis tersebut mulai dianggap benar. Hal ini diperkuat dengan terjadinya penipisan serta perusakan lapisan ozon di wilayah Antartika seperti yang diperkirakan sebelumnya.

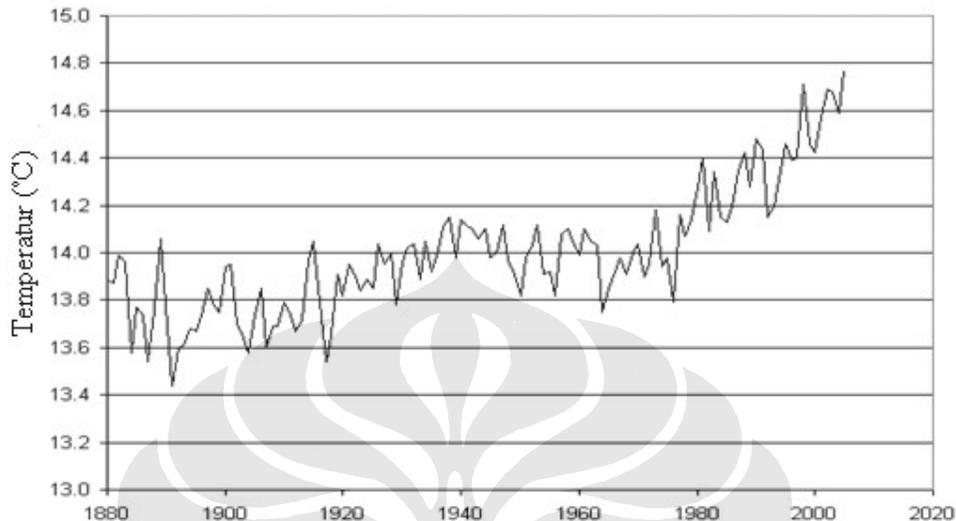
### 2.3 PERUBAHAN IKLIM

Selain menimbulkan dampak negatif terhadap lapisan ozon ternyata refrigeran juga memiliki dampak negatif lainnya. Refrigeran yang terlepas ke udara ternyata dapat menimbulkan efek rumah kaca sama seperti yang disebabkan oleh gas karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ). Berdasarkan data yang ada (gambar 2.2), seiring dengan meningkatnya penggunaan refrigeran secara masal mengakibatkan kenaikan suhu secara global (*global warming*) selama beberapa dekade terakhir.

Peningkatan suhu yang cukup besar yang diakibatkan oleh efek rumah kaca dapat mengakibatkan pemanasan global. Pemanasan yang terjadi menyebabkan mencairnya lapisan es yang terdapat di Antartika, hal ini terbukti dengan meningkatnya ketinggian dari air laut setiap tahunnya. Selain itu, pemanasan yang terjadi juga mengakibatkan perubahan kecepatan angin yang merupakan parameter terhadap perubahan cuaca dan iklim.

Seriusnya dampak negatif terhadap perubahan iklim yang ditimbulkan oleh suatu jenis refrigeran mendorong negara-negara maju untuk membuat sebuah konvensi baru seperti yang diadakan sebelumnya (Protokol Montreal), yakni

protokol Kyoto pada tahun 1997. Konvensi ini membahas tentang penggunaan refrigeran terhadap perubahan iklim yang belum dibahas pada protokol Montreal.



Gambar 2.2 Perubahan temperatur secara global[4]

## 2.4 SELEKSI REFRIGERAN

Dalam memilih refrigeran yang akan digunakan, selain mempertimbangkan sistem yang akan dipakai, terdapat beberapa kriteria khusus. Sesuai standar ANSI/ASHRAE 34-1992, terdapat dua faktor penting yang sangat berpengaruh dalam pemilihan refrigeran, meliputi kandungan racun (*toxicity*) dan mampu bakar (*flammability*). Berikut ini adalah kriteria dalam melakukan pemilihan refrigeran :

1. Sesuai ANSI/ASHRAE Standard 34-1992, kadar racun dalam refrigeran dikelompokkan dalam refrigeran sebagai Kelas A dan Kelas B. Refrigeran Kelas A adalah refrigeran dengan kadar racun rendah yang setelah dalam selang tertentu waktu rata-rata konsentrasinya kurang dari sama dengan 400 ppm, dimana pekerja bisa terkena 8 jam kerja sehari dan 40 jam kerja seminggu tanpa efek yang merugikan. Sedangkan refrigeran Kelas B adalah refrigeran yang mempunyai kandungan racun lebih tinggi dan menghasilkan tanda kandungan racun.
2. ANSI/ASHRAE Standard 34-1982 juga mengelompokkan refrigeran mampu bakar dalam 3 kelas. Pada Kelas 1, tidak ada perambatan nyala sama sekali,

artinya refrigeran tidak dapat terbakar; Kelas 2, mampu nyala yang rendah; dan Kelas 3, mampu nyala yang tinggi.

3. Selain kriteria diatas, terdapat kriteria lain yaitu kemampucampuran refrigeran dengan oli (*Oil miscibility*). Refrigeran yang baik dapat bercampur dengan oli pelumas karena pencampuran antara refrigeran dan oli membantu untuk mengurangi gesekan yang terjadi didalam kompresor. Oli tersebut seharusnya dapat dikembalikan untuk digunakan kembali dengan menggunakan oil separator yang dipasang setelah kompresor.

Klasifikasi tingkat keamanan refrigeran dibuat berdasarkan kombinasi kandungan racun dan mampu bakar pada refrigeran tersebut: A1, A2, A3, B1, B2, dan B3. Refrigeran yang memiliki tingkat keamanan terbaik adalah A1.

Namun, sejak disepakatinya protokol Montreal dan Kyoto terdapat dua kriteria lainnya yang harus dipenuhi suatu jenis refrigeran agar dapat digunakan secara aman dan komersial. Dua kriteria tersebut adalah ODP (*Ozone Depletion Potential*) merupakan nilai yang menunjukkan potensi suatu jenis refrigeran terhadap kerusakan ozon dan GWP (*Global Warming Potential*) merupakan nilai yang menunjukkan potensi suatu jenis refrigeran terhadap pemanasan global. Meskipun suatu refrigeran memiliki tingkat keamanan dan kinerja yang sangat baik, tapi jika memiliki dampak yang buruk terhadap lingkungan maka penggunaannya juga perlu dibatasi.

Tabel 2.1 menunjukkan nilai ODP dan GWP yang dimiliki oleh CFC (*Cholorofluorocarbon*), HFC (*Hydrofluorocarbon*) dan *Hydrocarbon*. Sebagai contoh, meskipun HFC (R23) tidak memiliki dampak terhadap penipisan ozon tetapi refrigeran tersebut memiliki dampak yang cukup besar terhadap pemanasan global. Sedangkan pada hidrokarbon sekalipun memiliki efek negatif seperti tingkat *flamamability* yang tinggi tetapi tidak memiliki dampak terhadap penipisan ozon dan pemanasan global, sehingga dapat menjadi alternatif yang sangat baik.

Tabel 2.1 Nilai ODP dan GWP Beberapa Refrigeran

Refrigeran	Tipe	ODP	GWP
R12	CFC	1	8500
R13	CFC	1	14000
R22	HCFC	0,07	1700
R23	HFC	0	11700
R170	HC	0	3
R290	HC	0	3
R404A	HFC	0	3260
R744	N	0	1

Dalam rangka menemukan jenis refrigerant yang lebih handal dari HFC, beberapa riset dan penelitian terhadap refrigerator domestik dengan menggunakan hidrokarbon ataupun campurannya telah banyak dilakukan khususnya beberapa dekade terakhir ini. Diantaranya adalah Agarwal[5] (1996) yang mengadakan pengujian antara iso-butana (R600A) murni maupun campurannya dengan propana (R290) pada suhu evaporasi  $-25^{\circ}\text{C}$  dan suhu kondensasi  $55^{\circ}\text{C}$  dengan R134a melaporkan bahwa iso-butana memiliki *temperature discharge* yang lebih rendah dan COP yang lebih tinggi tetapi kapasitas volumetrik yang lebih rendah dibanding R134A, Maclaine-cross[6] dalam pengujiannya menyarankan campuran antara propana dan iso-butana dengan perbandingan konsentrasi massa 55/45 dapat menyaingi performa R134A.

Saat ini, refrigeran R22 masih dapat digunakan sebelum akhirnya dilarang mulai tanggal 1 Januari 2030[7]. R22 juga memiliki ODP yang sangat rendah sehingga masih dapat digunakan dengan syarat dipakai sesuai dengan prosedur yang benar. Sedangkan R404A tidak memiliki dampak terhadap penipisan ozon, meski memiliki GWP yang cukup tinggi, refrigeran ini masih dapat digunakan dengan aman setidaknya hingga saat ini. Selain itu, kedua refrigeran ini mudah dijumpai di pasar dan harganya yang relatif terjangkau. Atas dasar kebutuhan diatas, kedua refrigeran tersebut dipilih sebagai refrigeran yang akan digunakan dalam pengujian. Hasil lebih lanjut dapat dilihat pada proses simulasi yang disajikan pada BAB 3.

## 2.5 KLASIFIKASI REFRIGERAN

### 2.5.1 Klasifikasi Berdasarkan Kandungan Senyawa

Refrigeran diklasifikasi kedalam beberapa kelas berdasarkan jenis fluida yang digunakan, yaitu :

1. CFC (Chlorodifluorocarbon)

CFC adalah senyawa yang hanya mengandung klorin, fluor, dan karbon dan tidak mengandung hidrogen. CFC memiliki efek ODP dan GWP yang sangat tinggi. Contoh CFC antara lain R11, R12, R13, R113, R500, R502, dll.

2. HCFC (Hydrochlorofluorocarbon)

HCFC adalah senyawa haloalkana dimana tidak semua hidrogen digantikan dengan klorin atau fluor. HCFC biasa digunakan sebagai pengganti CFC dengan nilai ODP yang lebih rendah. Contoh HCFC adalah R22, R123, R401A, R403A, R408A, dll.

3. HFC (Hydrofluorocarbon)

HFC tidak mengandung klorin yang merupakan senyawa perusak ozon, hanya terdiri dari hidrogen, fluor, dan karbon. HFC tidak merusak ozon dan memiliki nilai ODP dan GWP yang rendah. Contoh HFC antara lain R134A, R404A, R407C, R507, dll.

4. HC (Hydrocarbon)

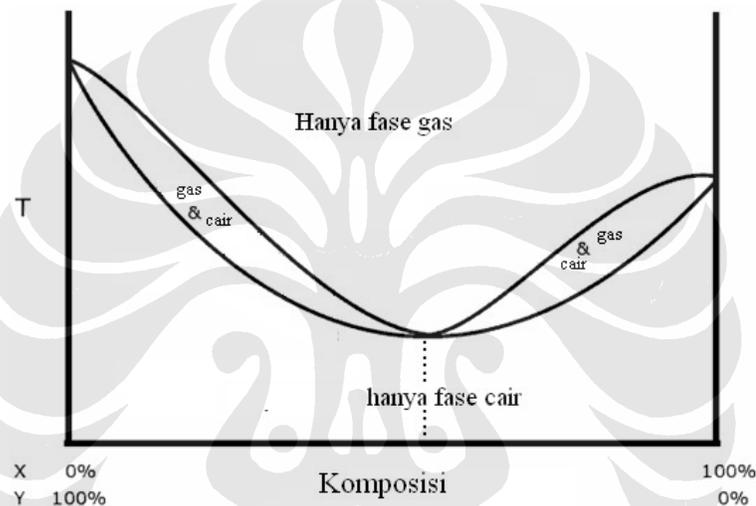
Hidrokarbon adalah senyawa organik yang terdiri dari hidrogen dan karbon. Refrigeran HC tidak memiliki dampak yang buruk terhadap lingkungan, namun memiliki dampak negatif terhadap pengguna, karena umumnya mudah terbakar. Contoh refrigeran HC antara lain propana, ethane, isobutana, dll.

5. Natural

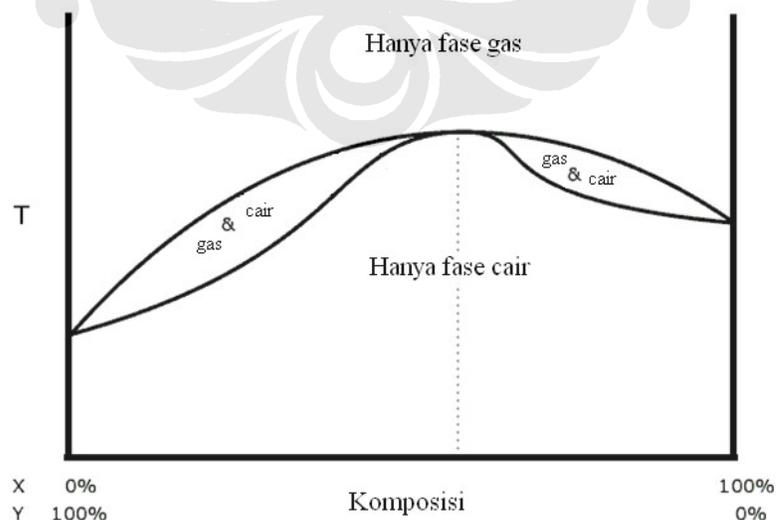
Refrigeran natural adalah yang langsung berasal dari alam dan juga tidak memiliki dampak yang buruk terhadap lingkungan. Namun beberapa diantara refrigeran ini memiliki efek samping bagi penggunaannya, seperti kadar racun yang tinggi. Refrigeran natural yang biasa digunakan adalah udara, amonia dan karbondioksida.

### 2.5.2 Klasifikasi Berdasarkan Sifatnya

Klasifikasi ini berdasarkan sifat yang dimaksud yaitu refrigeran tipe zeotrop dan azeotrop. Azeotrop adalah campuran antara 2 buah atau lebih senyawa pada komposisi tertentu yang tidak bisa dipisahkan dengan metode distilasi biasa. Hal tersebut dikarenakan pada saat campuran azeotrop tersebut mendidih, uap yang muncul akibat pendidihan memiliki rasio unsur pokok yang sama dengan cairannya. Hal tersebut membuat azeotrop juga dikenal sebagai *constant boiling mixture* karena komposisinya yang tidak berubah meski sudah mendidih.

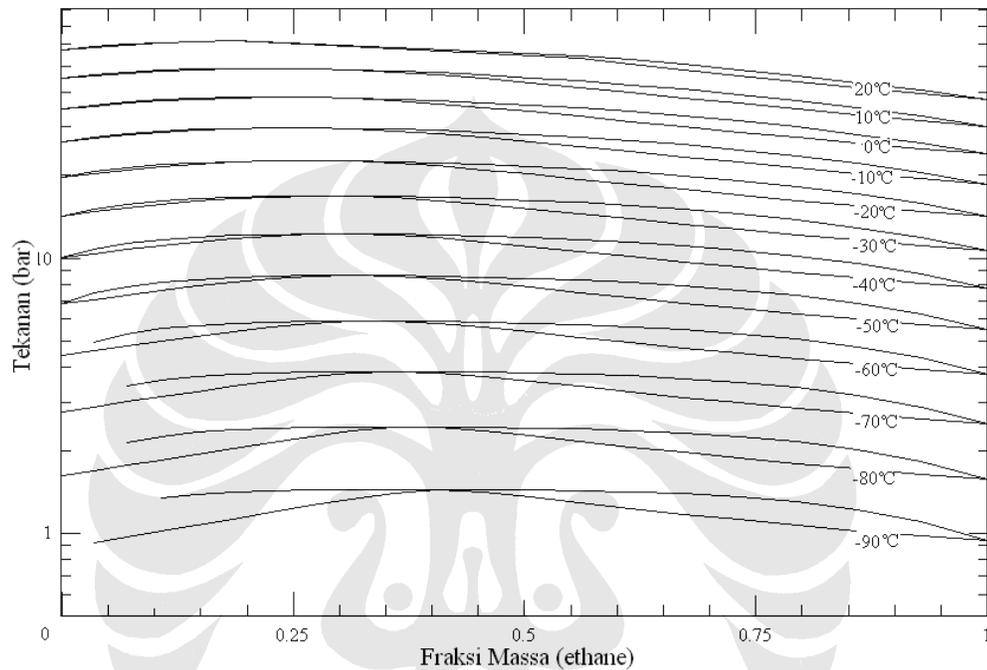


Gambar 2.3 Diagram fase azeotrop positif



Gambar 2.4 Diagram fase azeotrop negatif

Pada refrigeran campuran yang sifatnya zeotrop, pada keadaan tertentu, kedua refrigeran tersebut dapat berpisah. Jika hal tersebut terjadi, maka sifat dari refrigeran akan menjadi berbeda. Keadaan tersebut tergantung dari komposisi massa, tekanan, dan temperatur, sifat tersebut dapat dianalisa dengan bantuan software REFPROP[8].



Gambar 2.5 Temperatur *glide* pada Rmix

Diagram diatas menunjukkan karakteristik campuran R744 dengan R170 dengan komposisi 50-50. Terdapat 2 buah garis yang mewakili masing-masing refrigeran. Jika kedua garis tersebut berada pada satu garis yang sama, maka pada dasarnya kedua refrigeran tidak berpisah. Sebaliknya, jika kedua garis tersebut berpisah, maka kedua refrigeran tersebut juga berpisah. Berdasarkan diagram diatas, semakin tinggi tekanan dan temperatur kerja refrigeran, maka semakin rendah fraksi massa ethane yang dibutuhkan pada Rmix agar kedua refrigeran tidak saling berpisah, dan semakin panjang jarak fraksi massa ethane yang dibutuhkan agar kedua refrigeran tidak berpisah.

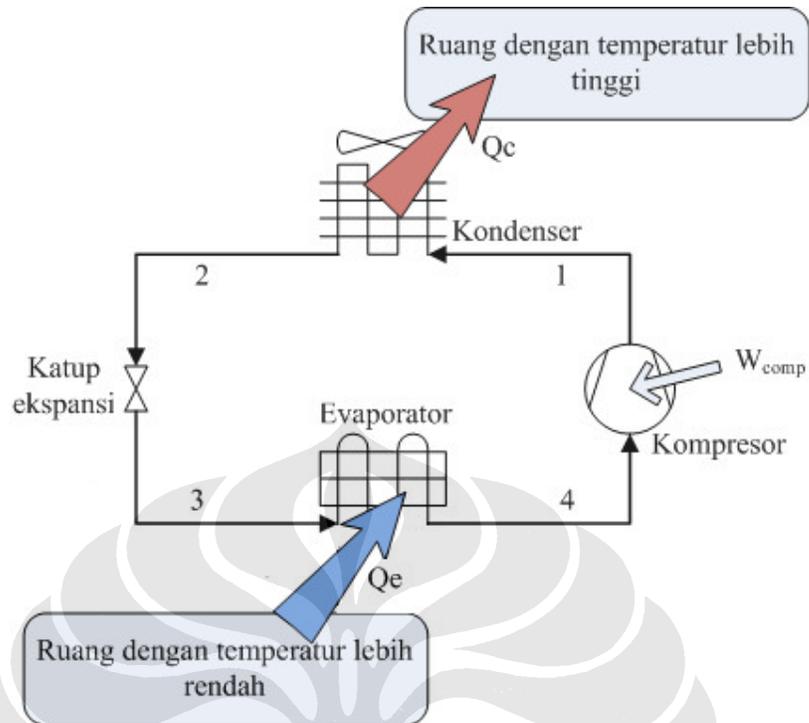
## 2.6 REFRIGERASI DAN SISTEM REFRIGERASI

Refrigerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan yang memiliki temperatur tertentu, dan memindahkan kalor tersebut ke suatu medium yang memiliki temperatur tertentu serta menjaga kondisi tersebut sesuai dengan yang dibutuhkan. Pada sistem ini, sebuah kompresor akan mengompres refrigeran sehingga tekanan dan suhunya meningkat. Refrigeran yang telah terkompres kemudian dikondensasikan dengan kondenser menjadi cairan dengan melepaskan kalor latennya. Memasuki alat ekspansi, cairan tersebut diturunkan tekanannya sehingga temperaturnya menurun dan kemudian dilanjutkan di dalam evaporator menghasilkan efek refrigerasi dengan menyerap kalor dari suatu ruangan.

Sistem refrigerasi adalah suatu sistem yang terdiri dari minimal atas kondenser, alat ekspansi, dan evaporator yang terhubung satu dengan lainnya dengan sistem pemipaan tertentu yang didukung oleh alat bantu lainnya jika dibutuhkan. Performa suatu sistem dapat diidentifikasi dari beberapa nilai diantaranya COP, kapasitas pendinginan volumetrik, kapasitas pendinginan, kapasitas kondenser, daya kompresor, temperatur *discharge*, rasio tekanan dan aliran massa refrigeran. Ada dua jenis sistem refrigerasi yang umum digunakan, yaitu :

- Sistem Kompresi-Uap

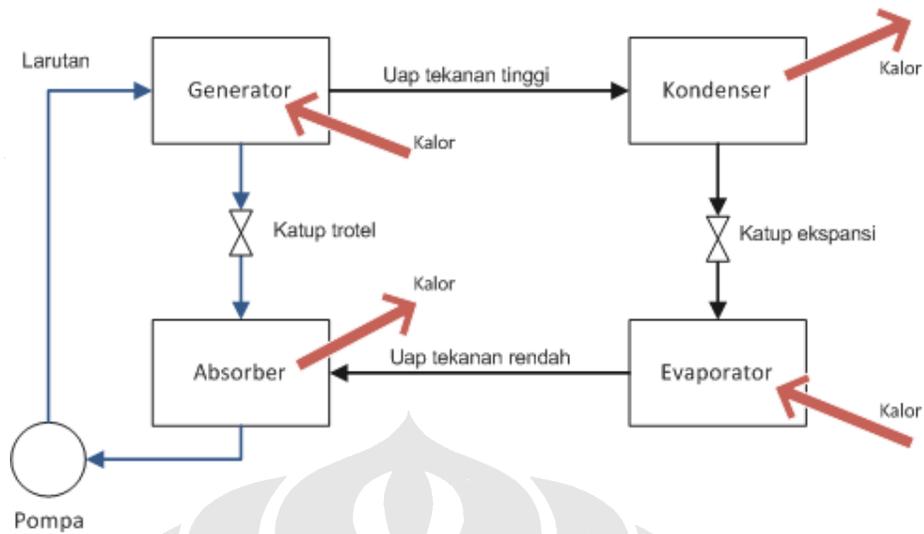
Sistem ini menggunakan daur kompresi uap yang sangat umum digunakan dalam sistem refrigerasi. Pada sistem ini, proses yang terjadi adalah refrigeran pada fase gas mengalami kompresi dengan menggunakan kompresor hingga tekanan dan temperaturnya naik. Perbedaan tekanan antara kompresor dan alat lainnya menyebabkan refrigeran dapat mengalir. Kemudian refrigeran mengalir ke kondenser dimana terjadi proses pelepasan kalor dari sistem ke lingkungan yang juga akan mengubah fase refrigeran menjadi cair. Selanjutnya refrigeran diekspansi dengan memakai alat ekspansi sehingga tekanan dan temperaturnya turun. Pada tahap terakhir, refrigeran yang sudah memiliki temperatur dan tekanan rendah menyerap kalor dari lingkungan dengan menggunakan evaporator. Lalu refrigeran mengalir kembali ke kompresor dan proses diulang kembali.



Gambar 2.6 Siklus kompresi uap

- Sistem Absorpsi

Berbeda dengan sistem kompresi uap yang dioperasikan oleh kerja, sistem absorpsi dioperasikan oleh kalor karena sistem memberikan kalor yang diperlukan untuk melepaskan refrigeran dari cairan bertekanan tinggi. Refrigeran bertekanan rendah dari evaporator diserap oleh cairan didalam absorber, proses dilakukan secara adiabatik hingga suhu cairan naik dan proses absorpsi berhenti. Untuk itu absorber umumnya didinginkan oleh udara atau air yang berfungsi menyerap kalor dan melepaskannya ke lingkungan. Kemudian pompa menerima zat cari dari absorber dan menaikkan tekanannya lalu mengirimnya ke generator. Dalam generator, kalor dari sumber tertentu melepas uap yang telah diserap oleh larutan. Cairan dikembalikan ke absorber melalui katup *throttling* untuk menurunkan tekanannya sehingga menjaga perbedaan tekanan antara generator dengan absorber.

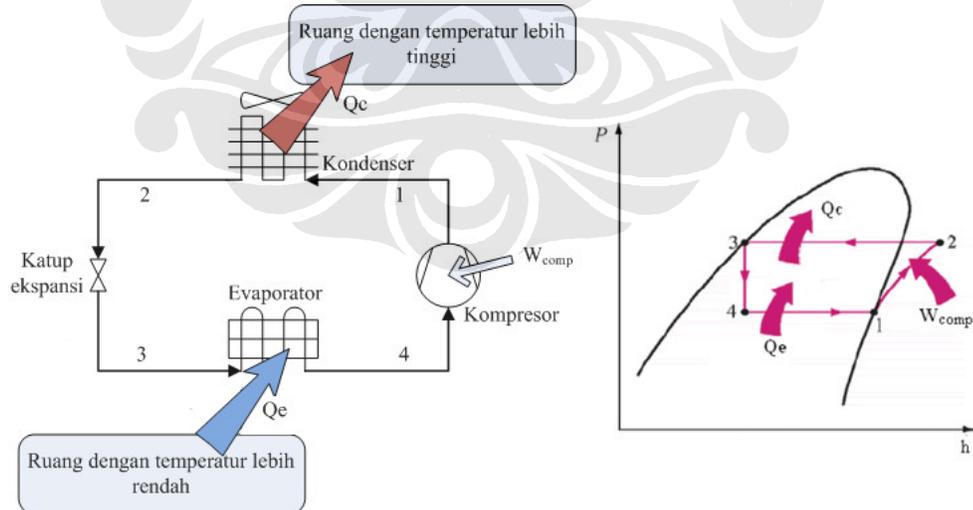


Gambar 2.7 Siklus absorpsi

## 2.7 SIKLUS REFRIGERASI

### 2.7.1 Siklus Refrigerasi Tunggal-Ideal

Siklus refrigerasi tunggal-ideal memiliki satu tingkat kompresi isentropik dan kerugian tekanan yang terjadi pada jaringan pemipaan, katup atau pun komponen lainnya diabaikan.



Gambar 2.8 Siklus refrigerasi tunggal dan p-h diagram

Proses yang terjadi :

1-2 : kompresi adiabatik

2-3 : pelepasan kalor pada tekanan konstan

3-4 : ekspansi pada entalpi konstan

4-1 : penyerapan kalor pada tekanan konstan

### Kompresor

Kompresor merupakan salah satu komponen terpenting dalam sistem refrigerasi kompresi-uap. Sesuai dengan namanya, alat ini berfungsi untuk mengkompresikan fluida (refrigeran) yang berfase uap. Dengan adanya kompresi ini maka terjadi perbedaan tekanan antara sisi keluar (*discharge line*) dengan sisi hisap (*suction line*) yang menyebabkan refrigeran dapat mengalir dalam sistem refrigerasi.

Kerja kompresi isentropik :

$$W_{is} = m \times \Delta h_{comp} \quad (1)$$

Dimana selisih entalpi kompresi ( $\Delta h$ ):

$$\Delta h_{comp} = h_{is,comp-out} - h_{is,comp-in} \quad (2)$$

Kerja kompresor :

$$W = W_{is} / \eta_{is} \quad (3)$$

Daya kompresor :

$$P = \dot{m} \times \Delta h_{comp} \quad (4)$$

$W_{is}$  = kerja kompresi isentropik (kJ)

$W$  = kerja kompresi aktual (kJ)

$\Delta h_{comp}$  = selisih entalpi (kJ/kg)

$h_{comp-out}$  = entalpi pada output kompresor (kJ/kg)

$h_{comp-in}$  = entalpi pada input kompresor (kJ/kg)

$\eta_{is}$  = efisiensi isentropis

$P$  = daya kompresor (kW)

$\dot{m}$  = laju aliran massa (kg/s)

## Kondenser

Memindahkan kalor dari sistem ke lingkungan merupakan fungsi dari sebuah kondenser. Kalor tersebut dipindahkan secara konveksi paksa dengan menggunakan sebuah kipas (*fan*) sehingga refrigeran berfase uap yang memasuki kondenser berubah fasenya menjadi cair.

Jumlah kalor yang dipindahkan oleh kondenser ditunjukkan dengan persamaan :

$$Q_c = (h_{\text{cond-out}} - h_{\text{cond-in}}) \quad (5)$$

$Q_c$  = kapasitas kalor yang dipindahkan dari sistem ke lingkungan (kJ/kg)

$h_{\text{cond-out}}$  = entalpi refrigeran keluar kondenser

$h_{\text{cond-in}}$  = entalpi refrigeran masuk kondenser

## Alat ekspansi

Alat ekspansi merupakan alat yang berfungsi untuk menurunkan tekanan. Refrigeran yang berasal dari kondenser umumnya masih memiliki tekanan yang cukup tinggi sehingga tekanannya perlu diturunkan. Proses yang terjadi didalam alat ekspansi diasumsikan dalam kondisi adiabatik.

$$h_{\text{ex-in}} = h_{\text{ex-out}} \quad (6)$$

## Evaporator

Evaporator memiliki fungsi untuk menyerap kalor dari suatu ruangan kedalam sistem refrigerasi. Kalor tersebut diserap oleh refrigeran sehingga berubah fasenya dari cair menjadi uap. Besarnya kalor yang mampu diserap ini disebut dampak refrigerasi.

Jumlah kalor yang diserap oleh evaporator ditentukan dengan persamaan :

$$Q_e = (h_{\text{evap-out}} - h_{\text{evap-in}}) \quad (7)$$

$Q_e$  = kalor yang diserap evaporator dari ruangan ke sistem (kJ/kg)

$h_{\text{evap-out}}$  = entalpi refrigerant keluar evaporator

$h_{\text{evap-in}}$  = entalpi refrigerant masuk ke evaporator

Pada siklus refrigerasi juga perlu diketahui laju aliran massa refrigeran yang mengalir. Laju aliran massa adalah besaran yang menentukan seberapa banyak massa yang mengalir tiap satuan waktu. Laju aliran massa dapat dicari dengan membagi kapasitas refrigerasi dengan dampak refrigerasi:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{Q_e} \quad (8)$$

Besarnya laju aliran massa juga dapat dicari jika daya kompresor dan selisih entalpi kompresi diketahui. Besarnya adalah sama dengan daya kompresor dibagi dengan selisih entalpi kompresi.

$$\dot{m} = \frac{P}{\Delta h_{\text{comp}}} \quad (9)$$

Dari dampak refrigerasi, dapat dihitung besarnya COP dari sistem refrigerasi. COP dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{W} \quad (10)$$

### 2.7.2 Sistem refrigerasi *cascade*

Sistem refrigerasi *cascade* terdiri dari dua sistem refrigerasi siklus tunggal. Sistem pertama disebut *high-stage* dan sistem kedua disebut *low-stage*. Pada prinsipnya efek refrigerasi yang dihasilkan oleh evaporator *high-stage* dimanfaatkan untuk menyerap kalor yang dilepas oleh kondenser *low-stage* sehingga didapatkan temperatur yang sangat rendah pada evaporator *low-stage*.

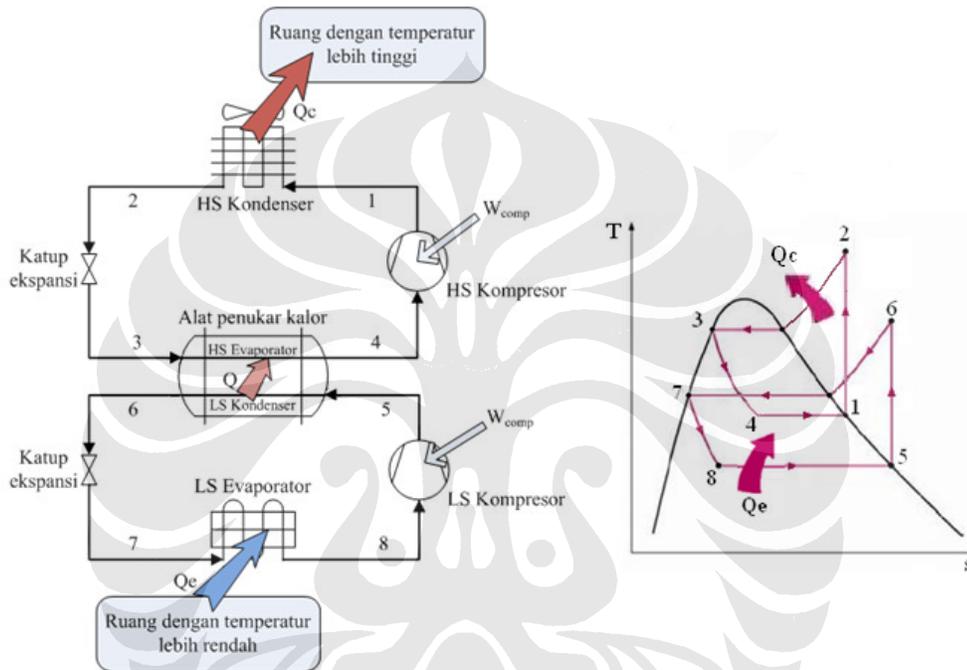
Sistem seperti ini, meskipun akan menghasilkan temperatur yang sangat rendah, namun dapat berdampak pada tingginya daya kompresor yang digunakan karena sistem *cascade* menggunakan dua buah kompresor. Akibatnya, COP yang dihasilkan dapat menjadi rendah. Untuk itu diperlukan optimasi supaya daya kompresor yang dibutuhkan rendah, tanpa mengorbankan tujuan awal yaitu mencapai temperatur evaporasi yang rendah. Pada sistem refrigerasi *cascade*, besarnya selisih entalpi kompresi total didapat dengan menjumlahkan selisih entalpi kompresi pada sistem *high-stage* dan *low-stage*.

$$\Delta h_{\text{comp-total}} = \Delta h_{\text{comp-HS}} + \Delta h_{\text{comp-LS}} \quad (11)$$

Dan nilai COP didapat dengan :

$$\text{COP} = \frac{Q_{eLS}}{\Delta h_{\text{comp-total}}} \quad (12)$$

Dimana  $Q_{eLS}$  adalah kapasitas kalor evaporator pada sistem *low-stage*, dan  $\Delta h_{\text{comp-total}}$  adalah total selisih entalpi kompresi pada kedua kompresor dalam sistem *high-stage* dan *low-stage*.



Gambar 2.9 Siklus refrigerasi *cascade* dan T-s diagram

Proses yang terjadi :

- 1-3 : kompresi adiabatik oleh HS kompresor
- 2-4 : pelepasan kalor pada tekanan konstan oleh HS kondenser
- 3-5 : ekspansi pada entalpi konstan oleh HS alat ekspansi
- 4-1 : penyerapan kalor pada tekanan konstan oleh HS evaporator
- 5-6 : kompresi adiabatik oleh LS kompresor
- 6-7 : pelepasan kalor pada tekanan konstan oleh LS kondenser
- 7-8 : ekspansi pada entalpi konstan oleh LS alat ekspansi
- 8-5 : penyerapan kalor pada tekanan konstan oleh LS evaporator