

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Refrigeran adalah komponen terpenting dalam mesin refrigerasi, refrigeran menyerap panas dari satu lokasi dan membuangnya ke lokasi yang lain melalui mekanisme evaporasi dan kondensasi (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017). Oleh karena itu, sistem refrigeran berperan sebagai media pemindah panas dalam sistem pendingin. Dalam siklus kompresi uap, refrigeran menyerap panas dari ruang atau benda yang di dinginkan, Dalam siklus refrigerasi, refrigeran menjalankan fungsinya sebagai fluida kerja yang mengalami perubahan fasa dari cair menjadi uap, kemudian dari fasa uap kembali menjadi fasa cair, sehingga merupakan suatu siklus aliran yang tertutup, kecuali siklus refrigerasi yang menggunakan udara sebagai refrigerannya, dimana fasa refrigeran tetap dalam fasa gas (Faozan, 2015).

Refrigeran memiliki peran penting dalam siklus pendinginan terutama pada sistem kompresi uap. Persyaratan dalam pemilihan refrigeran untuk unit refrigerasi adalah tekanan penguapan harus cukup tinggi, tekanan pengembunan yang tidak terlampau tinggi, mempunyai volume spesifik yang cukup kecil, koefisien prestasinya tinggi, konduktifitas termal yang cukup tinggi, viskositas yang rendah dalam fasa cair atau uap, tidak mudah terbakar, tidak korosi terhadap logam, tidak beracun, tidak berwarna dan tidak berbau, mempunyai struktur kimia yang stabil, mempunyai titik didih rendah, harus lebih dari temperatur evaporator yang dirancang, mempunyai kalor laten uap yang besar agar jumlah kalor yang diserap di evaporator menjadi besar (Widodo *et al.*, 2022). Telah dilakukan penelitian mengenai penggunaan refrigeran R290 sebagai pengganti R410A pada unit *Air*

conditioner (AC) dengan hasil pengujian cukup baik bila ditinjau dari perhitungan dan analisis energi dan ekserginya (Berkah Fajar *et al.*, 2020).

2.1 Refrigeran

Refrigeran adalah fluida kerja yang bersirkulasi dalam siklus refrigerasi karena menggunakan efek pendinginan dan pemanasan pada mesin refrigerasi dengan menyerap panas dari satu lokasi dan membuangnya ke lokasi yang lain melalui mekanisme evaporasi dan kondensasi.

Pada sistem refrigerasi, perlu diperhatikan beberapa refrigeran yang akan digunakan seperti *chlorofluorocarbons* (CFCs), *amonia*, *hidrokarbon* (*propane*, *ethane*, *ethylene*), karbondioksida, udara dan bahkan air (pada aplikasi diatas titik beku). Sistem termal adalah penentuan sifat-sifat termodinamika. Suatu sifat adalah setiap karakteristik atau ciri dari bahan yang dapat dijabari secara kuantitatif, seperti suhu, tekanan dan rapat massa (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017). Setiap refrigeran memiliki sifat karakteristik yang berbeda yang mempengaruhi efek refrigerasi dan COP (Coefficient of Performance) yang dihasilkan (Purwanto and Ridhuan, 2014)



Gambar 2. 1 Refrigeran

Sumber: (<https://www.sekolahotomasi.com/>)

Gambar 2.1 menunjukan refrigeran, contoh jenis refrigeran dengan tipe R-32, R-290, R-410, dan masih banyak lagi tipe, karakteristik yang mempengaruhi pada pengkondisian udara. Pengkondisian udara yang dimaksudkan adalah untuk memberikan kenyamanan dan kesegaran ruangan yang dikondisikan (Purwanto and Ridhuan, 2014)

2.1.1 Harga Refrigeran

Harga refrigeran CFC (*chlorofluorocarbons*) masih lebih murah dibandingkan dengan harga refrigeran penggantinya (HFC). Adanya CFC ilegal yang masuk ke Indonesia menyebabkan harga refrigeran ini lebih murah dari yang semestinya. Karena CFC dilarang produksi, maka banyak pabrik CFC baru yang beralih memproduksi HFC, dengan demikian produksi CFC berlimpah dan harganya relatif murah dibandingkan dengan refrigeran HFC (*hidrofluorokarbon*) (Widodo, 2024)

2.2 Air Conditioner (AC)

Air Conditioner (AC) merupakan suatu mesin yang berfungsi sebagai pendingin udara yang berada di sekitar mesin pendingin tersebut adalah pengertian Secara umum dari AC (*Air Conditioner*). Dikarenakan refrigeran mudah menguap dan bentuknya bisa berubah-ubah, dari bentuk cair dan gas merupakan alasan dipilihnya gas refrigeran untuk bahan yang di sirkulasikan. Gas refrigeran yang di tekan oleh kompressor dapat menjadi panas pada pipa kondensor dan sirkulasi gas refrigeran di perkecil pada bagian pipa *expantion valve*, sehingga tekanannya dapat semakin meningkat menyebabkan penurunan suhu pada bagian pipa evaporator (Rozaq, Sukoco and Nugroho, 2019).



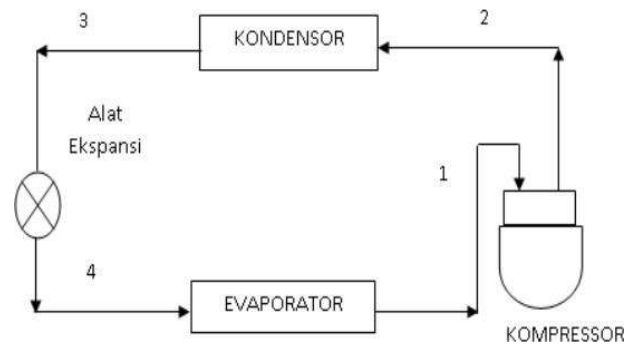
Gambar 2. 2 Air Conditioner

Sumber: (<https://komunita.id/>)

2.3 Siklus Refrigrasi

Refrigeran adalah sebuah zat yang disirkulasi secara terus-menerus melewati komponen utama pada AC (*Air Conditioner*). Selama sistem sirkulasi, refrigeran tidak akan berkurang jika tidak terjadi kebocoran pada sistem. Gas refrigeran akan mengalami perubahan fasa, temperatur dan tekanan. Sirkulasi gas refrigeran dalam unit AC disebut dengan siklus refregerasi kompresi uap (Rozaq, Sukoco and Nugroho, 2019).

Siklus operasional utama pada sistem refrigerasi yaitu kompresi, kondensasi (pengembunan), ekspansi dan evaporasi (penguapan) . Siklus refrigerasi dan analisa kinerja refrigeran pada mesin refrigerasi dapat diamati pada skema instalasi mesin refrigrasi seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.3** Siklus refrigasi standar, **Gambar 2.4** Siklus refrigasi pada mesin refrigerasi, dan **Gambar 2.5** Diagram P-h siklus refrigasi.



Gambar 2. 3 Siklus refrigasi standar

Sumber: (Siagian, 2015)

Setiap komponen utama yaitu **kompresor**, **kondensor**, **katup ekspansi**, dan **evaporator**, ditampilkan pada **Gambar 2.1** Siklus refrigasi standar, berikut penjelasan cara kerjanya :

1. Proses Kompresi (1-2)

Proses ini dilakukan oleh kompresor dan berlangsung secara *isentropik*. Kondisi awal refrigeran pada saat masuk ke dalam kompresor adalah uap jenuh bertekanan rendah, setelah mengalami kompresi refrigeran akan menjadi uap bertekanan tinggi. Karena proses ini berlangsung secara isentropik, maka temperatur ke luar kompresor pun meningkat.

2. Proses Kondensasi (2-3)

Proses ini berlangsung didalam kondensor. Refrigeran yang bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi yang berasal dari kompresor akan membuang kalor sehingga fasanya berubah menjadi cair. Hal ini berarti bahwa di dalam kondensor terjadi pertukaran kalor antara refrigeran dengan lingkungannya (udara), sehingga panas berpindah dari refrigeran ke udara pendingin yang menyebabkan uap refrigeran mengembun menjadi cair.

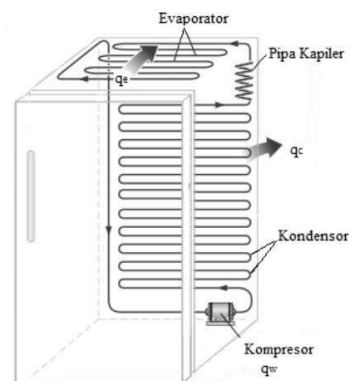
3. Proses Ekspansi (3-4)

Proses ekspansi ini berlangsung secara *isoentalpi*. Hal ini berarti tidak terjadi perubahan entalpi tetapi terjadi drop tekanan dan penurunan temperatur, proses penurunan tekanan terjadi pada katup ekspansi yang berbentuk pipa kapiler yang berfungsi untuk mengatur laju aliran refrigeran dan menurunkan tekanan.

4. Proses Evaporasi (4-1)

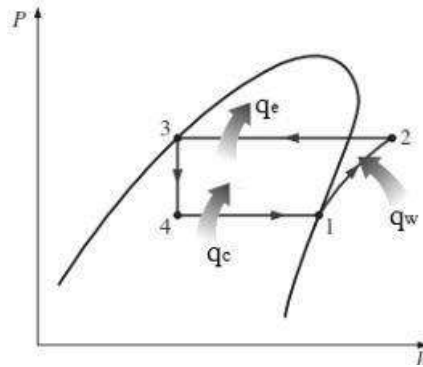
Proses ini berlangsung secara *isobar isothermal* (tekanan konstan, temperatur konstan) di dalam evaporator. Panas dari dalam ruangan akan diserap oleh cairan refrigeran yang bertekanan rendah sehingga refrigeran berubah fasa menjadi uap bertekanan rendah. Kondisi refrigeran saat masuk evaporator sebenarnya adalah campuran cair dan uap.

(Nasution *et al.*, 2024)



Gambar 2. 4 Siklus refrigasi pada mesin refrigasi

Sumber: (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017)



Gambar 2. 5 Siklus refrigrasi pada diagram P-h

Sumber: (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017)

2.4 Komponen Pada Siklus Refrigrasi

Pada **Gambar 2.3**, **Gambar 2.4**, **Gambar 2.5** merupakan gambar dari siklus siklus refrigasi, berikut ini merupakan penjelasan mengenai komponen - komponen yang terdapat pada sistem refrigerasi.

2.4.1 Kompresor

Kompresor bekerja membuat perbedaan tekanan, sehingga bahan pendingin dapat mengalir dari satu bagian ke bagian yang lain dalam sistem, karena ada perbedaan tekanan antara sisi tekanan tinggi dan sisi tekanan rendah, maka bahan pendingin dapat mengalir melalui alat pengatur bahan pendingin ke evaporator (Siagian, 2015).



Gambar 2. 6 Kompresor

Sumber: (<https://filebroker-cdn.lazada.co.id/>)

Gas Refrigeran akan masuk ke kompresor melalui pipa dan masuk pada kompresor (intake) dimana terjadi proses kompresi. Gas refrigeran berbentuk gas atau uap, bertekanan rendah dan bertemperatur rendah (Rozaq, Sukoco and Nugroho, 2019). Uap refrigeran tersebut menjadi bertekanan tinggi sebagai akibat dari kerja yang diberikan kompresor kepada refrigeran (W) (Erwin Bunnoto, 2019). Kompresi ini menyebabkan tekanan gas meningkat secara signifikan. Dalam proses kompresi, energi diberikan kedalam uap refrigeran (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017).

2.4.2 Kondensor

Kondensor merupakan komponen pada sistem refrigasi yang berfungsi untuk membuang kalor dan mengubah fasa bahan pendingin dari gas menjadi cair. Selain itu kondensor juga digunakan untuk mengkondensasi bahan pendingin gas dari kompresor dengan suhu tinggi dan tekanan tinggi (Siagian, 2015). **Gambar 2.7** merupakan komponen kondensor pada AC (*Air Conditioner*).



Gambar 2. 7 Kondensor

Sumber: (<https://www.abangbenerin.com/blog>)

Proses kondensasi dimulai pada saat gas refrigeran meninggalkan kompresor. Gas refrigeran akan menuju kondensor dalam fasa gas bertekanan dan

bertemperatur tinggi. Fasa gas refrigeran akan berubah menjadi fasa cair di dalam kondensor. Panas yang dihasilkan dari refrigeran akan dipindahkan ke udara di luar pipa kondensor. Supaya proses kondensasi lebih efektif, digunakan sebuah kipas (*fan*) yang mampu menghembuskan udara ke luar sehingga panas pada refrigeran dapat dipindahkan ke udara luar. Selanjutnya, refrigeran akan dialirkan menuju pipa kapiler. Setelah melalui proses kondensasi, gas refrigeran berfasa cair bertemperatur lebih rendah, tetapi tekanan refrigeran masih tinggi (Rozaq, Sukoco and Nugroho, 2019). Pada **Gambar 2.3** dan **Gambar 2.5**, kondensasi dapat dilihat pada proses 2-3, sehingga kinerja kondensor dapat diketahui dari selisih antara entalpi pada titik 2 dan titik 3 (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017).

2.4.3 Katup Ekspansi

Katup ekspansi ini digunakan untuk menurunkan tekanan dan untuk mengekspansikan secara adiabatik cairan yang bertekanan dan bertemperatur tinggi sampai mencapai tingkat tekanan dan temperatur rendah, atau mengekspansikan refrigeran cair dari tekanan kondensasi ke tekanan evaporasi, refrigeran cair diinjeksikan keluar melalui orifice, refrigeran segera berubah menjadi kabut yang tekanan dan temperaturnya rendah (Siagian, 2017). Jenis alat ekspansi yaitu pipa kapiler, terbuat dari pipa tembaga dengan lubang dalam yang sangat kecil. Panjang dan lubang kapiler dapat mengontrol jumlah bahan pendingin yang mengalir ke evaporator. Selain itu, jenis yang paling populer untuk sistem refrigerasi berukuran sedang adalah katup berkendali lanjut panas atau katup ekspansi termostatik.



Gambar 2. 8 Pipa Kapiler

Sumber: (<https://glasswareindonesia.wordpress.com/>)

ComforPlanet
Cooling, Heating, Life



Gambar 2. 9 Katup Ekspansi Termostatik

Sumber: (<https://id.made-in-china.com/>)

Pada **Gambar 2.3** dan **Gambar 2.5** di tunjukan pada titik 3 ke titik 4, alat ekspansi menurunkan suhu dan tekanan sebelum masuk ke titik 4 yaitu evaporator.

2.4.4 Evaporator

Evaporator merupakan tempat terjadinya proses evaporasi atau penguapan yang digunakan pada mesin refrigerasi. Evaporator memiliki bentuk pipa bersirip plat. Tekanan cairan refrigeran yang diturunkan pada katup ekspansi didistribusikan secara merata kedalam evaporator oleh refrigeran. Refrigeran akan menguap dan menyerap kalor dari udara ruangan yang dialirkan melalui permukaan luar pipa evaporator. Jadi cairan refrigeran diuapkan secara berangsur-angsur karena

menerima kalor sebanyak kalor laten penguapan selama mengalir di dalam setiap pipa dari koil evaporator (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017). **Gambar 2.10**



Gambar 2. 10 Evaporator pada Air Conditioner merupakan komponen evaporator pada *Air conditioner*.

Sumber: (<https://padimassejahtera.com/>)

Pada **Gambar 2.3** dan **Gambar 2.5** di tunjukan pada titik 4 ke titik 1, evaporasi dapat dilihat pada proses 4-1, sehingga kinerja evaporator dapat diketahui dari selisih antara *entalpi* pada titik 1 dan titik 4 (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017)

2.5 Jenis - Jenis Refrigeran

2.5.1 Chlorofluorocarbon (CFC)

CFC adalah molekul yang terdiri dari klorin, fluor dan carbon. Klorin ini dapat merusak lapisan ozon di daerah stratosfir yang berjarak ± 40 km dari bumi. Refrigeran ini memiliki rendah senyawa toksik, tidak mudah korosif, kompatibel terhadap semua jenis material, dan tidak mudah terbakar. Contoh refrigeran CFC adalah R12, R11.

2.5.1 Hydrochlorofluorocarbon (HCFC)

HCFC adalah refrigeran yang terdiri dari molekul yang terdiri dari chloro, fluoro, carbon dan hydrogen. HCFC kurang stabil dibandingkan dengan CFC yang

merusak lapisan ozon dan pada tingkat yang lebih rendah. Refrigeran HCFC ini merupakan refrigeran transisi pengganti CFC dengan nilai ODP lebih rendah dari CFC. Jenis refrigeran HCFC ini adalah R22 yang digunakan pada AC-split.

2.5.2 Hydrofluorocarbon (HFC)

HFC hanya mengandung atom Hidrogen, fluor, dan karbon. HFC ini tidak mengandung chlor sehingga tidak merusak lapisan ozon, tetapi masih mengandung Fluoro sehingga masih menimbulkan pemanasan global yang dapat meningkatkan gas rumah kaca. Contoh refrigeran kelompok HFC adalah R134A, R32 digunakan pada kulkas, dispenser, AC-Mobil dan AC-split.

2.5.3 Hydrocarbon (HC)

Refrigeran hidrokarbon terbuat dari bahan alami, tidak mengandung Chlorin dan Fluoro, sehingga refrigeran hidrokarbon ini disebut refrigeran yang ramah terhadap lingkungan. Refrigeran HC ini memiliki sifat mudah terbakar (flammable) pada kondisi ambang batas tertentu batas ambang bawah LFL: 2 dan UFL: 10%. Refrigeran hidrokarbon yang digunakan untuk penelitian yaitu R290 (Propane). (Widodo, 2024)

Refrigeran yang pertama kali digunakan adalah eter oleh Perkins pada mesin kompresi uap. Selanjutnya pada tahun 1874 digunakan *sulfur dioksida* (SO₂), dan pada tahun 1875 mulai digunakan *ethyl chloride* (C₂H₅Cl) dan *ammonia*. Selanjutnya metil khlorida (CH₃Cl) mulai digunakan tahun 1878 dan *karbon dioksida* (CO₂) tahun 1881. *Nitrogen oksida* (N₂O₃) dan 14 hidrokarbon (CH₄, C₂H₆, C₂H₄, dan C₃H₈) banyak digunakan sekitar tahun 1910 sampai 1930. *Dichloromethane* (CH₂Cl₂), *dichloroethylene* (C₂H₂Cl₂) dan monobromomethane (CH₃Br) juga digunakan sebagai refrigeran pada mesin sentrifugal. Penggunaan

refrigeran yang disebutkan diatas tidak lagi digunakan setelah ditemukannya CFC dengan merek dagang *freon* oleh *E.I. du Pont de Nemours and Co.* pada sekitar tahun 1930-an, dan menjadi sangat populer sampai dengan tahun 1985. Refrigeran ini disebut sebagai refrigeran halokarbon (*halogenated hydrocarbon*) karena adanya unsur-unsur Chloro, fluoro, carbon (CFC) (Widodo, 2024) Alternatif lain yang ditawarkan adalah refrigeran jenis hidrokarbon.

Hidrokarbon sudah dikenal masyarakat sejak 1920 di awal teknologi refrigerasi bersama fluida kerja natural lainnya seperti *ammonia*, dan *karbon dioksida*. Hidrokarbon yang sering dipakai sebagai refrigeran adalah *propana* (R-290), *isobutana* (R-600a), *n-butana* (R-600). Campuran yang sering digunakan di antaranya R-290/600a, R-290/600 dan R-290/R-600/R-600a. Hidrokarbon memiliki beberapa kelebihan seperti ramah lingkungan, yang ditunjukkan dengan nilai *Ozone Depleting Potential* (ODP) nol, dan GWP yang dapat diabaikan, properti termofisika dan karakteristik perpindahan kalor yang baik, kerapatan fasa uap yang rendah, dan kelarutan yang baik dengan pelumas mineral. Pemakaian hidrokarbon dengan isu hemat energi dan ramah lingkungan masih belum bisa diterima secara luas seperti pemakaian freon sebagai refrigeran. Hal ini disebabkan oleh kekhawatiran masyarakat akan sifat hidrokarbon yang bisa terbakar. Refrigeran dapat dikelompokkan ke dalam jenis senyawa seperti senyawa hidrokarbon, senyawa anorganik, dan senyawa halokarbon. Senyawa halokarbon merupakan senyawa sintetik yang diturunkan dari senyawa hidrokarbon (Dwinanto, 2023). **Tabel 2.1** menunjukan jenis, nama kimia, formula, refrigeran, *Global Warming Potential* (GWP), *Ozone Depletion Potential* (ODP).

Tabel 2. 1 Jenis Refrigiran

No.	Nama	Jenis	Nama Kimia	Formula	GWP	ODP
1	R-32	HFC	<i>Difluorometana</i>	CH_2F_2	677	0
2	R-290	HC	<i>Propane</i>	C_3H_8	3	0
3	R-410A	HFC	<i>Difluorometana, dan pentafluoroetana</i>	50% CH_2F_2 50% CH_2CF_3	2088	0

Sumber: (Kenney *et al.*, 2016)

Tabel 2.1 menunjukan pada jenis berbeda pada jenis R-290 menggunakan jenis HC (Hidrokarbon), dan R-32,R-410A menggunakan HFC (*hidrofluorokarbon*).

2.6 Refrigeran Zat Tunggal

2.6.1 R-32 (Difluorometana)

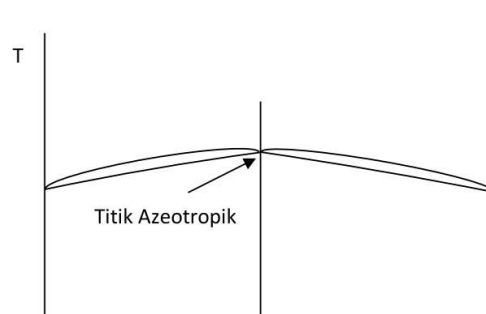
R-32 (*Difluorometana*) adalah salah satu jenis refrigeran *hidrofluorokarbon* (HFC) yang banyak digunakan dalam sistem pendingin udara atau AC (*air conditioner*) dan pompa panas (*heat pump*). Refrigeran R-32 ditemukan oleh Daikin Jepang dan mulai digunakan pada tahun 2013. R-32 lebih baik dari R-410A dalam hal potensi pemanasan global, akan tetapi masih merupakan jenis refrigeran HFC (Sengge, Dwinanto and Tobe, 2022). Jenis media pendingin R-32 lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan media pendingin jenis R-410A dan memiliki potensi pemanasan global yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan jenis R22 dan R410A. Menurut (Pratama *et al.*, 2021) refrigeran R-32 (*Propane*) memiliki *massa* per molekul sebesar 52.0 gram. Walaupun memiliki potensi yang mudah terbakar, media pendingin jenis ini masih aman untuk digunakan sebagai media pendingin dimesin pendingin rumah tangga (Muhammad *et al.*, 2021).

2.6.2 R-290 (Propane)

R-290(*Propane*) merupakan salah satu bahan pendingin dari bahan alami tidak mengandung bahan perusak ozon (BPO) dan memiliki kandungan Global Warming Potential (GWP) sangat kecil, Untuk jenis refrigeran ini memiliki nilai $ODP = 0$ dan $GWP = 3.3$. Keunggulan dari R-290 memiliki massa jenis lebih rendah dibandingkan dengan R32, dapat menghemat jumlah pengisian pada unit $AC \pm 30\%$ dari jumlah refrigeran sebelumnya pada volume yang sama (Widodo *et al.*, 2022). Refrigeran R-290 (*propane*) termasuk dalam kategori hidrokarbon (HC), yang memiliki sifat paling mudah terbakar dengan perbandingan jenis HFC (*hidrofluorokarbon*) yaitu R-32, dan R-410A.

2.7 Refrigeran Zat Campuran Azeotropic

Campuran *azeotrop* adalah campuran dua komponen atau lebih yang memiliki komposisi fase cair dan gas dalam kesetimbangan yang identik (Raytama, Hartanto and Santoso, 2021). Refrigeran ini pada konsentrasi, tekanan dan temperatur tertentu bersifat azeotropik, yaitu mengembun dan menguap pada temperatur yang sama, sehingga mirip dengan refrigeran tunggal (Widodo, 2024). Oleh karena itu, campuran *Azeotropic* dapat dilihat dengan menggunakan Diagram T-X, grafik yang menggambarkan hubungan antara suhu (T) dan komposisi (X) suatu campuran zat refrigeran pada tekanan konstan.



Gambar 2. 11 Diagram T-X Campuran Azeotropic

Sumber: (Widodo, 2024)

Pada **Gambar 2.11** Diagram T-X campuran Azeotropic menunjukan titik di mana campuran dua zat memiliki komposisi tertentu sehingga menguap dan mengembun pada suhu yang sama tanpa perubahan komposisi. Sumbu vertikal (T) Suhu atau *Temperature* ($^{\circ}\text{C}/\text{K}$), dan sumbu horizontal (X) menunjukan komposisi campuran zat sampai garis (XA), dimana garis menunjukan titik *Azeotropic*.

2.7.2 R-410A (Difluorometana & Pentafluoroetana)

R-410A adalah salah satu jenis refrigeran yang banyak digunakan dalam sistem pendingin udara atau AC (*Air Conditioner*) dan pompa panas (heat pump). Refrigeran ini merupakan campuran *azeotropic* yang terdiri dari 50% R-32 (*difluorometana*) dan 50% R-125 (*pentafluoroetana*) berdasarkan massa. Campuran *azeotropic* adalah campuran dua atau lebih refrigeran yang berperilaku seperti zat tunggal. Artinya, komposisinya tetap konstan saat mengalami perubahan fase (penguapan dan kondensasi), sehingga tidak ada temperature glide yang signifikan. Jenis media pendingin ini umumnya digunakan pada tipe *Air Conditioner inverter*. Berbeda dengan jenis refrigeran R-22, media pendingin jenis ini tidak memiliki perusakan ozon. Sedangkan untuk potensi pemanasan global, media pendingin jenis ini memiliki nilai yang cukup tinggi dibandingkan dengan jenis R-22. Sama dengan jenis R22, jenis media pendingin R-410A ini juga tidak mudah terbakar (Muhammad *et al.*, 2021). R-410A memiliki kekurangan, yaitu nilai GWP yang tinggi sebesar 2088. Dari sudut pandang ini, R-410A juga menghadapi tantangan untuk dikurangi penggunaannya secara bertahap, di mana telah menjadi perhatian yang menarik bagi para peneliti untuk melakukan penelitian dalam mencari pengganti R-410A (Fajar *et al.*, 2022)

2.8 Karakteristik Mendekati R-410A

Refrigeran R-32 dan R-290 memiliki potensi sebagai refrigeran pengganti R-410A dikarenakan dampak pemanasan global atau GWP (*Global Warming Potential*) yang rendah. Terdapat peluang cukup besar untuk melakukan pencampuran kedua refrigeran antara R290 dengan R32 atau dengan refrigeran lainnya dengan komposisi tertentu dan jumlah tertentu dengan bantuan software *refprop* (Yang *et al.*, 2021).

Refrigeran hidrokarbon telah banyak digunakan sebagai alternatif pengganti refrigeran sintetis. Dampak positif dari refrigeran hidrokarbon ini memiliki potensi menurunkan GWP (Gupta and Pendyala, 2022). Batas jumlah massa pengisian refrigeran hidrokarbon R290 pada AC-split adalah 0,380 kg/m³ dan R32: 0,306 kg/m³; menurut standar EN 378-1:2016. Pada saat mengisi refrigeran terhadap standar keselamatan kerja dan kondisi ambang batas bawah flammable (LFL), batas atas flammable (UFL) pada kisaran 8–38 g/m³ diperlukan untuk menghindari bahaya kebakaran (Colbourne and Suen, 2021).

2.8.2 Perbandingan Sifat Dasar

Ketiga jenis refrigeran R-32 (*difluorometana*), R-290 (*propane*), R-410 (*difluorometana, pentafluoroetana*) memiliki dampak terhadap Ozon atau ODP (*Ozone Depletion Potential*) sebesar nol, tetapi memiliki dampak pemanasan global yang berbeda. Menurut (Tian, Cai, Ren, Tang, Xie, *et al.*, 2015) refrigeran campuran R-32/R-290 memiliki nilai dampak pemanasan global atau GWP (*Global Warming Potential*) adalah 32,0% dan 78,0% lebih rendah dari pada R32 dan R410A. Artinya, refrigeran campuran lebih ramah terhadap lingkungan. Sementara itu, suhu kritis R-32 /R-290 adalah 20.5% dan 13.0% lebih rendah daripada R32 dan R410A. Dengan suhu penguapan tetap, suhu kritis yang lebih

tinggi biasanya berhubungan dengan kapasitas pendinginan atau pemanasan yang lebih rendah, karena biasanya berhubungan dengan tekanan penguapan yang lebih rendah dan kerapatan fasa gas di bawah suhu penguapan tetap. **Tabel 2.2** juga menunjukkan bahwa pada suhu penguapan 7.2°C, panas laten R32/R290 27.1% lebih besar daripada R410A. Karena panas laten menempati sebagian besar kapasitas pendinginan, panas laten yang lebih besar bermanfaat bagi peningkatan kapasitas pendinginan.

Tabel 2. 2 Jenis, Komposisi, dan Karakteristik Refrigeran

Jenis Refrigeran	R-410A	R-32/R-290
Komposisi	50% R32 50% R125	68% R-32 32% R-290
Karakteristik		
Berat molekul (g/mol)	72.585	49.194
Titik didih normal (°C)	-51.44	-
Suhu kritis (°C)	71.35	62.105
Tekanan kritis (bar)	47.539	62.105
Panas laten pada 7.2 °C (kJ)	212.22	269.77
Panas laten pada 54 °C (kJ)	123.69	123.18

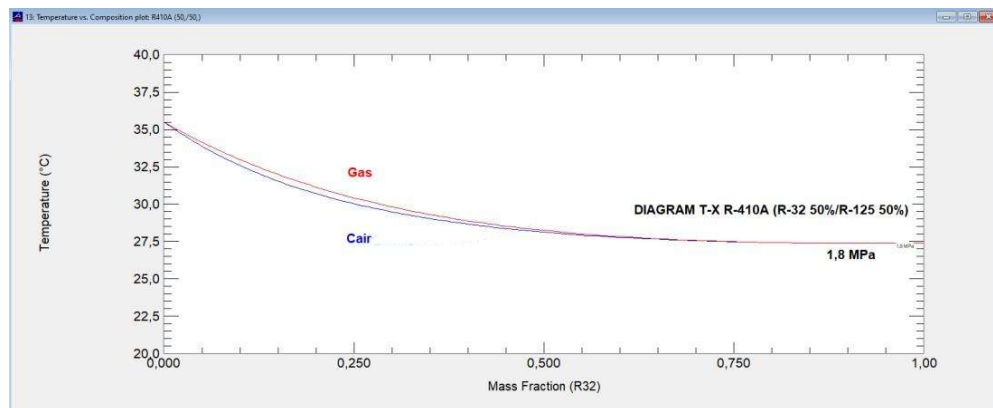
Sumber: (Tian, Cai, Ren, Tang and Xie, 2015)

Tabel 2.2 menunjukan karakteristik pada refrigeran R-32, R-410A, dan campuran R-32/R-290. Berat molekul pada jenis campuran R-32/R-290 memiliki nilai lebih rendah dibanding dengan berat molekul R-410A. Berat molekul merupakan massa total dari atom dalam suatu molekul, yang dihitung berdasarkan jumlah atom dan massa atom relative (A_r) dari masing – masing unsur penyusunnya (Tian, Cai, Ren, Tang, Xie, *et al.*, 2015). Pada jenis refrigeran campuran R-32/R-290 dan R-410A memiliki panas laten varian suhu nya berada pada suhu 7.2 °C, dan 54 °C. Panas laten adalah jumlah panas yang diserap selama perubahan fasa pada komponen tersebut dari satu fasa ke fasa yang lainnya (Umar, 2020). Artinya, jumlah energi panas yang diserap atau dilepaskan oleh refrigeran selama perubahan

fase (misalnya, dari cair ke gas atau gas ke cair) tanpa perubahan suhu. Panas laten sangat penting dalam siklus refrigerasi karena merupakan mekanisme utama untuk menyerap dan melepaskan panas dalam sistem pendinginan.

2.8.3 Grafik T-X Campuran Refrigeran

Pencampuran refrigeran terlebih dahulu membuat simulasi dengan software REFPROP 9.0 bertujuan untuk mengetahui profil kurva hasil pertemuan garis campuran antara garis rasio massa pada R-32 terhadap temperatur ($^{\circ}\text{C}$) (Widodo, 2024). **Gambar 2.10** menunjukkan R410A adalah refrigeran campuran R-32-R-125 dengan komposisi campuran 50%/50% pada tekanan 1,8 Mpa. Tekanan 1,8 MPa (setara dengan 18 bar) adalah pilihan yang relevan karena nilai ini berada dalam rentang tekanan kerja yang umum untuk sisi tekanan tinggi (kondensor) pada sistem AC yang menggunakan R410A atau penggantinya. Terdapat 2 Garis berwarna merah dan biru yang menunjukkan fase gas dan cair.



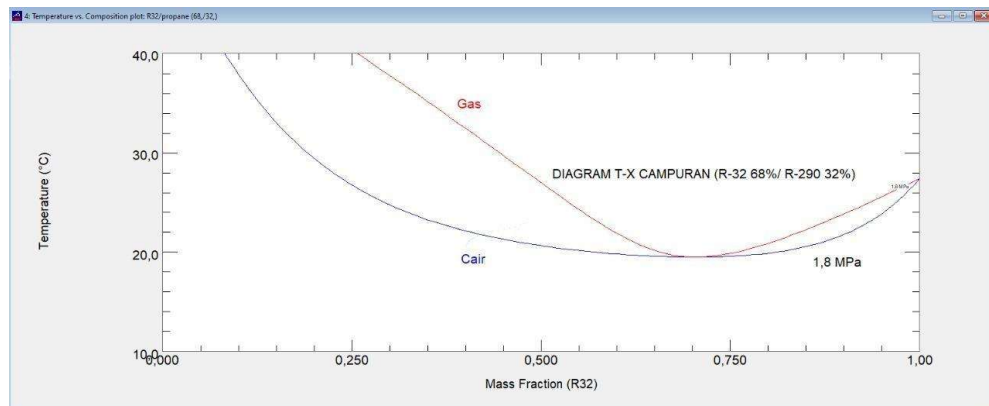
Gambar 2. 12 Diagram T-X R-410A

Sumber: (Aplikasi REFPROP)

2.8.4 Campuran R-32/R-290 dengan komposisi 68/32%

Penentuan rasio pencampuran R-32/R-290 sebesar 68/32% berat dimungkinkan melalui perhitungan suhu titik embun (dew point) dan suhu titik gelembung (bubble point) pada variasi rasio komposisi, sehingga diperoleh nilai pembulatan yang sesuai dengan karakteristik suhu luncur (temperature glide) relatif kecil, mendekati sifat termodinamika refrigeran R-410A. Analisis ini bertujuan untuk memastikan kesesuaian campuran sebagai alternatif ramah lingkungan dengan performa kompatibel (Tian, Cai, Ren, Tang, Xie, *et al.*, 2015).

Menurut (Widodo, 2024), kurva campuran R32-R290 (68%/32%) dimana campuran yang paling mendekati dengan R-410A adalah pada fraksi massa 0,69-0,7 pada temperatur 10°C dengan tekanan 1800 kPa.



Gambar 2. 13 Diagram T-X R-32/R-290

Sumber: (Aplikasi REFPROP)

2.8.5 Perhitungan Muatan *Hidrocarbon*

Menurut (Colbourne, 2010) menentukan ukuran muatan refrigeran HC dapat dilakukan dengan menggunakan acuan muatan refrigeran yang ada. Oleh karena itu, dapatkan informasi ukuran muatan refrigeran saat ini dari papan data (*data-plate*) peralatan (*Mds*). Kemudian, dengan menggunakan faktor koreksi (*Cf*). Pada **Tabel 2.2**, menunjukan perkiraan massa setara untuk refrigeran HC yang dipilih dengan persamaan (2.1)

$$M_{HC} = M_{dp} - Cf \quad (2.1)$$

Keterangan :

M_{HC} = Massa Hidrokarbon yang dibutuhkan (gram)

M_{dp} = Papan data (gram)

Cf = Faktor koreksi

Tabel 2. 3 Faktor Konversi Refrigeran HC

Jenis Refrigeran	Refrigeran HC				
	R600a	R600a/290 (50%/50%)	R290	R290/R170 (94%/6%)	R1270
CFC - 12	(0,43) †	0,40	n/a	n/a	n/a
HFC – 134A	(0,47) †	0,45	n/a	n/a	n/a
HFC – 1234yf	(0,53) †	0,50	n/a	n/a	n/a
HCFC – 22	n/a	n/a	0,42	0,41	0,42
HFC – 407C	n/a	n/a	0,45	0,44	0,45
HFC – 404A	n/a	n/a	0,51	0,50	0,52
HFC – 507A	n/a	n/a	0,51	0,50	0,52
HFC – 410A	n/a	n/a	(0,51) †	(0,50) †	(0,52) †

Sumber: (Colbourne, 2010)

Keterangan :

† = Membutuhkan modifikasi kompresor

n/a = Refrigeran HC tidak cocok diaplikasi pada sistem yang telah menggunakan refrigeran tersebut.

2.8.6 Penggunaan Jenis Oli

Penggunaan jenis oli perlu dipertimbangkan apakah oli pelumas R410A kompatibel dengan R32/R290. Oli pelumas jenis POE (Polyolester) biasanya digunakan pada kompresor R410A karena kesesuaiannya yang baik dengan HFC dan campuran HFC. Diketahui bahwa R410A terdiri dari R32 dan R125 dengan proporsi 50%/50% berat. Sebagai komponen penting dari R410A dan juga sebagai refrigeran jenis HFC, R32 oleh karena itu memiliki kesesuaian yang relatif baik dengan oli POE. Literatur juga menunjukkan bahwa oli POE memiliki kesesuaian yang baik dengan hidrokarbon, meskipun umumnya diperlukan tingkat viskositas yang lebih tinggi untuk hidrokarbon (Tian, Cai, Ren, Tang, Xie, *et al.*, 2015). Rekomendasi penggunaan jenis oli refrigeran oleh produsen oli kompresor sesuai dengan jenis bahan pendingin yang digunakan pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2. 4 Penggunaan Jenis Oli Refrigeran

Jenis Refrigeran	Polyalphaolefin and alkyl benzene (POA/AB)			Alkyl Benzene (AB)			Naphtenic (N)				Synthetics Polyol Ester (POE)		
	Q8Stravinsky 32 ISO VG 32	Q8Stravinsky 46 ISO VG 46	Q8Stravinsky 68 ISO VG 68	Q8Stravinsky AB32 ISO VG 32	Q8Stravinsky AB100 ISO VG 100	Q8Stravinsky AB68 ISO VG 68	Q8Stravinsky N 100 ISO VG 100	Q8Stravinsky N 32 ISO VG 32	Q8Stravinsky N 46 ISO VG 46	Q8Stravinsky N 68 ISO VG 68	Q8Stravinsky POE 32 ISO VG 32	Q8Stravinsky POE 68 ISO VG 68	Q8Stravinsky POE 100 ISO VG 100
CFC-R22				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
HFC-R32											✓	✓	✓
HFC-R410A											✓	✓	✓
R290											✓	✓	✓
R717	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓			

2.8.7 Tingkat Keamanan

Flammability atau mudah terbakar pada refrigeran diklasifikasikan oleh ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). **Tabel 2.5** Perbandingan Flammability Pada Jenis Refrigeran R-32, R2- 90, R-410A.

Tabel 2. 5 Perbandingan flammability jenis refrigeran

NO	Refrigeran	Kelas keamanan
1.	R-32	A2L
2.	R-290	A3
3.	R-410A	A1

Sumber: (*Kennoy et al., 2016*)

Tabel 2.5 menunjukkan tingkat keamanan pada refrigeran, menurut ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) (*Kennoy et al., 2016*), keterangan pada kelas keamanan sebagai berikut ini :

1. A1 : Tidak mudah terbakar.
2. A2L : Mudah terbakar rendah.
3. A2 : Mudah terbakar sedang.
4. A3 : Sangat mudah terbakar.

Refrigeran R290 dan R32 memiliki sifat *flammable* dengan kategori A3/A2L dengan batas LEL (*Lower Explosive Limit*) = $0.038 \text{ kg/m}^3/0.0306 \text{ kg/m}^3$ dan UEL (*Upper Explosive Limit*) = $0.171 \text{ kg/m}^3/0.710 \text{ kg/m}^3$ dan *practical limit* = $0.008 \text{ kg/m}^3/0.061 \text{ kg/m}^3$ (Tian, Cai, Ren, Tang and Xie, 2015). Batas LEL atau (*Lower Explosive Limit*) merupakan konsentrasi minimum gas atau uap di udara yang dapat terbakar jika terkena sumber api. Konsentrasi R-290 di udara kurang dari 0.038 kg/m^3 , maka tidak akan terbakar meskipun ada sumber nyala.

Batas UEL (*Lower Explosive Limit*) konsentrasi gas pada R-290 melebihi 0.171 kg/m³, maka tidak akan terbakar karena terlalu banyak gas dan terlalu sedikit oksigen.

R32 dan R290 masing-masing ditetapkan sebagai kelas Tingkat keamanan pada A2L dan A3. Kisaran terjadi nya ledakan untuk R32 adalah sekitar 14,4% sampai 29,3% volume, dan untuk R290 sekitar 2,1% sampai 9,5% volume, yang jauh lebih parah. Ini berarti bahwa dibandingkan dengan R32, meskipun R290 memiliki GWP yang sangat rendah, namun lebih mudah terbakar (Tian, Cai, Ren, Tang, Xie, *et al.*, 2015). Sebagai Upaya yang dilakukan dalam menghindari terjadinya suatu kebakaran (*flammable*) pada unit AC *split* dengan menggunakan R-32 salah satunya harus mematuhi SOP yang telah ditetapkan pada saat bekerja. Oleh karena itu, untuk menghindari potensi terjadinya flammable dan dilakukan simulasi jika terjadi kebocoran pada pipa dan sambungan-sambungan pipa, dengan memperhatikan sirkulasi ventilasi yang cukup dan selalu memperhatikan aspek safety penggunaan R-290 direkomendasikan untuk digunakan pada unit AC-split di rumah tangga (Tang *et al.*, 2018).

Oleh karena itu, untuk pengisian optimal R32/R290 dengan aspek kewanaman, dan mendekati karakteristik R410A, perlu dilakukan batasan campuran sebesar 65% dari R410A (Tian, Cai, Ren, Tang, Xie, *et al.*, 2015)

2.9 Perhitungan Sistem Refrigasi

Perhitungan beban pendinginan merupakan hal yang utama dalam perancangan sistem pengkondisian udara. Hasil perhitungan tersebut dapat menentukan berapa besar kapasitas mesin refrigerasi yang dibutuhkan agar mampu mengkondisikan udara di dalam suatu ruangan sehingga terasa nyaman (Purwanto and Ridhuan, 2014)

2.9.2 Efek Refrigerasi

Proses evaporasi terjadi pada evaporator atau penguap yang digunakan pada mesin refrigerasi berbentuk pipa bersirip plat. Tekanan cairan refrigeran yang diturunkan pada katup ekspansi, distribusikan secara merata kedalam evaporator oleh refrigeran. Refrigeran akan menguap dan menyerap kalor dari udara ruangan yang dialirkan melalui permukaan luar pipa evaporator. Cairan refrigeran diuapkan karena menerima kalor sebanyak kalor laten penguapan selama mengalir di dalam setiap pipa dari koil evaporator. **Gambar 2. 1** Siklus refrigerasi standar, dan **Gambar 2. 3** Siklus refrigrasi pada diagram P-h evaporasi dapat dilihat pada proses 4 sampai 1, sehingga kinerja evaporator dapat diketahui dari selisih antara entalpi pada titik 1 dan titik 4.

Hukum pertama dinamika, adalah menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Hukum kekekalan energi diterapkan dalam sistem termodinamika. Kalor yang diterima di evaporator (q_e), persatuan massa refrigeran dapat dituliskan dengan sebagai berikut (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017) :

$$Q_{in} = (h_1 - h_4) \quad (2.2)$$

Keterangan :

$\dot{m}$ = Massa Laju Aliran (kg/s)

P_{input} = Daya kompresor (kW)

W_k = Kerja Kompresor (kJ/kg)

2.9.3 Kerja Kompresor

Kerja kompresor dihitung dari selisih antara entalpi refrigeran keluaran dan masukan kompresor dikalikan dengan massa refrigeran yang melewatinya (Fajar *et al.*, 2022). Besarnya kerja kompresi tersebut dapat dituliskan berdasarkan Hukum pertama termodinamika.

Hukum pertama termodinamika, adalah prinsip kekekalan energi yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, tetapi hanya dapat diubah bentuknya. Energi listrik yang dikonsumsi oleh kompresor diubah menjadi energi internal refrigeran. **Gambar 2.5** Diagram siklus refrigasi yaitu Tekanan – Entalphy (P-h) kerja kompresi oleh kompresor dapat dituliskan dengan sebagai berikut (Amrullah, Djafar and Piarah, 2017) :

$$Q_w = (h_2 - h_1) \quad (2.3)$$

Keterangan :

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

h_2 = Entalpi refrigeran keluar kompresor (kJ/kg)

h_1 = Entalpi refrigeran masuk kompresor(kJ/kg)

2.9.4 Laju Aliran Massa

Berdasarkan kapasitas pendinginan dapat ditentukan laju aliran massa refrigeran dengan menggunakan persamaan (2.4) (Sengge, Dwinanto and Tobe, 2022) :

$$\dot{m} = \frac{P_{input}}{Q_w} \quad (2.4)$$

Keterangan :

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

P_{input} = Daya kompresor (kW)

Q_w = Kerja kompresor (kJ/kg)

2.9.5 Kapasitas Refrigrasi

Kapasitas refrigrasi merupakan laju aliran panas yang melewati evaporator dengan proses pada titik 4 menuju titik 1 sesuai dengan siklus kompresi uap. Kapasitas refrigrasi sama dengan perkalian laju aliran massa refrigeran dengan entalpi pada evaporator. Sedangkan untuk volume atur yang melingkupi pada sisi refrigeran didalam evaporator, kesetimbangan laju aliran massa dan energi tereduksi untuk memberikan laju perpindahan panas persatuan massa dari aliran refrigeran. Perpindahan panas yang terjadi per satuan massa ini disebut dengan efek refrigrasi. Berikut adalah persamaan (2.5) (Widodo, 2024):

$$Q_{evap} = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (2.5)$$

Keterangan :

Q_{evap} = Kinerja evaporator (W)

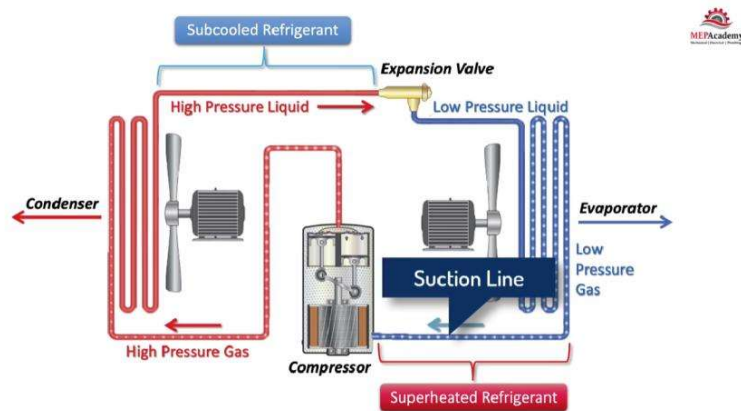
$\dot{m}$ = Laju aliran massa (kg/s)

h_1 = *Enthalpy* refrigeran masuk kompresor (kJ/Kg)

h_4 = *Enthalpy* refrigeran keluar ekspansi (kJ/Kg)

2.9.6 Temperature Subcooling & Superheating

Parameter yang mempengaruhi kinerja AC yang beroperasi berdasarkan siklus refrigerasi kompresi uap adalah temperatur *subcooling* di kondensor dan *superheating* di evaporator (Bunganaen, 2022). Pada **Gambar 2.12** menunjukan penjelasan mengenai *subcooling*, dan *superheating* pada sistem pendinginan.



Gambar 2. 14 Skema sistem AC

Sumber : (MEP, Academy)

Superheating (panas lanjut) adalah temperatur refrigeran fasa uap yang berada di atas titik didihnya pada tekanan tertentu. Dengan kata lain, nilai superheat menunjukkan jumlah kalor yang diserap oleh refrigeran setelah seluruhnya berubah fasa menjadi uap di dalam evaporator. Pengukuran nilai superheat dapat dilakukan *suction line*, bertujuan untuk memastikan bahwa hanya refrigeran fasa uap yang diisap oleh kompresor. Kondisi ini sangat penting untuk melindungi kompresor dari kerusakan akibat adanya refrigeran fasa cair. Sebagai contoh, apabila titik didih refrigeran pada tekanan tertentu adalah 40°F (4,4°C) dan temperatur aktual pada

pipa terukur sebesar 55°F (12,8°C), maka nilai *superheating* nya adalah 15°F (8,3°C). Nilai ini didapat dari selisih antara temperatur aktual dan titik didihnya (55°F - 40°F = 15°F). Perhitungan *superheating* terdapat di persamaan (2.6) (Bunganaen, 2022) :

$$\Delta T_{SH} = T_{aktual} - T_{saturasi} \quad (2.6)$$

Keterangan :

ΔT_{SH} = Temperatur *Superheating* (°C)

T_{aktual} = Temperatur aktual *suction line* (°C)

$T_{saturasi}$ = Temperatur didih pada tekanan tertentu (°C)

Subcooling adalah proses pendinginan cairan refrigeran di bawah temperatur kondensasi. *Subcooling* memberikan 100% cairan refrigeran untuk masuk ke alat ekspansi, Pengukuran *subcooling* dilakukan pada jalur cair (*liquid line*), tepat sebelum refrigeran masuk ke katup ekspansi. Nilai *subcooling* yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa hanya refrigeran fasa cair, dan bukan gas kilat (*flash gas*), yang memasuki katup ekspansi. Hal ini menjamin efisiensi katup ekspansi dan kinerja sistem pendingin secara keseluruhan. Sebagai contoh, apabila temperatur saturasi refrigeran di kondensor adalah 100°F (37,8°C) dan temperatur aktual pada jalur cair terukur sebesar 90°F (32,2°C), maka nilai *subcooling* nya adalah 10°F (5,6°C). Nilai ini merupakan selisih antara temperatur saturasi dan temperatur aktualnya (100°F - 90°F = 10°F). Perhitungan *subcooling* terdapat di persamaan (2.7) (Bunganaen, 2022) :

$$\Delta T_{SH} = T_{saturasi} - T_{aktual} \quad (2.7)$$

Keterangan :

ΔT_{SC} = Temperatur *Subcooling* (°C)

$T_{saturasi}$ = Temperatur saturasi pada tekanan tertentu (°C)

T_{aktual} = Temperatur aktual *liquid line* (°C)

2.9.7 COP (Coefficient of Performance)

Koefisien kinerja dari sistem pendingin kompresi uap merupakan perbandingan dari efek refrigrasi (Q_{evap}) dengan kerja kompresor (Q_w). Oleh karena itu, perbandingan antara banyaknya kalor yang dapat dikeluarkan dari ruangan yang didinginkan dengan kinerja yang dilakukan kompresor. Semakin tinggi COP mengindikasikan sistem refrigrasi bekerja lebih efisien, COP atau (*Coefficient of Performance*) (Fajar *et al.*, 2022). Semakin tinggi COP mengindikasikan sistem bekerja lebih efisien, COP dilambangkan dengan β . Berikut persamaan dari COP. Berikut persamaan dari COP (*Coefficient of Performance*) (Fajar *et al.*, 2022) :

$$COP = \frac{Q_{in}}{Q_w} \quad (2.8)$$

2.9.8 Metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

Metode MCDM digunakan untuk pengambilan keputusan dengan banyak kriteria. Salah satunya adalah ***TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)***, yang telah diaplikasikan dalam optimasi sistem termal karena:

- Kemampuan menangani kriteria dengan satuan berbeda.
- Mempertimbangkan bobot preferensi untuk setiap kriteria.
- Keunggulan dalam menghasilkan ranking objektif

berikut persamaan yang digunakan (Hwang & Yoon, 1981) :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2.9)$$

Keterangan :

r_{ij} = Nilai preferensi alternatif ke- i .

x_{ij} = x_{ij} untuk kriteria *benefit*.

w_j = $\frac{1}{x_{ij}}$ untuk kriteria *cost*.

Terdapat dua jenis kriteria yaitu **benefit** (keuntungan) dan **cost** (biaya). Semakin tinggi nilai C_i (mendekati 1), semakin baik alternatif tersebut dalam memenuhi semua kriteria yang ditetapkan