

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Refrigerasi

2.1.1 Sistem Refrigerasi pada AC *Split*

Refrigerasi merupakan proses penyerapan kalor dari ruangan bertemperatur tinggi dan pemindahan kalor tersebut ke medium tertentu dengan temperatur yang lebih rendah sehingga didapat temperatur yang diinginkan dan mempertahankan temperatur tersebut di bawah temperatur lingkungan. Singkatnya, refrigerasi adalah suatu proses perpindahan kalor dari temperatur rendah ke temperatur lebih tinggi (Ziliwu, 2020).

Terdapat banyak jenis sistem refrigerasi dengan teknologi yang berbeda-beda. Masing-masing teknologi memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Salah satu yang umum digunakan ialah sistem refrigerasi kompresi uap. Sistem refrigerasi kompresi uap ialah sistem yang berisi fluida penukar kalor (refrigeran) yang bersirkulasi terus menerus. Selama siklus sirkulasi berlangsung, refrigeran akan mengalami perubahan fasa terus menerus.

Proses atau siklus pada mesin refrigerasi kompresi uap meliputi empat proses utama, yaitu kompresi, kondensasi, ekspansi dan evaporasi. Keempat proses tersebut terjadi secara berulang-ulang disertai dengan perubahan fasa refrigeran dari uap menjadi cair dan sebaliknya. Proses ini juga disertai pengambilan kalor dari lingkungan oleh evaporator dan pembuangan kalor ke lingkungan oleh kondensor (Kusnandar, 2020).

Siklus mesin refrigerasi kompresi uap ini digunakan di berbagai sektor industri dari pendingin kecil hingga air conditioning pada *plat* besar. Salah satu aplikasi yang umum ditemui dalam kehidupan sehari-hari ialah pada AC *split* rumah tangga.

2.1.2 Air Conditioner Split (AC Split)

Secara umum, pengertian dari AC *split* yaitu sebuah alat yang berfungsi untuk mengondisikan udara atau dapat dikatakan sebagai alat yang berfungsi sebagai penyejuk udara. Penggunaan AC di maksudkan untuk memperoleh temperatur yang segar dan sejuk serta temperatur yang di inginkan dan nyaman bagi tubuh. Prinsip kerja AC *split* pada bagian kompresor berfungsi sebagai pusat sirkulasi bahan pendingin refrigeran.

AC *Split* bekerja dengan memanfaatkan teknologi penukar panas yang terdiri dari evaporator yang bertugas menghembuskan udara dingin ke dalam ruangan dan unit kondensor yang berfungsi melepaskan panas dari dalam ruangan ke lingkungan luar. Desain ini memungkinkan AC *Split* untuk bekerja dengan tingkat kebisingan yang rendah di dalam ruangan, sehingga meningkatkan kenyamanan pengguna (Wisaksono *et al.*, 2024)

2.2 Komponen AC Split

Komponen-komponen AC *split* terdiri dari kompresor, kondensor, pipa kapiler, termostat, evaporator, dan refrigeran:

2.2.1 Kompresor

Kompresor adalah alat yang digunakan untuk menghisap uap refrigeran dan mengompresinya sehingga tekanan uap refrigeran naik

sampai ke tekanan yang diperlukan untuk pengembunan (kondensasi) uap refrigeran di dalam kondensor.



Gambar 2. 1 Kompresor

2.2.2 Kondensor

Kondensor merupakan alat penukar kalor pada sistem refrigerasi yang berfungsi untuk melepaskan kalor ke lingkungan. Kondensor juga merupakan alat untuk membuat kondensasi bahan pendingin gas dari kompresor dengan suhu tinggi dan tekanan tinggi. Kondensor umumnya adalah sebuah pendingin atau penukar panas yang digunakan untuk berbagai tujuan, memiliki rancangan yang bervariasi, dan banyak ukurannya, dari yang dapat digenggam sampai yang sangat besar. Untuk penempatannya sendiri, kondensor ditempatkan di luar ruangan yang sedang didinginkan, agar dapat membuang panasnya keluar.



Gambar 2. 2 Kondensor

2.2.3 Alat Ekspansi

Alat ekspansi bertujuan untuk menurunkan tekanan cairan refrigeran setelah keluar dari kondensor dan mengatur laju aliran refrigeran yang masuk ke evaporator. Alat ekspansi yang umumnya digunakan adalah pipa kapiler berbentuk koil yang berdiameter sangat kecil, biasanya antara 0,8 mm dan 2,0 mm, dan memiliki panjang antara 1 m dan 6 m. Biasanya, pipa kapiler yang digunakan terbuat dari tembaga. Penggunaan pipa kapiler ini memiliki keuntungan serta kerugian. Keuntungan penggunaan pipa kapiler ini terletak pada bentuknya yang sederhana, sehingga jarang terjadi gangguan, dan relatif murah.



Gambar 2. 3 Pipa Kapiler

2.2.4 Evaporator

Evaporator adalah komponen pada sistem pendingin yang berfungsi sebagai penukar kalor serta bertugas menguapkan refrigeran dalam sistem sebelum dihisap oleh kompresor. Panas udara di sekeliling dihisap oleh kipas yang terdapat pada evaporator. Kemudian udara tersebut bersentuhan dengan pipa/coil evaporator yang di dalamnya terdapat gas

pendingin (*refrigerant*). Kemudian udara tersebut kembali dialirkan keluar evaporator, sehingga suhu udara di sekeliling evaporator turun.



Gambar 2. 4 *Evaporator*

2.2.5 Refrigeran

Refrigeran yaitu fluida atau zat pendingin yang memegang peranan penting dalam sistem pendingin. Refrigeran digunakan untuk menyerap panas melalui perubahan fase dari cair ke gas (evaporasi) dan membuang panas melalui perubahan fase dari gas ke cair (kondensasi). Refrigeran dapat dikatakan sebagai pemindah panas dalam sistem pendingin. Refrigeran mengalami beberapa proses atau perubahan fase (cair dan uap), yaitu refrigeran yang mula-mula pada keadaan awal (cair) setelah melalui beberapa proses akan kembali ke keadaan awalnya.

Pada penelitian ini, refrigeran yang digunakan adalah jenis R32 (*Difluorometana*). R32 merupakan refrigeran generasi baru dari golongan *Hydrofluorocarbon* (HFC) yang memiliki nilai *Ozone Depletion Potential* (ODP) nol dan *Global Warming Potential* (GWP) yang jauh lebih rendah dibandingkan R410A atau R22. R32 dipilih karena memiliki efisiensi termal yang tinggi, kapasitas pendinginan yang lebih besar, dan sifat perpindahan panas yang baik, sehingga sangat mendukung tujuan penelitian ini dalam

meningkatkan kinerja (COP) pada sistem AC *Split* (Daikin, 2022). Selain itu, R32 memiliki karakteristik tekanan kerja yang tinggi sehingga memerlukan material pipa dengan kekuatan yang baik, seperti pipa tembaga yang digunakan dalam rancang bangun alat penukar panas tambahan pada penelitian ini.

Sebagai gambaran perbandingan karakteristik R32 terhadap nilai referigeran lainya dapat dilihat pada tabel:

Tabel 2. 1 Karakteristik Referigeran

Referigeran	ODP	GWP	Tingkat Keamanan
R22	0,05	1810	Tidak mudah terbakar
R32	0,00	675	Mudah terbakar rendah
R410A	0,00	1700	Tidak mudah terbakar
R134A	0,00	0,94	Tidak mudah terbakar

Keterangan :

ODP : Potensi Penipisan Ozon

GWP: Potensi Pemanasan Global

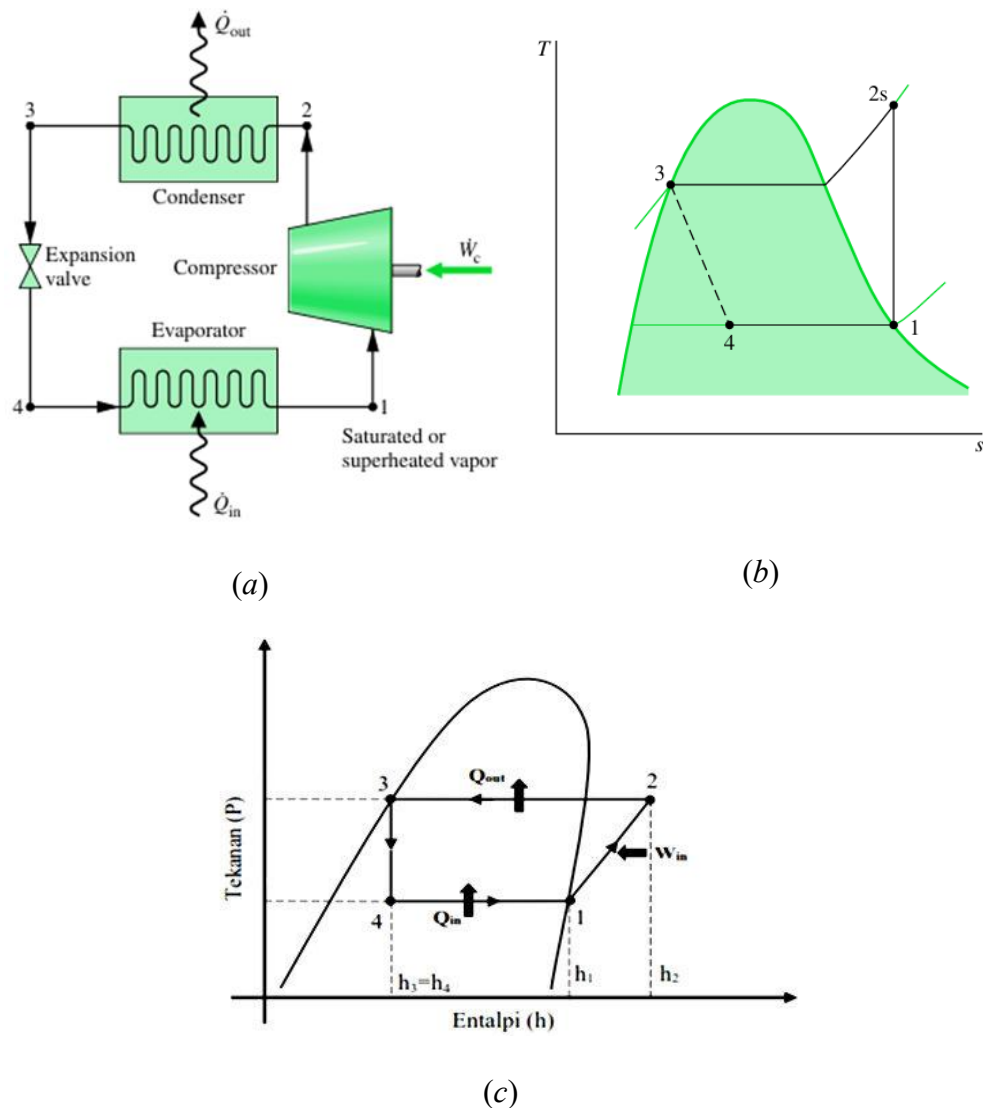


Gambar 2. 5 Refrigeran

2.3 Siklus Kompresi Uap *Air Conditioner Split (AC Split)*

Mesin refrigerasi kompresi uap merupakan jenis mesin refrigerasi yang paling banyak digunakan karena sistemnya yang sederhana dan kinerjanya yang cukup baik. Komponen-komponen utama pada sistem kompresi uap yaitu kompresor, kondensor, evaporator, dan katup ekspansi. Pada siklus ini, uap refrigeran ditekan oleh kompresor, lalu uap tersebut diembunkan menjadi cairan melalui kondensor, kemudian tekanannya diturunkan melalui alat ekspansi agar cairan tersebut dapat menyerap kalor kembali (menguap) pada evaporator.

Pada sistem kompresi uap standar, proses-proses yang terjadi pada sistem tersebut bersifat ideal. Refrigeran mengalami empat proses ideal yang dapat dijelaskan pada diagram di bawah ini :



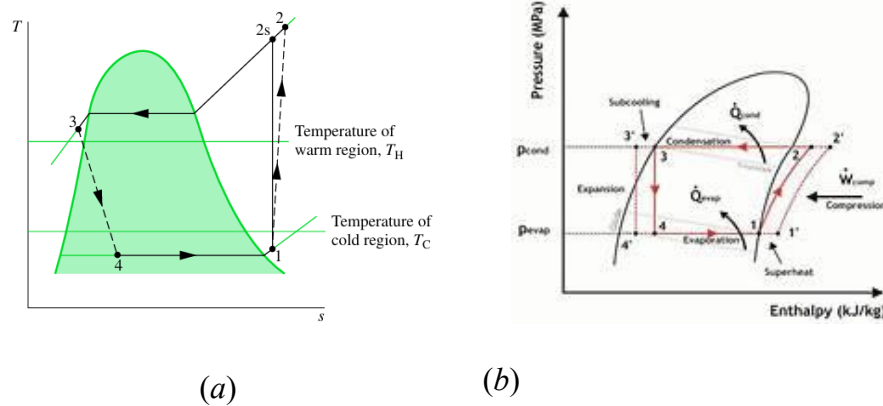
Gambar 2. 6 (a). Siklus refrigerasi kompresi uap, (b). T-s diagram kompresi uap ideal dan (c). P-h diagram kompresi uap ideal

- Proses 1-2: Uap jenuh dari evaporator masuk menuju kompresor, di mana tekanannya dinaikkan. Suhu juga akan meningkat, sebab sebagian energi yang menuju proses kompresi dipindahkan ke refrigeran.
- Proses 2-3 : *Superheated* gas bertekanan tinggi dari kompresor menuju kondensor. Pada tahap ini, refrigeran bertekanan dan bersuhu tinggi

dikondensasikan. Proses kondensasi pada tahap ini biasanya menggunakan udara atau air.

- c. Proses 3-4 : *Saturated liquid* yang sudah dikondensasi dan bertekanan tinggi melewati peralatan ekspansi, di mana akan terjadi penurunan tekanan dan pengendalian laju aliran refrigeran menuju tahap 4-1.
- d. Proses 4-1 : Refrigeran cair dari proses ekspansi dalam evaporator akan menyerap panas dari lingkungan, biasanya udara atau air. Selama proses ini, cairan mengubah bentuknya dari cair menjadi gas.

Namun dalam kenyataannya, siklus kompresi uap mengalami penyimpangan dari siklus kompresi ideal. Penyimpangan tersebut terjadi karena kerugian-kerugian (*losses*) pada setiap komponen. Perbedaan utama dapat dilihat pada diagram T-s dan diagram P-h berikut :



Gambar 2. 7 a. Diagram T-s kompresi uap aktual dan b. Diagram P-h kompresi uap aktual

2.4 Kinerja Mesin Kompresi Uap *Air Conditioner Split* (AC *Split*)

Parameter-parameter kinerja mesin refrigerasi kompresi uap meliputi kerja kompresi, efek refrigerasi, laju pengeluaran kalor, dan koefisien

performansi (*coefficient of performance*, COP), yang perlu dihitung pada tahap awal proses perancangan sistem refrigerasi maupun untuk menilai kinerja sistem refrigerasi yang sudah ada. Dalam analisis kinerja sistem refrigerasi kompresi uap, perubahan energi kinetik dan energi potensial pada setiap komponen umumnya diabaikan, dan tinjauan dimulai dari evaporator sebagai komponen tempat tercapainya efek pendinginan yang diinginkan.

1. Kerja Kompresor

Pada proses kompresi, uap refrigeran bertekanan rendah dari evaporator dihisap oleh kompresor untuk kemudian dikompresi, sehingga menyebabkan temperatur dan tekanan refrigeran meningkat. Sehingga keluar dari kompresor, refrigeran berfase uap dan bertekanan tinggi. Entropi dari uap refrigeran konstan ketika proses kompresi ini terjadi, sehingga dapat dikatakan proses kompresi terjadi secara *isentropi*. Besarnya kerja kompresi yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan 2.1

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \dots\dots\dots 2.1$$

Di mana:

$\dot{W}_c$: Kerja kompresor, (kj/kg)

h_1 : Nilai entalpi masuk kompesor, (kj/kg)

h_2 : Nilai entalpi keluar kompresor, (kj/kg)

2. Kerja Kondensor

Setelah refrigeran dikompresi oleh kompresor, refrigeran uap bertekanan tinggi akan mengalir ke kondensor. Ketika di kondensor, refrigeran melepas sebagian kalornya ke lingkungan sehingga terjadi penurunan temperatur dan perubahan fasa refrigeran dari uap menjadi cair. Proses inilah yang disebut proses kondensasi. Proses kondensasi terjadi secara *isobarik*, yaitu tekanan refrigeran yang masuk dan keluar kondensor memiliki besaran yang konstan. Besarnya kalor yang dilepas ke lingkungan pada proses ini dapat dihitung dengan persamaan 2.2

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \dots\dots\dots 2.2$$

Di mana:

- $\dot{Q}_{out}$: Kalor yang dilepas kondensor, (kj/kg)
- h_2 : Nilai entalpi masuk kondensor, (kj/kg)
- h_3 : Nilai entalpi keluar kompresor, (kj/kg)

3. Alat Ekspansi

Setelah refrigeran dikompresi oleh kompresor, refrigeran uap bertekanan tinggi akan mengalir ke kondensor. Ketika di kondensor, refrigeran melepas sebagian kalornya ke lingkungan sehingga terjadi penurunan temperatur dan perubahan fasa refrigeran dari uap menjadi cair. Proses inilah yang disebut proses kondensasi. Proses kondensasi terjadi secara *isobarik*, yaitu tekanan refrigeran yang masuk dan keluar kondensor memiliki besaran yang konstan. Besarnya kalor yang dilepas ke lingkungan pada persamaan berikut persamaan 2.3

$$h_4 = h_3 \dots\dots\dots 2.3$$

Di mana:

h_3 : Nilai entalpi masuk ekspansi, (kj/kg)

h_4 : Nilai entalpi keluar ekspansi, (kj/kg)

4. Kerja Evaporator

Proses yang terjadi pada evaporator sistem refrigerasi kompresi uap. Pada proses ini terjadi penyerapan kalor dari ruangan atau kabin, akibatnya temperatur refrigeran meningkat dan fasanya berubah menjadi uap. Proses evaporasi terjadi secara *isobarik*, yaitu tekanan refrigeran konstan selama proses evaporasi terjadi. Besarnya kalor yang diserap ketika proses evaporasi dapat diketahui melalui persamaan berikut persamaan 2.4

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \dots\dots\dots 2.4$$

Di mana:

$\dot{Q}_{in}$: Kalor yang diserap evaporator, (kj/kg)

h_1 : Nilai entalpi masuk kompresor, (kj/kg)

h_4 : Nilai entalpi keluar evaporator, (kj/kg)

5. Coefficient Of Performance (COP) Aktual

COP_{aktual} atau (*Coefficient Of Performance*)_{aktual} mesin pendingin adalah perbandingan antara kalor yang diserap evaporator dengan energi listrik yang digunakan untuk menggerakkan kompresor, COP mesin pendingin dapat dihitung dengan persamaan 2.5

$$COP_{aktual} = \frac{\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}}{\frac{W_c}{\dot{m}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana :

COP_{aktual} : Koefisien kinerja mesin pendingin

$\dot{Q}_{in}$: Kalor yang diserap evaporator, (kj/kg)

W_c : Kerja kompresor, (kj/kg)

h_1 : Nilai entalpi keluar evaporator, (kj/kg)

h_2 : Nilai entalpi masuk kondensor, (kj/kg)

h_4 : Nilai entalpi keluar ekspansi, (kj/kg)

6. Coefficient Of Performance (COP) Ideal

COP_{ideal} atau (*Coefficient Of Performance*)_{ideal} merupakan nilai maksimal yang dapat dicapai mesin pendingin. COP mesin pendingin dapat dihitung dengan persamaan 2.6

$$COP_{ideal} = \frac{T_{eva}}{T_{eva} - T_{kond}} \dots\dots\dots 2.6$$

Di mana:

COP_{ideal} : Koefisien kinerja mesin pendingin

T_{eva} : Temperatur evaporator, (°C)

T_{kond} : Temperatur kondensor, (°C)

7. Efisiensi Mesin Pendingin

Efisiensi mesin pendingin adalah nilai prestasi kerja yang dapat dicapai oleh sistem pendingin tersebut dengan persamaan 2.7

$$\eta = \left(\frac{COP_{aktual}}{COP_{ideal}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots 2.7$$

Dimana :

η : Efisiensi mesin pendingin

COP_{aktual} : Koefisien perstasi aktual mesin pendingin

COP_{ideal} : Koefisien perstasi ideal mesin pendingin

2.5 Prinsip Kodensasi dan *Sub Cooling* pada Siklus Refrigerasi

2.5.1 Kodensasi

Pada sistem refrigerasi kompresi uap, refrigeran yang keluar dari kompresor berada dalam kondisi uap dengan tekanan dan temperatur tinggi. Refrigeran tersebut selanjutnya dialirkan menuju kondensor untuk melepaskan panas ke lingkungan sehingga terjadi perubahan fase dari uap menjadi cair. Proses perubahan fase ini dikenal sebagai kondensasi. Stoecker dan Jones (1982) menjelaskan bahwa kondensor berfungsi sebagai komponen utama dalam proses pembuangan kalor yang berasal dari evaporator maupun akibat kerja kompresor. Selama proses ini berlangsung, refrigeran mengalami penurunan temperatur hingga mencapai kondisi cair jenuh.

Menurut Çengel dan Ghajar (2015), kondensasi terjadi ketika uap bersentuhan dengan permukaan yang memiliki temperatur lebih rendah dari temperatur jenuhnya sehingga energi panas dilepaskan dalam bentuk kalor laten. Incropera et al. (2017) menambahkan bahwa pada sistem pendingin udara, mekanisme kondensasi yang umum terjadi adalah kondensasi lapisan (film condensation), yaitu terbentuknya lapisan cair tipis pada permukaan perpindahan panas yang memengaruhi laju pelepasan kalor.

Secara umum, proses kondensasi berlangsung melalui beberapa tahapan, yaitu pendinginan uap superheated, perubahan fase uap menjadi cair pada tekanan relatif konstan, serta pendinginan lanjutan pada refrigeran cair.

2.5.2 Sub Cooling

Setelah refrigeran sepenuhnya berubah menjadi cair di dalam kondensor, temperatur refrigeran masih dapat diturunkan lebih lanjut. Proses pendinginan refrigeran cair hingga berada di bawah temperatur jenuh disebut sebagai *subcooling*.

Stoecker dan Jones (1982) menjelaskan bahwa *subcooling* bertujuan memastikan refrigeran memasuki alat ekspansi dalam kondisi cair sepenuhnya sehingga mencegah terbentuknya uap awal (*flash gas*). Çengel dan Ghajar (2015) menyebutkan bahwa pendinginan tambahan ini menyebabkan nilai *entalpi* refrigeran sebelum ekspansi menjadi lebih rendah sehingga kapasitas pendinginan meningkat. Peningkatan *subcooling* mampu memperbaiki proses evaporasi karena refrigeran yang masuk ke evaporator berada dalam kondisi cair stabil, sehingga kinerja sistem refrigerasi menjadi lebih efisien (Incropera et al., 2017).

2.6 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah hal penting dalam kerja sistem pendingin udara, terutama saat kondensor melepaskan panas. Menurut Nabila *et al.* (2023), perpindahan panas adalah proses mengalirnya energi panas dari tempat yang lebih hangat ke tempat yang lebih dingin dikarenakan perbedaan suhu. Dalam

sistem AC *split*, perpindahan panas berpengaruh langsung pada efisiensi sistem, karena menentukan seberapa baik kondensor mampu membuang panas dari refrigeran ke udara luar.

Di dalam kondensor AC *split*, cara utama perpindahan panas adalah melalui konduksi dan konveksi, sedangkan radiasi tidak terlalu berpengaruh (Lamanja, 2025). Oleh karena itu, dalam penelitian ini, analisis perpindahan panas hanya berfokus pada dua cara tersebut.

2.6.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi di dalam suatu material atau antarmaterial yang saling bersentuhan tanpa disertai perpindahan massa secara makroskopis. Lamanja (2025) menjelaskan bahwa konduksi terjadi akibat tumbukan dan getaran molekul di dalam material, sehingga energi panas dapat berpindah dari bagian yang bersuhu tinggi ke bagian yang bersuhu lebih rendah.

Pada kondensor AC *split*, mekanisme konduksi terjadi ketika panas dari refrigeran berpindah melalui dinding pipa kondensor yang umumnya terbuat dari material logam seperti tembaga atau aluminium. Rahman dan Hamzah (2024) menyatakan bahwa karakteristik konduktivitas termal material sangat memengaruhi laju perpindahan panas, sehingga pemilihan material pipa dan luas permukaan kondensor menjadi faktor penting dalam meningkatkan efektivitas pelepasan kalor. Perpindahan panas konduksi dapat dihitung dengan persamaan 2.8

$$Q = k \cdot A \frac{T_1 - T_2}{L} = k \cdot A \frac{\Delta T}{L} \dots\dots\dots 2.8$$

Dimana:

Q : Laju perpindahan panas (Watt)

k : Konduktivitas termal bahan (W/m·K)

A : Luas penampang (m²)

$T_1 - T_2 = \Delta T$: Beda suhu antara dua sisi bahan (K)

L : Tebal bahan (m)

2.6.2 Perpindahan Panas Konveksi Paksa

Perpindahan panas secara konveksi adalah mekanisme perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dan fluida yang mengalir di sekitarnya. Menurut Nabila *et al.* (2023), konveksi melibatkan kombinasi antara konduksi panas pada lapisan fluida yang bersentuhan langsung dengan permukaan padat dan perpindahan energi akibat pergerakan massa fluida.

Konveksi pada kondensor AC *split* umumnya terjadi secara *konveksi paksa*, di mana aliran udara dihasilkan oleh kipas kondensor. Wastukancana (2022) menyatakan bahwa penggunaan media pendingin cair memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan udara, sehingga berpotensi meningkatkan laju pelepasan panas dari kondensor.

Peningkatan laju perpindahan panas konveksi diharapkan mampu menurunkan temperatur dan tekanan kondensasi, yang pada akhirnya

berdampak pada peningkatan kinerja AC *split*. Pada perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan 2.9

$$Q = h(T_s - T_\infty) \dots\dots\dots 2.9$$

Dimana :

Q : Laju perpindahan panas (W)

h : Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²·K)

A : Luas permukaan perpindahan panas (m²)

T_s : Suhu permukaan padat (K atau °C)

T_∞ : Suhu fluida di sekitar permukaan (K atau °C)

2.6.3 Perpindahan Panas Konveksi Bebas

Perpindahan panas konveksi bebas (atau konveksi alamiah) adalah mekanisme perpindahan kalor yang terjadi ketika pergerakan fluida tidak ditimbulkan oleh dorongan mekanis dari luar, seperti kipas atau pompa, melainkan semata-mata karena gaya apung (*buoyancy force*). Gaya apung ini muncul akibat adanya perbedaan densitas (kerapatan) fluida yang disebabkan oleh gradien temperatur di dalam fluida tersebut.

Menurut Incropera et al. (2017), pada proses perendaman (*immersion*), ketika permukaan benda padat yang panas bersentuhan dengan fluida (air) yang lebih dingin, panas akan berpindah ke partikel air di sekitarnya. Air yang memanaskan ini akan mengalami penurunan densitas sehingga bergerak naik ke permukaan, dan posisinya segera digantikan oleh air yang lebih dingin dan lebih padat dari area sekitarnya. Sirkulasi

alami inilah yang secara kontinu membuang kalor dari permukaan benda padat.

Pada modifikasi sistem AC *split* dalam penelitian ini, perpindahan panas konveksi bebas terjadi di dalam wadah perendaman, di mana pipa saluran keluar kondensor (*liquid line*) direndam di dalam genangan air kondensat. Kalor dari refrigeran cair di dalam pipa berpindah secara konduksi melewati dinding pipa tembaga, dan selanjutnya dilepaskan secara konveksi bebas ke massa air kondensat yang menggenangnya.

Secara umum, besarnya laju perpindahan panas konveksi dapat dihitung menggunakan Hukum Pendinginan *Newton* (*Newton's Law of Cooling*), dengan persamaan 2.10

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \dots\dots\dots 2.10$$

Dimana:

Q : Laju perpindahan kalor

h : Koefisien perpindahan panas konveksi konveksi bebas ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

A : Luas permukaan pipa yang terendam air (m^2)

T_s : Temperatur permukaan luar pipa (K atau $^{\circ}\text{C}$)

T_∞ : Temperatur rata-rata fluida (air kondensat) yang jauh dari permukaan pipa (K atau $^{\circ}\text{C}$)

Berbeda dengan konveksi paksa (*forced convection*) yang memiliki koefisien h lebih tinggi karena dorongan kipas angin, nilai h pada konveksi bebas cenderung lebih rendah karena murni bergantung pada properti fluida dan perbedaan suhu. Kendati demikian, air memiliki kapasitas panas

spesifik dan massa jenis yang jauh lebih besar dibandingkan udara, sehingga penggunaan genangan air kondensat sebagai media *subcooling* tetap sangat efektif untuk menurunkan temperatur refrigeran cair.

2.7 Alat Penukar Panas

Alat penukar panas (*heat exchanger*) adalah perangkat yang berfungsi untuk memindahkan energi panas dari satu fluida ke fluida lain yang memiliki temperatur berbeda, baik secara langsung maupun tidak langsung, tanpa terjadinya pencampuran massa antara kedua fluida tersebut. Menurut Rahman dan Hamzah (2024), alat penukar panas banyak digunakan dalam sistem teknik, termasuk sistem pendingin, sistem refrigerasi, dan sistem pembangkit energi, karena perannya yang sangat penting dalam mengatur dan mengendalikan perpindahan panas.

Dalam sistem AC *split*, kondensor berfungsi sebagai alat penukar panas yang berperan dalam melepaskan kalor dari refrigeran ke lingkungan. Efektivitas kerja alat penukar panas ini sangat menentukan kinerja sistem pendingin secara keseluruhan.

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti (Tahun)	Objek Penelitian	Metode / Modifikasi	Hasil Utama & Peningkatan Efisiensi	Keunggulan	Kelemahan
1	Pratama <i>et al.</i> (2019)	AC Split 2 PK	Sistem <i>evaporative cooling</i> menggunakan <i>mist nozzle</i> dan pompa otomatis pada kondensor.	Temperatur kondensor turun 4–6 °C; penghematan energi hingga 30%; memperpanjang masa pakai komponen.	Konsumsi listrik turun dari 3,437 kWh menjadi 2,324 kWh (hemat sekitar 30%).	Membutuhkan suplai air eksternal, bukan memanfaatkan air kondensat.
2	Rustandi (2010)	AC Split 1 HP (1 PK)	Pemanfaatan air kondensat untuk mendinginkan saluran <i>discharge</i> kompresor (pipa paralel direndam).	COP naik 2,6% (6,12 ke 6,28); konsumsi daya turun 6% (606,2 W ke 570 W); suhu refrigeran turun.	Memanfaatkan air kondensat sebagai media subcooling. COP meningkat dari 2,91 menjadi 3,2.	Nilai faktor daya diasumsikan, tidak diukur langsung.
3	Bagja <i>et al.</i> (2021)	Kulkas 1 Pintu	Penyemprotan air kondensat secara periodik (setiap 2 menit) ke kondensor (<i>subcooling</i>).	COP aktual 3,2; COP Carnot 4,21; efisiensi 75,8%; menurunkan temperatur dan tekanan kerja.	Temperatur keluaran kondensor turun 4-6°C. COP meningkat dari 3,76 menjadi 4,1.	Data tekanan refrigeran tercatat sama pada semua pengujian sehingga perlu dikaji kembali.
4	Syina <i>et al.</i> (2024)	AC Split 2 PK (R410A)	Pemanfaatan air kondensat sebagai metode subcooling pada keluaran kondensor.	Suhu keluar kondensor turun 4–6°C; COP naik (3,76 ke 4,1); efisiensi naik dari 54% ke 59%; daya turun 1,7%.	Kerja kompresor menurun pada kedua kondisi pengujian. Temperatur udara masuk kondensor lebih rendah.	Tidak menghitung COP maupun efisiensi.

5	Syahnan <i>et al.</i> (2016)	AC Split 1 PK (HC- R22)	Pemanfaatan air kondensat pada modul <i>Evaporative Cooling</i> (EC) di kondensor.	Suhu udara masuk kondensor turun ke $\sim 30^{\circ}\text{C}$; kerja kompresor turun dari 0,63 kW menjadi 0,59 kW (kondisi berbeban).	Menggunakan konsep pendinginan pipa discharge dengan air kondensat.	Nilai COP yang diperoleh tergolong tinggi sehingga perlu verifikasi. Temperatur ruangan tidak menunjukkan perubahan signifikan.
---	------------------------------------	----------------------------------	--	--	--	---

Berdasarkan hasil dari penelitian terdahulu, diketahui bahwa air kondensat yang dihasilkan oleh evaporator AC *split* memiliki potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan sebagai media pendinginan tambahan. Beberapa metode telah dikembangkan oleh peneliti sebelumnya, di antaranya perendaman pipa discharge, penyemprotan air pada sirip kondensor, serta penerapan sistem *evaporative cooling*. Meskipun menggunakan pendekatan yang berbeda, metode-metode tersebut secara umum mampu meningkatkan nilai *Coefficient of Performance* (COP) sekaligus mengurangi beban kerja kompresor.

Namun, penggunaan metode yang melibatkan kontak langsung antara air kondensat dan sirip kondensor masih memiliki kelemahan, terutama dari sisi ketahanan terhadap penggunaan jangka panjang. Paparan air secara terus-menerus pada permukaan logam kondensor berpotensi mempercepat terjadinya korosi serta pembentukan kerak pada unit outdoor. Kondisi tersebut dapat menghambat proses perpindahan panas dan secara bertahap menurunkan performa sistem pendingin.

Atas dasar pertimbangan tersebut, penelitian ini menggunakan sistem perendaman (*immersion cooling*) pada pipa *liquid line* di sisi keluaran kondensor sebagai metode alternatif yang lebih aman dan efisien. Pipa *liquid line* direndam sepenuhnya di dalam sebuah wadah yang menampung air kondensat dengan mekanisme *overflow* pasif. Metode ini memungkinkan refrigeran cair mendapatkan efek *subcooling* melalui media air tanpa adanya kontak langsung antara air dan sirip kondensor, serta tanpa memerlukan kerumitan fabrikasi lilitan pipa (*coil*). Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan derajat *subcooling* secara konsisten, sehingga memberikan dampak positif terhadap peningkatan nilai COP pada sistem AC *split*.

2.9 Hipotesis

1. Penambahan sistem perendaman (*immersion cooling*) pada pipa saluran keluar kondensor (*liquid line*) dengan media pendingin air kondensat secara *counterflow* pada saluran keluar kondensor diduga mampu menurunkan suhu refrigeran cair secara signifikan. Hal ini akan meningkatkan derajat *subcooling* yang secara langsung memperbesar nilai efek refrigerasi karena pergeseran titik entalpi pada diagram *P-h* menuju area cairan subdingin.
2. Meningkatnya efek refrigerasi diikuti dengan optimalisasi pembuangan panas pada sistem yang diduga akan meningkatkan nilai *Coefficient of Performance* (COP) secara keseluruhan. Selain itu, penurunan temperatur kerja sistem ini berpotensi meringankan beban kompresor sehingga menurunkan konsumsi daya listrik dibandingkan dengan AC *split* standar.

2.10 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir dalam penelitian ini didasarkan pada analisis permasalahan efisiensi energi pada sistem refrigerasi dan potensi pemanfaatan limbah kondensat, dengan alur sebagai berikut:

1. Permasalahan: Mesin pendingin (AC *split*) secara terus-menerus membuang air kondensat bersuhu rendah melalui saluran *drain* tanpa dimanfaatkan. Di sisi lain, kondensor membutuhkan pelepasan panas yang optimal agar kinerja kompresor tidak berat.
2. Kesenjangan Penelitian (*Research Gap*): Penelitian terdahulu telah mencoba memanfaatkan air kondensat dengan cara menyemprotkannya langsung ke sirip kondensor (*evaporative cooling*). Meskipun efektif, metode ini memiliki kelemahan jangka panjang, yaitu memicu korosi dan penumpukan kerak yang dapat merusak unit *outdoor*.
3. Solusi yang Diusulkan: Mengganti metode penyemprotan dengan sistem perendaman pipa (*immersion*) berbahan tembaga pada saluran keluaran kondensor (*liquid line*).
4. Mekanisme Termodinamika: Pada sistem perendaman pasif, pipa refrigeran cair direndam dalam air kondensat yang bersuhu lebih rendah. Kalor berpindah dari refrigeran ke air kondensat melalui konduksi pada dinding pipa dan konveksi bebas pada sisi air, sehingga suhu refrigeran turun di bawah suhu jenuhnya sebelum memasuki katup ekspansi. Kondisi ini meningkatkan derajat subcooling.

5. Output yang Diharapkan: Peningkatan derajat *subcooling* akan menggeser titik entalpi (h_4) menjadi lebih rendah, sehingga secara langsung memperbesar efek refrigerasi ($h_1 - h_4$). Pada akhirnya, hal ini diproyeksikan mampu meningkatkan *Coefficient of Performance* (COP) dan meringankan beban kerja kompresor sehingga konsumsi daya listrik menurun.