BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kajian Relevan

Berikut merupakan beberapa penelitian yang relevan sesuai dengan topik penelitian yang saya angkat dengan judul "Analisis Perbandingan Efisiensi Kinerja *Freezer* 1/4 PK Menggunakan Refrigeran R134a Dengan R290". Penelitian ini berfokus terhadap perbandingan kinerja sistem pendingin pada *freezer* ukuran kecil, yang mencakup kerja kompresi, konsumsi energi, parameter *Coefficient of Performance (COP),* dan efek pendingin.

1. ***The effect the effectiveness of the liquid suction heat exchanger to performance of cold storage with refrigerant* R22, R404a *and* R290/R600a**

   Penelitian ini membahas pengaruh *Liquid Suction Heat Exchanger (LSHX)* terhadap kinerja *cold storage* dengan menggunakan refrigeran R22, R404A, dan campuran R290/R600a (50:50). Penelitian ini bertujuan mengembangkan alternatif refrigeran yang memiliki performa baik sekaligus dapat menggantikan penggunaan R22 dan R404A pada sistem penyimpanan dingin berkapasitas besar. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen pada sistem refrigerasi kompresi uap yang dilengkapi *LSHX tipe tube in tube*. Pengujian dilakukan menggunakan tiga jenis refrigeran dengan parameter yang diamati meliputi temperatur evaporator, efektivitas *LSHX*, kapasitas refrigerasi *(Refrigeration Capacity Index/RCI)*, kerja kompresor *(Compressor Work Index/CWI)*, dan *Coefficient of Performance (COP)*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran refrigeran R290/R600a mampu menghasilkan temperatur evaporator paling rendah, yaitu sekitar −30°C, lebih rendah dibandingkan R404A (−24°C) dan R22 (−22°C). Selain itu, penggunaan *LSHX* meningkatkan kapasitas refrigerasi, nilai *RCI*, serta *COP* relatif sistem *(COPRS)*. Campuran R290/R600a memberikan peningkatan performa yang lebih baik dibandingkan R22 dan R404A sehingga dinilai memiliki karakteristik yang layak sebagai refrigeran pengganti pada sistem refrigerasi kompresi uap dengan *subcooling (Prayudi, 2026)*.

2. ***An Experimental Investigation on Maas Effect of Hydrocarbon Refrigerant* (R600a) *on Household Refrigerator Energy Consumption***

Penelitian ini membahas pengaruh variasi massa refrigeran hidrokarbon R600a terhadap konsumsi energi pada refrigerator rumah tangga. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan massa refrigeran yang paling optimal sehingga konsumsi energi dapat diminimalkan serta mendukung penggunaan refrigeran yang lebih ramah lingkungan. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen dengan memanfaatkan refrigerator rumah tangga dua pintu yang diuji di dalam ruang uji *(chamber)* bersuhu terkendali 32°C. Variasi massa refrigeran yang digunakan adalah 38 gram, 48 gram, dan 58 gram. Selama pengujian, kondisi lingkungan dijaga tetap stabil, kemudian dilakukan pengukuran konsumsi energi listrik setelah sistem mencapai kondisi tunak (steady state).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa massa refrigeran sangat berpengaruh terhadap konsumsi energi refrigerator. Penggunaan refrigeran sebanyak 48 gram menghasilkan konsumsi energi paling rendah, yaitu 0,76 kWh, sehingga menjadi kondisi operasi yang paling efisien. Sebaliknya, penggunaan refrigeran 38 gram menghasilkan konsumsi energi sebesar 0,97 kWh, sedangkan 58 gram menghasilkan konsumsi energi tertinggi, yaitu 1,05 kWh. Penelitian ini menyimpulkan bahwa massa refrigeran yang terlalu sedikit maupun terlalu banyak menyebabkan kompresor bekerja lebih berat sehingga meningkatkan konsumsi energi. Oleh karena itu, massa refrigeran 48 gram merupakan jumlah pengisian yang paling optimal untuk memperoleh efisiensi energi pada refrigerator rumah tangga yang menggunakan refrigeran R600a. (Susanto Edy et al., 2026).

3. **Performance profile of Cold Storage Using R32 as Refrigerant for Traditional Fishing Boat with Photovoltaic as Energi Source**

Penelitian ini membahas profil kinerja cold storage menggunakan refrigeran R32 yang memanfaatkan sumber energi fotovoltaik pada kapal nelayan tradisional. Penelitian dilakukan secara eksperimen melalui pengujian di laboratorium dan pengujian langsung pada kapal nelayan berkapasitas 5 GT. Parameter yang diamati meliputi suhu ruang pendingin, konsumsi daya

kompresor, kapasitas pendinginan (Qe), pelepasan panas (Qc), dan nilai Coefficient of Performance (COP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai temperatur ruang pendingin sekitar −18°C, dengan konsumsi daya kompresor berkisar 0,653–0,776 kW, kapasitas pendinginan sekitar 4,98 kW, pelepasan panas sekitar 5,94 kW, serta nilai COP mencapai sekitar 7,72. Berdasarkan hasil tersebut, refrigeran R32 dinilai memiliki potensi yang baik untuk diterapkan pada sistem cold storage berbasis energi surya bagi kapal nelayan tradisional (Suhengki et al., 2024).

4. **Pengaruh Penggunaan *LSHX* Terhadap Performa Mesin Pendingin Dengan Laju Aliran Massa Yang Sama Pada Kondisi *Transiet***

   Penelitian mengenai pengaruh penggunaan Liquid Suction Heat Exchanger (LSHX) terhadap performa sistem refrigerasi kompresi uap pada kondisi transient hingga steady state dengan menggunakan refrigeran R22, R404A, dan R290. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh LSHX terhadap temperatur evaporasi dan nilai Coefficient of Performance (COP), sekaligus mengevaluasi potensi R290 sebagai refrigeran alternatif yang lebih ramah lingkungan. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen, yaitu membandingkan kinerja sistem refrigerasi sebelum dan sesudah pemasangan LSHX dengan kondisi laju aliran massa refrigeran yang sama. Parameter yang diamati meliputi tekanan, temperatur pada beberapa titik sistem, temperatur evaporasi, kapasitas refrigerasi, kerja kompresor, dan nilai COP yang dianalisis menggunakan perangkat lunak REFPROP 6. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan LSHX mampu meningkatkan performa sistem refrigerasi, ditandai dengan penurunan temperatur evaporasi dan peningkatan nilai COP pada seluruh refrigeran yang diuji. Di antara ketiga refrigeran tersebut, R290 memberikan performa terbaik dengan menghasilkan temperatur evaporasi paling rendah dan nilai COP tertinggi, sehingga dinilai memiliki potensi sebagai refrigeran alternatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Nurhasanah Roswati, 2017).

5. **Kaji Eksperimen Retrofitting R134a dengan R290 Pada Mesin *Chest Freezer* Berdasarkan Massa dan Berdasarkan Temperatur Evaporasi**

Penelitian ini membahas perbandingan kinerja *freezer* setelah refrigeran R134a diganti dengan R290 menggunakan dua metode pengisian, yaitu berdasarkan massa dan temperatur evaporasi. Pengujian dilakukan pada *chest freezer*, dengan pengisian R134a sebesar 150 gram, sedangkan R290 diuji pada variasi 60 gram dan 90 gram. Parameter yang diamati meliputi waktu pendinginan, *Coefficient of Performance (COP)*, efisiensi, dan konsumsi listrik. Hasilnya menunjukkan bahwa R290 mampu mempercepat proses pendinginan dibandingkan R134a. Nilai *Coefficient of Performance (COP)* yang dihasilkan juga lebih tinggi, walaupun konsumsi listrik pada kondisi tertentu sedikit meningkat. Secara keseluruhan, R290 dinilai cukup layak digunakan sebagai pengganti karena performanya baik dan lebih ramah lingkungan. (Aulia et al., 2025).

6. **Analisis Perbandingan Penggunaan Refrigeran R-134a dan R-404A Pada Trainer Sistem Refrigerasi Dengan Kompresor ¼ PK**

   Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan performa dua jenis refrigeran, yaitu R134a dan R404A, pada sistem refrigerasi dengan kompresor 1/4 PK. Pengujian dilakukan dengan mengukur tekanan, temperatur, serta menghitung *Coefficient of Performance (COP)*, kerja kompresor, dan kapasitas pendinginan selama 120 menit. Dari hasil pengujian, R134a memiliki nilai *Coefficient of Performance (COP)* yang lebih tinggi dibandingkan R404A. Selain itu, kemampuan penyerapan panas di evaporator juga lebih baik pada R134a. Dari sini dapat disimpulkan bahwa R134a lebih cocok digunakan untuk sistem yang mengutamakan efisiensi energi, sedangkan R404A lebih unggul pada kapasitas pendinginan tertentu. (Pratama, Muhammad, & Muhammad, 2024).

7. ***Retrofitting* Alternatif Refrigeran Ramah Lingkungan R-290 dengan R-134a Pada Trainer Unit Instalasi Sistem Refrigerasi**

   Mengkaji penggantian refrigeran R134a dengan R290 pada sistem trainer refrigerasi dengan variasi alat ekspansi, yaitu pipa kapiler dan TXV. Pengujian dilakukan secara eksperimen di laboratorium dengan kondisi tanpa beban. Hasilnya menunjukkan bahwa performa R290 hampir setara dengan R134a, bahkan konsumsi energinya lebih rendah sekitar 8–9%. Selain itu,

penggunaan R290 tidak memerlukan perubahan besar pada sistem yang sudah ada. Dari hasil tersebut, R290 dinilai cukup potensial sebagai refrigeran alternatif yang efisien dan lebih ramah lingkungan. (Muliawan et al., 2026).

8. ***Experimental study of R290 replacement R134a in cold storage air conditioning system***

   Penelitian ini fokus pada pengujian kinerja R290 sebagai pengganti R134a pada sistem pendingin *cold storage*. Pengujian dilakukan dengan variasi jumlah pengisian refrigeran. Hasilnya menunjukkan bahwa R290 memiliki kapasitas pendinginan yang lebih tinggi dan waktu pendinginan yang lebih cepat. Selain itu, jumlah refrigeran yang dibutuhkan juga lebih sedikit dibandingkan R134a. Nilai *Coefficient of Performance (COP)* antara keduanya tidak jauh berbeda, namun R290 tetap unggul dari sisi efisiensi dan penggunaan refrigeran. Secara umum, R290 dapat digunakan sebagai pengganti tanpa perlu perubahan besar pada sistem. (Zheng et al., 2022).

2.2. Landasan Teori

2.2.1. *Freezer*

Freezer merupakan salah satu jenis mesin refrigerasi yang digunakan untuk penyimpanan pada temperatur evaporasi di bawah 0°C. Alat ini umumnya dimanfaatkan untuk menyimpan daging atau produk lainnya agar kualitasnya tetap terjaga dan dapat bertahan lebih lama. (Pramudantoro & Sumeru, 2017).



Gambar 2.1 *Freezer Box*

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

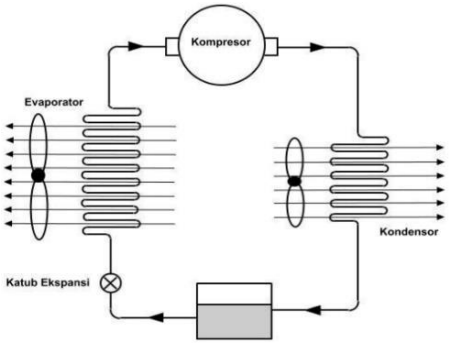
Tabel 2.1 Spesifikasi *Freezer*

Merek	AQUA
Model	AQF-S4 / AQF-S6
Tegangan	220 V /50 Hz
Arus	1 A
Refrigeran	HFC-134a
Massa Refrigeran	120 g / 160 g
Kapsitas	121 L / 167 L
Kelas Iklim	T
Produsen	PT. Haier Electrical Appliances Indonesia
Standar	SNI
Sertifikasi	SUCOFINDO

2.2.2. Prinsip Kerja Sistem Pendingin *Freezer*

Mesin *freezer* merupakan alat pendingin yang bekerja pada kisaran suhu sekitar -18 hingga -25°C. Perangkat ini digunakan untuk membekukan serta menjaga bahan atau makanan yang disimpan di dalamnya agar tetap awet. Dalam prosesnya, refrigeran yang keluar dari evaporator masih berupa gas dengan tekanan rendah, kemudian dihisap oleh kompresor. Dalam siklus kerjanya, refrigeran yang keluar dari evaporator masih berbentuk gas bertekanan rendah, kemudian masuk ke kompresor untuk dihisap. Di dalam kompresor, tekanan dan temperatur refrigeran dinaikkan sehingga menjadi gas dengan tekanan dan suhu tinggi. Selanjutnya, refrigeran dialirkan ke kondensor. Pada bagian ini, refrigeran melepaskan panas ke lingkungan hingga mengalami perubahan fase dari gas menjadi cair. Setelah itu, refrigeran cair bertekanan tinggi melewati katup ekspansi. Ketika melalui komponen ini, tekanan refrigeran turun secara drastis yang diikuti dengan penurunan suhu secara cepat. Pada dasarnya, proses pendinginan pada sistem refrigerasi merupakan proses perpindahan panas dari suatu ruang ke lingkungan sekitarnya. Hal

ini sejalan dengan hukum kekekalan energi, di mana energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, melainkan hanya berpindah dari satu bentuk atau medium ke yang lain. (Aulia et al., 2025).

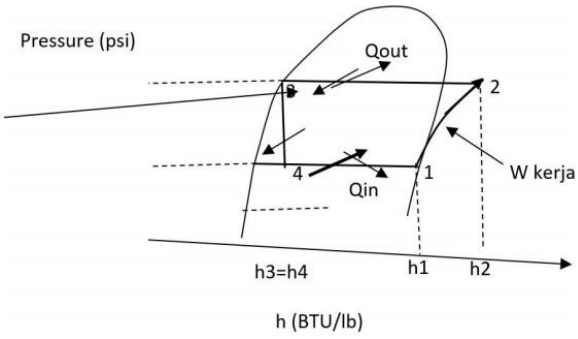


Gambar 2.2 Diagram Siklus Pendingin

(Sumber: Sulistiyo & Muhammad, 2018)

2.2.3. *Cycle Thermodinamika* Mesin Pendingin *Freezer*

Prinsip kerja *freezer* didasarkan pada siklus kompresi uap, di mana panas dari dalam ruang *freezer* dipindahkan ke luar menggunakan media refrigeran.



Gambar 2.3 Diagram *Enthalpi*

(Sumber: Sulistiyo & Muhammad, 2018)

Siklus refrigerasi terdiri dari empat proses utama, yaitu sebagai berikut:

1. Proses 1 – 2 (kompresi)

   Pada tahap ini, uap refrigeran dikompresi di dalam kompresor secara mendekati proses *isentropis* dan adiabatik. Proses kompresi membutuhkan kerja dari luar sistem. Akibatnya, tekanan dan suhu refrigeran meningkat setelah keluar dari kompresor.

2. Proses 2 – 3 (kondensasi)

Refrigeran yang keluar dari kompresor kemudian masuk ke kondensor. Pada tahap ini, refrigeran melepaskan kalor ke lingkungan (melalui udara atau air) hingga berubah fase dari uap menjadi cair. Proses ini berlangsung pada tekanan dan suhu yang relatit konstan.

3. Proses 3 – 4 (ekspansi)

   Pada katup ekspansi terjadi penurunan tekanan secara tiba-tiba tanpa perubahan entalpi (entalpi tetap). Dalam proses ini tidak ada perpindahan kalor maupun kerja yang terjadi di dalam sistem.

4. Proses 4 – 1 (evaporasi)

   Refrigeran cair yang bertekanan rendah masuk ke evaporator dan menyerap kalor dari lingkungan sekitar. Akibatnya, retrigeran berubah kembali menjadi uap. Proses ini juga berlangsung pada tekanan dan suhu yang relatif konstan.

Secara keseluruhan, siklus ini memenuhi keseimbangan energi, yaitu kalor yang dilepas sistem sama dengan jumlah kalor yang diserap dan kerja yang diberikan (Qout = Qin + W).

2.2.4. Siklus Refrigerasi *Freezer*

Siklus refrigerasi adalah suatu siklus kerja yang bertujuan untuk memindahkan kalor dari media bersuhu rendah dengan bantuan energi dari luar sistem. Secara umum, siklus refrigerasi dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu siklus absorpsi (*absorption cycle*), siklus gas (*gas cycle*), dan siklus kompresi uap (*vapor compression cycle*). Namun pada *freezer*, sistem refrigerasi yang digunakan pada dasarnya hanya satu jenis utama, yaitu siklus kompresi uap. Berikut ini merupakan penjelasan dari ketiga jenis siklus refrigerasi tersebut:

1. Siklus Absorpsi *(Absorption Cycle)*

Berbeda dengan siklus kompresi uap, siklus absorpsi memanfaatkan energi panas sebagai sumber utama penggerak sistem. Pada siklus ini, fungsi kompresor digantikan oleh proses penyerapan dan pemisahan antara refrigeran dan zat penyerap (absorben). Refrigeran terlebih dahulu diserap oleh absorben di dalam *absorber*, kemudian dipanaskan di generator untuk memisahkan kembali

refrigeran tersebut. Setelah terpisah, refrigeran melanjutkan proses pendinginan seperti pada sistem lainnya. (Wilis, 2011).

Sistem ini umumnya digunakan pada kondisi tertentu, misalnya ketika tersedia sumber panas buangan. Meskipun efisiensinya tidak setinggi siklus kompresi uap, keunggulan utama dari siklus absorpsi adalah kebutuhan energi listrik yang lebih rendah. (Pratama, Muhammad, & Muhammad, 2024).

2. **Siklus Gas *(Gas Cycle)***

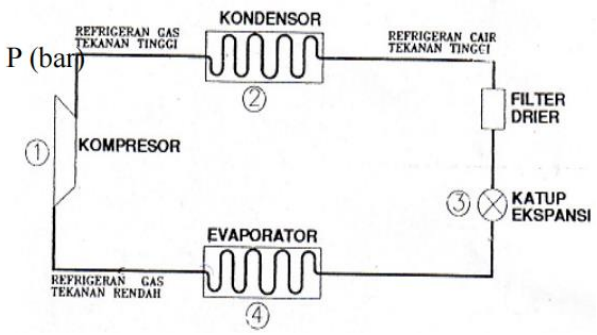
Siklus gas merupakan sistem refrigerasi yang tidak melibatkan perubahan fase refrigeran. Dalam siklus ini, fluida kerja tetap berada dalam bentuk gas sepanjang proses berlangsung. Pendinginan terjadi akibat proses kompresi dan ekspansi gas. Gas dikompresi hingga tekanannya meningkat, kemudian didinginkan, lalu diekspansi sehingga temperaturnya turun dan dapat digunakan untuk menyerap panas dari ruang yang didinginkan. (Zheng et al., 2022).

Siklus gas biasanya digunakan pada aplikasi khusus, seperti sistem pendingin pada pesawat atau industri tertentu. Jika dibandingkan dengan siklus kompresi uap, efisiensinya memang lebih rendah, tetapi sistem ini memiliki konstruksi yang lebih sederhana dan tidak bergantung pada perubahan fase refrigeran. (Servianus, Matheus, & Muhamad, 2020).

3. **Siklus Kompresi Uap *(Vapor Compression Cycle)***

Siklus kompresi uap adalah jenis siklus yang paling sering digunakan pada sistem *freezer*. Pada siklus ini, refrigeran berperan sebagai media perpindahan panas yang terus mengalami perubahan fase. Prosesnya dimulai di evaporator, ketika refrigeran menyerap panas dari ruang pendingin hingga berubah menjadi uap. Uap tersebut kemudian dikompresi oleh kompresor sehingga tekanannya meningkat. Selanjutnya, refrigeran dialirkan ke kondensor untuk melepaskan panas ke lingkungan dan berubah kembali menjadi cair. Setelah itu, refrigeran melewati katup ekspansi untuk menurunkan

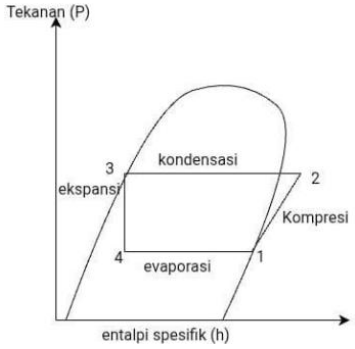
tekanan sebelum kembali ke evaporator dan mengulangi siklus yang sama. (Wilis, 2011).



Gambar 2.4 Siklus Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

(Sumber: Pramudantoro, Tri, & Prajitno, 2011)

Siklus ini banyak digunakan karena mampu menghasilkan kinerja pendinginan yang stabil dengan efisiensi yang relatif tinggi. Nilai efisiensi sistem, seperti *Coefficient of Performance (COP)*, sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan jenis refrigeran yang digunakan. (Pratama, Muhammad, & Muhammad, 2024).



Gambar 2.5 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap *Freezer* Pada Diagram P-h

(Sumber: Aulia et al., 2025)

2.2.5. Komponen Utama *Freezer*

1. Kompresor

Kompresor adalah suatu komponen utama pada sistem pendingin *freezer*. Di dalam kompresor terjadi proses penekanan refrigeran dalam bentuk gas, sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat. Proses ini umumnya diasumsikan berlangsung secara adiabatik, yaitu

tanpa perpindahan kalor ke lingkungan, serta bersifat isentropik, di mana nilai entropinya dianggap tetap.



Gambar 2.6 Kompresor

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Tabel 2.2 Spesifikasi Kompresor

Merek	Huaguang
Model	ATX80X
Jenis	Hermetic Reciprocating
Refrigeran	R134a
Oli	POE (Polyol Ester)
Tegangan	220-240 V
Frekuensi	50/60 Hz
Proteksi	Thermally Protected

2. Kondensor

Kondensor adalah alat pada sistem refrigerasi yang berfungsi untuk melepaskan panas dari refrigeran dan mengubahnya dari fase gas menjadi cair pada kondisi tekanan tinggi.



Gambar 2.7 Kondesor

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3. Pipa Kapiler (Orifice Tube)

Pipa kapiler atau juga dikenal dengan sebutan *orifice tube*, merupakan komponen yang berfungsi untuk mengontrol aliran refrigeran dari setiap sisi bertekanan tinggi (kondensor) ke sisi yang bertekanan rendah (evaporator). (Wisaksono, Hardimentis, & Rimni, 2024).



Gambar 2.8 Pipa Kapiler *(Orifice Tube)*

(Sumber: Wisaksono, Hardimentis, & Rimni, 2024)

4. Evaporator

Evaporator adalah suatu komponen utama dalam sistem pendingin *freezer* yang berfungsi sebagai penukar panas. (Wisaksono, Hardimentis, & Rimni, 2024). Di dalam evaporator terjadi proses penguapan (evaporasi), yaitu proses perubahan fase refrigeran dari cair menjadi uap. Pada tahap ini, panas dari udara yang dialirkan oleh fan diserap oleh refrigeran, sehingga temperatur udara menurun.



Gambar 2.9 Evaporator

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

2.2.6. Komponen Pendukung *Freezer*

1. Filter Dryer

Fungsi *filter dryer* adalah penyaring kotoran sekaligus menghilangkan kandungan uap air yang terbawa refrigeran di dalam sistem. Jika terdapat air, hal ini dapat menyebabkan penyumbatan akibat pembekuan pada pipa kapiler serta memicu terjadinya korosi pada komponen. Oleh karena itu, penggunaan *filter dryer* menjadi penting untuk menjaga kondisi dan keandalan sistem refrigerasi.



Gambar 2.10 *Filter Drayer*

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

2. *Accumulator (Suction Accumulator)*

Accumulator merupakan komponen pendukung yang berperan sebagai penampung refrigeran dalam bentuk cair yang berasal dari evaporator agar tidak ikut masuk ke kompresor. Masuknya refrigeran cair ke dalam kompresor dapat menimbulkan kerusakan serius, yang dikenal dengan istilah liquid slugging. Karena itu, keberadaan accumulator sangr J butuhkan untuk melindungi kompresor



Gambar 2.11 *Accumulator*

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3. *Thermostat* (Pengatur Suhu)

Thermostat berfungsi untuk mengatur suhu di dalam *freezer* agar tetap sesuai dengan set point yang diinginkan. Cara kerjanya yaitu

dengan memutus dan menghubungkan aliran listrik ke kompresor secara otomatis, tergantung pada kondisi suhu di dalam ruang pendingin



Gambar 2.12 *Thermostat*

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4. Fan Motor (Kipas Kondesor/Evaporator)

Komponen ini berfungsi untuk memperlancar pelepasan pada kondensor serta membantu peredaran udara dingin di dalam ruang *freezer.*



Gambar 2.13 Fan Motor (Kipas Kondensor/Evaporator)

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

5. Refrigeran (R134a dan R290)

Refrigeran merupakan komponen fluida yang digunakan dalam sistem pendingin untuk menyerap panas dari suatu ruang atau benda, kemudian melepaskannya ke lingkungan. Dalam proses kerjanya, refrigeran bersirkulasi dalam sistem tertutup dan mengalami perubahan fase secara berulang, yaitu dari cair menjadi uap dan kembali lagi ke bentuk cair. (Maula, 2023).



Gambar 2.14 Refrigeran

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, google)

2.3. Refrigeran

Refrigeran merupakan fluida kerja yang digunakan dalam sistem refrigerasi untuk menyerap dan memindahkan panas dari suatu ruang ke lingkungan sekitarnya. Proses ini berlangsung melalui perubahan fase, yaitu dari cair menjadi uap saat menyerap panas di evaporator, kemudian kembali menjadi cair ketika melepaskan panas di kondensor. (Wilis, 2011)

Selama siklus berlangsung, refrigeran mengalami perubahan tekanan dan temperatur yang memungkinkan terjadinya perpindahan kalor dari daerah bersuhu rendah ke daerah dengan suhu yang lebih tinggi. Oleh karena itu, jenis refrigeran yang digunakan sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem pendingin, khususnya terkait efisiensi energi dan nilai *Coefficient of Performance (COPideal)*. (Wisaksono, Hardimentis, & Rimni, 2024).

Selain mempertimbangkan aspek kinerja, pemilihan refrigeran juga perlu dilihat dari dampaknya terhadap lingkungan. Beberapa refrigeran konvensional diketahui memiliki nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang tinggi sehingga penggunaannya mulai dibatasi. Sebagai alternatif, refrigeran hidrokarbon seperti R290 mulai banyak dimanfaatkan karena lebih ramah lingkungan dengan nilai GWP yang jauh lebih rendah. (Zheng et al., 2022).

2.3.1. Proses Refrigeran

Untuk menjalankan fungsinya refrigeran mengalami beberapa proses di antaranya adalah: (Ivana, Imron, & Muhammad, 2023)

1. Kompresi

   Pada kompresor, refrigeran mengalami proses kompresi yang bersifat isentropik adiabatik. Dalam kondisi ini, tekanan refrigeran

meningkat secara signifikan, sehingga suhu jenuhnya juga ikut naik. Akibatnya, refrigeran keluar dari kompresor dalam kondisi bertemperatur tinggi sebelum masuk ke kondensor.

2. Kondensasi

   Refrigeran dengan tekanan dan temperatur tinggi kemudian mengalir menuju kondensor untuk melepaskan kalor ke lingkungan. Proses ini menyebabkan refrigeran mengalami penurunan suhu dan tekanan secara bertahap hingga berubah fase dari gas menjadi cair.

3. Ekspansi

   Pada tahap ekspansi, proses berlangsung secara isoentalpi, yaitu tanpa perubahan nilai entalpi. Meskipun demikian, tekanan dan temperatur refrigeran mengalami penurunan yang cukup besar. Setelah melewati kondensor, refrigeran dalam bentuk cair dialirkan ke pipa kapiler untuk menurunkan tekanan dan suhu sebelum masuk ke evaporator.

4. Evaporasi

   Refrigeran yang masuk ke evaporator berada dalam kondisi tekanan dan suhu rendah serta berbentuk campuran cair dan gas. Di dalam evaporator, refrigeran menyerap panas dari lingkungan sekitarnya hingga berubah sepenuhnya menjadi gas. Proses ini berlangsung pada kondisi isobar isotermal, dengan temperatur jenuh yang lebih rendah dibandingkan suhu ruang.

2.3.2. Jenis Refrigeran

Ditinjau dari sifat kimianya, refrigeran yang baik seharusnya tidak beracun, tidak bereaksi dengan komponen dalam sistem refrigerasi, serta tidak mudah terbakar. Selain itu, dampaknya terhadap lingkungan juga perlu diperhatikan, yaitu memiliki nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang rendah dan tidak merusak lapisan ozon (*Ozone Depleting Potential*/ODP = 0). (Aziz, 2009). Berikut merupakan beberapa jenis refrigeran:

2.3.2.1. Refrigeran Hidrokarbon

Refrigeran hidrokarbon merupakan salah satu alternatif pengganti refrigeran halokarbon seperti CFC. Jenis refrigeran ini dikenal lebih ramah lingkungan. Penggunaannya dinilai penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan, mengingat lapisan ozon di stratos V berfungsi melindungi bumi dari radiasi sinar ultraviolet yang berbahaya. Jika lapisan ozon rusak, dampaknya bisa cukup serius, seperti meningkatnya risiko kanker kulit, katarak, menurunnya daya tahan tubuh, hingga terganggunya ekosistem laut akibat rusaknya *phytoplankton* sebagai bagian dari rantai makanan.

2.3.2.2. Refrigeran CO_2

Refrigeran CO_2 termasuk salah satu refrigeran alami yang cukup banyak digunakan sebagai alternatif, terutama pada sistem refrigerasi seperti supermarket. Penggunaannya semakin berkembang sebagai pengganti refrigeran sintetis seperti CFC, HCFC, dan HFC karena lebih ramah lingkungan. Hal ini disebabkan CO_2 memiliki nilai ODP sebesar 0 dan GWP yang sangat rendah dibandingkan refrigeran sintetis lainnya. (Suamir et al., 2021).

Dalam penelitian ini, refrigeran yang digunakan adalah R134a dari golongan *hidrofluorokarbon (HFC)* serta R290 dari golongan hidrokarbon (HC).

2.3.2.3. Refrigeran 134a

Refrigeran R134a merupakan salah satu jenis refrigeran dari kelompok *hidrofluorokarbon (HFC)* yang sudah lama digunakan pada berbagai sistem pendingin, baik untuk kebutuhan rumah tangga maupun komersial, seperti kulkas, *freezer*, dan AC. R134a termasuk refrigeran murni yang tidak terdiri dari campuran, serta digunakan sebagai pengganti CFC-12, khususnya pada aplikasi dengan temperatur menengah hingga tinggi. Dalam sistem refrigerasi dan tata udara, R134a diklasifikasikan dalam kategori

keselamatan A1, yang menunjukkan bahwa refrigeran ini tidak mudah terbakar dan memiliki tingkat toksisitas yang rendah. (Hanzlan, Corvis & Karel, 2024).

Di balik keunggulan kinerjanya tersebut, R134a memiliki kelemahan dari sisi lingkungan karena nilai *Global Warming Potential (GWP)* cukup tinggi sekitar 1430. Meskipun tidak merusak lapisan *Ozon Depletion Potential* (ODP = 0) berarti zat tersebut tidak merusak lapisan ozon bumi. Hal ini menjadi salah satu alasan utama mengapa penggunaan R134a mulai dibatasi dan digantikan oleh refrigeran alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti R290, terutama pada sistem refrigerasi modern. (Muliawan et al., 2026).

2.3.2.4. Refrigeran 290

Refrigeran R290 merupakan refrigeran dari kelompok *hidrokarbon (HC)* yang saat ini mulai banyak digunakan sebagai pengganti refrigeran konvensional. Refrigeran R290 dikenal lebih ramah lingkungan karena tidak memiliki potensi merusak lapisan *Ozon Depletion Potential (ODP = 0)* dan nilai *Global Warming Potential (GWP)* yang sangat rendah, yaitu sekitar 3. Selain itu, karakteristik termodinamika yang dimilikinya cukup mendekati refrigeran seperti R134a, sehingga penggunaannya tidak memerlukan perubahan besar pada sistem yang sudah ada. (Muliawan et al., 2026).

Dari sisi performa kinerja, R290 memiliki kemampuan perpindahan panas yang cukup baik sehingga dapat meningkatkan efisiensi sistem pendingin. Penggunaan R290 juga cenderung menghasilkan nilai *Coefficient of Performance (COPideal)* yang lebih tinggi serta konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan dengan hidrofluorokarbon (Rima Nindia Selan et al., 2021). Hal ini membuat R290 semakin banyak dipertimbangkan sebagai alternatif refrigeran yang tidak hanya efisien, tetapi juga lebih ramah terhadap lingkungan. (Sumeru et al., 2023).

2.4. Menghitung Rumusan Permasalahan Umum

1. Daya Listrik

Daya listrik merupakan jumlah energi listrik yang digunakan kompresor selama proses pendinginan berlangsung. Daya listrik diperoleh dari hasil pengukuran tegangan dan arus selama sistem beroperasi. (Malau Jeremia Nikcon, et.al, 2021)

$$W_{Listrik} = V \cdot I \quad \textbf{(1)}$$

Dimana:

$W_{Listrik}$ = Daya listrik (Watt)
V = Tegangan (Volt)
I = Arus (Ampere)

2. *Coefficient of Performance (COPideal)*

Coefficient of Performance (COPideal) digunakan untuk menunjukkan nilai efisiensi sistem refrigerasi pada *freezer* 1/4 PK, baik yang menggunakan refrigeran R134a ataupun R290: (Aulia et al., 2025)

Berdasarkan entalpi:

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad \textbf{(2)}$$

Dimana:

COP = *Coefficient of Performance (COP)*
H1 = Entalpi refrigeran evaporator *out*/kompresor *in* (kJ/kg)
H2 = Entalpi refrigeran keluar kompresor (kJ/kg)
H4 Entalpi refrigeran masuk evaporator (kJ/kg)

3. *Energy Efficiency Ratio*

Pada sistem *freezer*, efisiensi menunjukkan seberapa besar energi listrik yang digunakan dapat diubah menjadi efek pendinginan secara efektif. Perhitungan *energy efisiensi ratio (EER)* dilakukan dengan mengisi kapasitas pendingan. (Malau Jeremia Nikcon, et.al, 2021)

$$EER = \frac{q_L}{W_{in}} \quad \textbf{(3)}$$

Dimana:

EER = *Energy Efisiensi Ratio*
q_L = *Cooling Capacity*
Watt = Kerja Daya Listrik (W)

Pada rumus perhitungan yang saya gunakan disini menggunakan perhitungan yang sudah sesuai dengan hasil pengambilan data eksperimen pada *freezer* 1/4 PK yaitu, nilai BTU disini dikonfersikan terlebih dahulu ke watt.

$$EER = \frac{Cooling\ Capacity\ (BTU/h) \div Watt\ (BTU/h)}{Watt} \quad \textbf{(4)}$$

Dimana:

EER = *Energy Efisiensi Ratio*
BTU/h = *Cooling Capacity*
Watt = Daya Listrik (W)