

BAB II

DASAR TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan tentang tinjauan pustaka yang mencakup hasil penelitian terdahulu serta dasar teori yang digunakan dalam merancang sistem refrigeran untuk *mini air cooled chiller* menggunakan refrigerant R-404A dengan integrasi sensor suhu RTD PT100 dan sensor tekanan Wisner WPT-71G Series - 71G Series berbasis PLC Schneider Modicon TM241CE24T. Teori yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini mencakup prinsip kerja sistem refrigerasi kompresi uap, karakteristik dan fungsi refrigerant R-404A, serta konsep dasar kerja dan integrasi sensor suhu dan tekanan dalam sistem kendali otomatis. Seluruh teori dan referensi yang dibahas dalam bab ini menjadi landasan utama dalam merancang dan mengimplementasikan sistem pendingin yang dirancang dalam penelitian ini.

2.1 Tinjauan Pustaka

Penyusunan tugas akhir ini didasarkan pada beberapa studi terdahulu yang relevan, sebagai referensi pendukung dalam pengembangan sistem HVAC utamanya *air cooled chiller*. Referensi ini menjadi dasar dalam perancangan dan pengembangan alat pada tugas akhir ini. Salah satu studi yang menjadi acuan adalah penelitian oleh Ranufani et al. (2024) yang mengembangkan sistem SCADA untuk pengaturan suhu pada water chiller hidroponik berbasis PLC Siemens LOGO. Penelitian ini menekankan visualisasi dan kontrol sensor suhu PT100 secara real-time melalui HMI internal dengan Easy Builder Pro, dalam lingkup pendinginan suhu air dalam pipa hidroponik dengan metode DFT (*Deep Flow Technique*)[6].

Referensi lain dari penelitian Samuel Panjaitan (2018) yang merancang mesin water chiller dengan kapasitas 6 kW menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap berbasis refrigeran R-22. Studi ini lebih menitikberatkan pada aspek perancangan komponen mekanis seperti kompresor, pipa kapiler, evaporator, dan kondensor. Walaupun belum menggunakan sistem kontrol PLC atau sistem kendali otomatis, penelitian ini menjadi dasar dalam perancangan termodinamika dan sirkulasi refrigeran yang menjadi inti sistem pendingin [7].

Referensi terakhir berasal dari Mutaufiq et al. (2020) yang merancang sistem mini water chiller berbasis termolistrik (Peltier) yang hemat energi dan ramah

lingkungan. Sistem ini dikendalikan secara sederhana dengan logika ON/OFF serta terintegrasi dengan smartphone melalui sistem monitoring jarak jauh. Meski tidak menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap, penelitian ini relevan sebagai perbandingan alternatif sistem pendingin sederhana berbasis elektronik[5].

Sebagai dasar analisis komparatif, penulis merangkum referensi tersebut dalam **Tabel 2.1**, yang memuat judul penelitian, fokus pembahasan, serta persamaan dan perbedaan masing-masing penelitian terhadap sistem yang dirancang dalam tugas akhir ini.

Tabel 2.1. Tinjauan Pustaka

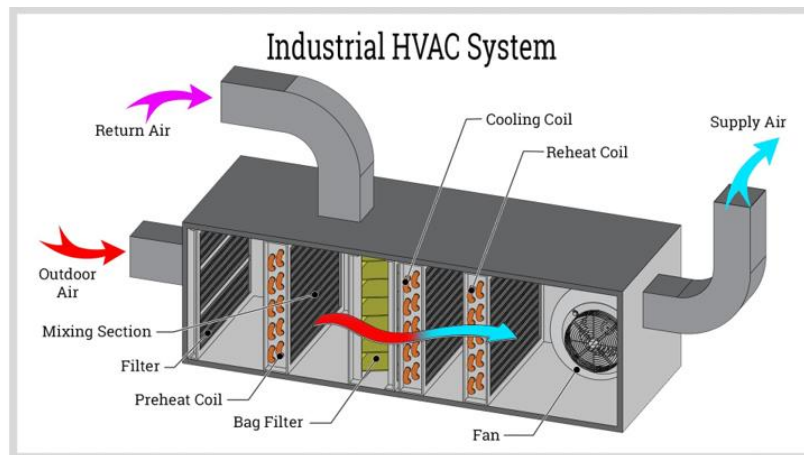
No.	Judul Penelitian	Fokus Pembahasan	Persamaan	Perbedaan
1.	Perancangan Sistem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) pada Water Chiller Hidroponik Menggunakan PLC Siemens LOGO (<i>Ranufani et al., 2024</i>)	Rancang bangun sistem kontrol suhu water chiller berbasis PLC Siemens dan monitoring SCADA	Sama-sama menggunakan PLC dan HMI/SCADA untuk mengontrol suhu media cair	Tidak menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dan tidak mengukur tekanan
2.	RANCANG BANGUN MESIN WATER CHILLER KAPASITAS 6 KILOWATT [7] (<i>Panjaitan S., 2018</i>)	Desain sistem chiller kapasitas besar berbasis kompresi uap dengan kompresor, kapiler, dan R-22	Menggunakan sistem pendingin kompresi uap dan fokus pada desain sistem termodinamika pendinginan	Tidak menggunakan PLC dan tidak mengintegrasikan kontrol otomatis atau sensor digital
3.	Smart Mini Water Chiller Ramah Lingkungan Berbasis Termoelektrik [5] (<i>Mutaufiq et al., 2020</i>)	Sistem pendingin mini berbasis Peltier dengan kontrol ON/OFF dan monitoring	Sama-sama merupakan sistem pendinginan cairan skala kecil dengan integrasi	Menggunakan Peltier, bukan kompresi uap; kontrol sederhana ON/OFF tanpa PLC industri dan

No.	Judul Penelitian	Fokus Pembahasan	Persamaan	Perbedaan
		jarak jauh berbasis IoT	kendali elektronik	tanpa sensor tekanan & suhu RTD

Berdasarkan beberapa studi yang menjadi dasar perancangan penelitian ini, penulis menawarkan studi dalam bentuk rancang bangun sistem refrigerasi *mini air chiller* berbasis kompresi uap menggunakan refrigeran R-404A, yang dikendalikan oleh PLC Schneider Modicon TM241CE24T, lengkap dengan modul analog, sensor tekanan dan suhu. Sistem ini tidak hanya mengatur suhu sebagai bagian dari pengendalian dan proteksi otomatis, tetapi juga parameter tekanan sebagai monitoring kinerja kompresor dalam sistem pendinginan, yang belum diintegrasikan secara penuh dalam penelitian sebelumnya. Dengan demikian, penelitian ini berperan dalam mengisi kesenjangan integrasi antara pengendalian suhu dan tekanan dalam sistem pendingin miniatur berbasis PLC, sekaligus menghadirkan sistem yang lebih representatif terhadap kondisi industri riil.

2.2 HVAC

Sistem HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) merupakan sistem mekanis yang dirancang untuk menciptakan dan mempertahankan kualitas udara dalam ruangan, termasuk pengaturan suhu, kelembapan, dan sirkulasi udara. HVAC bekerja secara terintegrasi sebagai sistem pemanas, pendingin, dan ventilasi untuk memastikan kenyamanan termal serta kualitas udara dalam berbagai jenis bangunan seperti gedung perkantoran, rumah sakit, dan pusat perbelanjaan. Konsep dasar HVAC mencakup tiga fungsi utama, yaitu pemanasan yang biasanya menggunakan boiler atau pemanas listrik, ventilasi untuk mengganti udara dalam ruangan dengan udara segar dari luar, serta pendinginan yang dilakukan dengan menyerap panas melalui refrigeran. Ketiga fungsi tersebut harus bekerja secara sinergis dan dikendalikan secara otomatis guna meningkatkan efisiensi dan menghemat energi[8].



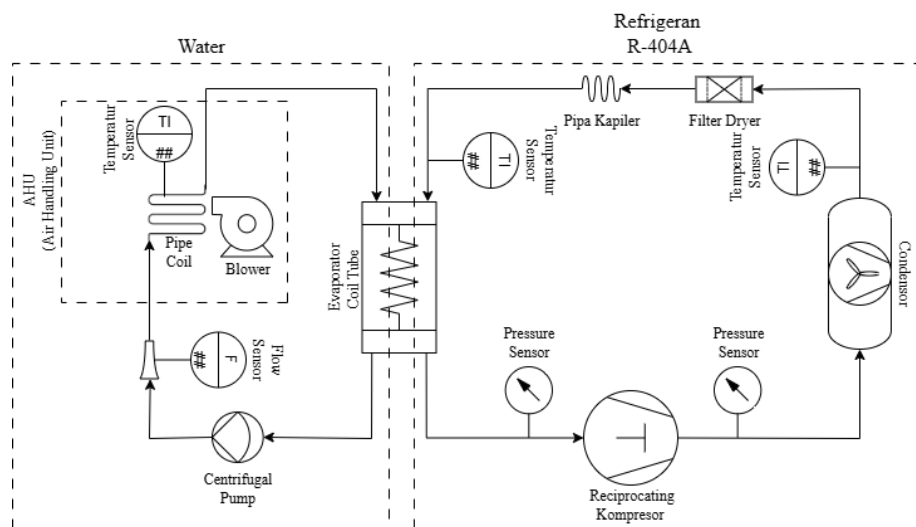
Gambar 2.1 HVAC Sistem Dalam Unit AHU (*Air Handling Unit*)

Pada **Gambar 2.1** merupakan salah satu contoh sistem industrial HVAC dalam bentuk sebuah *Air Handling Unit* (AHU). Komponen utama dalam sistem AHU tersebut meliputi ruang pencampur (*Mixing Section*), unit filtrasi primer (*Filter*) dan sekunder (*Bag Filter*), serta tiga jenis koil untuk transfer panas: koil pemanas awal (*Preheat Coil*), koil pendingin (*Cooling Coil*), dan koil pemanas ulang (*Reheat Coil*). Sistem tersebut bekerja dimana udara resirkulasi (*Return Air*) dan udara segar (*Outdoor Air*) dicampur, lalu dialirkan secara berurutan melalui komponen utama tadi untuk melalui proses penyaringan dan penyesuaian temperatur, sebelum akhirnya dihembuskan oleh kipas (*Fan*) sebagai *Supply Air* untuk ruangan.

Dalam merancang sistem HVAC yang efektif, perlu dilakukan analisis termodinamika bangunan untuk menghitung beban pendinginan dan pemanasan berdasarkan perubahan temperatur, serta pertukaran udara. Dengan mempertimbangkan seluruh parameter tersebut, sistem HVAC dirancang untuk menyediakan kapasitas yang cukup untuk menjaga suhu dan kelembapan ruangan sesuai standar kenyamanan termal. Dalam konteks ini, efisiensi energi menjadi perhatian utama, karena sistem HVAC yang tidak efisien dapat menyebabkan pemborosan energi yang signifikan. Oleh sebab itu, penerapan standar seperti SNI, ASHRAE, dan LEED menjadi penting untuk menciptakan sistem HVAC yang hemat energi[9]. Salah satu sistem yang digunakan dalam HVAC modern adalah Air Cooled Water Chiller yang menjadi topik dalam penelitian ini.

2.3 Mini air cooled chiller

Mini air cooled chiller adalah salah satu aplikasi dari sistem refrigerasi yang menggunakan metode pendinginan secara tidak langsung, dimana proses pendinginannya menggunakan dua refrigeran yaitu refrigeran primer dan refrigeran sekunder. Refrigeran primer yaitu refrigeran yang akan mengambil kalor dari refrigeran sekunder, kemudian refrigeran sekunder akan didistribusikan ke sistem lain yang kemudian akan mengambil kalor dari lingkungan. Komponen utama *mini air cooled chiller* ini sendiri meliputi kompresor, kondensor, evaporator, dan alat ekspansi yang mana kondensor dan evaporator yang digunakan sebagai komponen penukar panas dalam sistem pendingin.



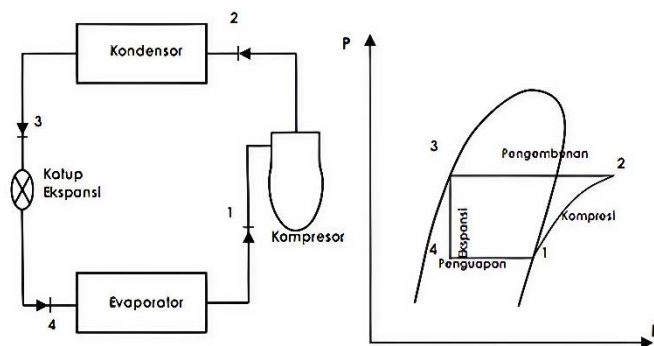
Gambar 2.2 Sistem *Mini Air Cooled Chiller*

(Dokumen Penulis)

Berdasarkan **Gambar 2.2** *mini air cooled chiller* bekerja berdasarkan prinsip mesin pendingin pada umumnya, yaitu sistem refrigerasi kompresi uap. Dalam sistem refrigerasi kompresi uap bagian evaporator refrigerant akan menyerap kalor dari refrigerant sekunder (air) sehingga keluaran air dari evaporator mengalami penurunan suhu. Air akan bergerak melalui saluran pipa menuju unit fan coil atau AHU (*Air Handling Unit*) yang nantinya terjadi proses penyerapan kalor dari ruangan sekitar oleh air sebagai refrigeran sekunder[10].

2.3.1 Siklus refrigerasi kompresi uap

Sistem pendingin yang umum digunakan saat ini adalah sistem pendingin dengan siklus kompresi uap. Siklus kompresi uap merupakan jenis siklus yang paling luas digunakan pada proses refrigerasi yang terdiri dari evaporator, kompresor, kondensor, dan alat ekspansi. Siklus ini bermula ketika refrigeran dalam bentuk fasa uap jenuh (*suction*) dikompresi oleh kompresor hingga tekanan dan temperature meningkat (*discharge*). Pada kondensor refrigeran dengan temperatur jenuhnya yang lebih tinggi dari temperatur lingkungan akan melepas kalor ke lingkungan kemudian berkondensasi sehingga fasanya berubah menjadi cair. Kemudian refrigeran diteruskan ke alat ekspansi bisa dengan ekspansion valve ataupun pipa kapiler yang berfungsi menurunkan tekanan refrigeran evaporator agar refrigeran berada dalam tekanan dan temperatur rendah agar dapat menguap dan menyerap panas secara efektif dalam evaporator, serta meregulasi aliran laju refrigeran dari cairan bertekanan tinggi menuju evaporator pada laju aliran yang sesuai dengan laju evaporasi pada evaporator. Dalam evaporator refrigeran menyerap panas dari media yang akan didinginkan (udara atau air) sehingga refrigeran dalam fase penguapan yang menyebabkan penurunan suhu pada media pendingin. Refrigeran uap bertekanan rendah dari evaporator akan dikompresi pada kompresor dengan siklus yang sama sampai kompresor tidak aktif[11].



Gambar 2.3 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap [12]

Berdasarkan **Gambar 2.3** siklus kompresi uap terdapat beberapa proses yang terjadi, berikut penjajarannya:

- Proses kompresi (1-2) terjadi dalam kompresor, dimana refrigeran dikompresi secara isentropik. Pada tahap ini, refrigeran yang awalnya berupa uap jenuh

bertekanan rendah dikompresi hingga menjadi uap bertekanan tinggi. Karena proses ini bersifat isentropik (entropi konstan), maka suhu refrigeran juga meningkat setelah keluar dari kompresor.

- b. Proses kondensasi (2-3) yang berlangsung di dalam kondensor. Di tahap ini, refrigeran yang memiliki tekanan dan suhu tinggi melepaskan panas ke udara sekitar sehingga mengalami perubahan fasa dari uap menjadi cair. Perpindahan panas terjadi antara refrigeran dan lingkungan, menyebabkan pengembunan uap menjadi cairan.
- c. Proses ekspansi (3-4) terjadi setelah kondensasi dan berlangsung secara isoenthalpy, di mana cairan refrigeran mengalami penurunan tekanan dan suhu melalui alat ekspansi, meskipun entalpinya tetap.
- d. Proses evaporasi (4-1) berlangsung di dalam evaporator, dengan kondisi tekanan dan suhu yang konstan (isobar-isothermal). Pada proses ini kalor dari dalam ruangan pendingin akan diserap oleh cairan refrigeran yang bertekanan rendah sehingga refrigeran berubah fasa menjadi uap bertekanan rendah. Selanjutnya, refrigeran kembali masuk ke dalam kompresor dan bersirkulasi lagi. Begitu seterusnya sampai kondisi yang diinginkan tercapai. Untuk mengevaluasi kinerja sistem ini, biasanya diperhatikan beberapa parameter seperti efek refrigerasi, kerja kompresor, dan *Coefficient of Performance* (COP)[13].

2.3.2 Hukum Termodinamika

Sistem refrigerasi kompresi uap bekerja berdasarkan prinsip dasar termodinamika, khususnya Hukum Termodinamika pertama dan kedua. Siklus refrigeran melalui kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator menggambarkan aplikasi nyata proses termodinamika yang kompleks. Analisis termodinamika dalam sistem ini tidak hanya penting untuk memahami bagaimana energi dan entropi berubah sepanjang siklus, tetapi juga untuk mengevaluasi efisiensi sistem, menentukan koefisien performa (COP), serta mengoptimalkan kinerja keseluruhan *chiller*. Berikut penjelasan tentang Hukum Termodinamika pertama dan kedua:

a. Hukum Termodinamika I (Hukum Kekekalan Energi)

Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Dalam konteks sistem refrigerasi, hukum ini menggambarkan bahwa energi panas yang diserap oleh refrigeran di evaporator (dari air dingin) akan diubah menjadi energi internal, kemudian sebagian dipindahkan melalui kerja mekanik oleh kompresor, dan akhirnya dilepaskan ke lingkungan melalui kondensor. Setiap perubahan energi pada masing-masing komponen sistem dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Q - W = \Delta U \quad (2.1)$$

di mana Q adalah energi panas yang ditransfer ke atau dari sistem, W adalah kerja yang dilakukan oleh atau pada sistem, dan ΔU adalah perubahan energi dalam sistem. Dalam konteks sistem pendingin, proses ini dapat divisualisasikan melalui diagram P-h untuk menghitung entalpi (jumlah energi dalam) di tiap titik, sehingga kerja kompresor ($h_2 - h_1$) dan kapasitas pendinginan ($h_1 - h_4$) dapat diestimasi secara akurat.[14]

Dalam siklus refrigerasi uap penerapan hukum termodinamika pertama yang merupakan hukum kekekalan energi akan didasarkan pada sistem aliran fluida (*steady flow system*), nantinya energi kinetik dan potensial akan berperan karena dalam sistem termodinamika nyata, fluida bisa bergerak (maka ada kecepatan yang berhubungan dengan energi kinetik) dan berada pada ketinggian tertentu (maka ada energi potensial). Jadi, secara lengkap, bentuk energi total suatu fluida dalam sistem termodinamika (per satuan massa) meliputi:

$$\begin{aligned} \Delta e &= \Delta u + \Delta e_k + \Delta e_p \\ \Delta e &= \Delta h + \left(\frac{v^2}{2}\right) + (g \cdot z) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sehingga bentuk umum Hukum Termodinamika I untuk sistem terbuka (kontrol volume) dalam kondisi steady flow dalam besaran laju aliran terhadap waktu:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left(\Delta h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) \quad (2.3)$$

Sedangkan dalam sistem refrigerasi kompresi uap energi kinetik dan potensial diabaikan karena kontribusinya terhadap total energi sistem sangat kecil

dibandingkan dengan perubahan energi dalam (Δu) atau entalpi (Δh), selain itu kecepatan aliran refrigeran tidak terlalu tinggi dan perbedaan ketinggian antar evaporator, kompresor, dan kondensor relatif kecil sehingga Hukum Termodinamika I untuk sistem terbuka (kontrol volume) dalam kondisi steady flow dalam besaran laju aliran terhadap waktu:

$$\begin{aligned}\dot{Q} - \dot{W} &= \dot{m}(\Delta h) \\ \dot{Q} - \dot{W} &= \dot{m}(h_{out} - h_{in})\end{aligned}\quad (2.4)$$

keterangan :

Δe	= total perubahan energi spesifik	(kJ/kg)
Δu	= perubahan energi dalam sistem	(kJ/kg)
Δh	= perubahan enthalpy (energi aliran fluida)	(kJ/kg)
Δek	= perubahan energi kinetik	(J/kg)
Δep	= perubahan energi potensial	(J/kg)
$\dot{Q}$	= laju kalor masuk/keluar	(kW)
$\dot{W}$	= laju kerja	(kW)
v	= kecepatan fluida	(m/s)
g	= percepatan gravitasi	(9.81 m/s ²)
z	= ketinggian	(m)
$\dot{m}$	= laju aliran massa	(kg/s)

Rumus ini nantinya yang akan digunakan sebagai dasar utama dalam menganalisis dan menghitung nilai energi pada setiap proses di sistem refrigerasi kompresi uap mulai laju kerja pada proses kompresi, proses kondensasi pada kondensor, dan proses evaporasi pada evaporator[10].

b. Hukum Termodinamika II

Hukum Termodinamika Kedua menjelaskan bahwa tidak semua energi panas dapat sepenuhnya diubah menjadi kerja mekanik tanpa disertai kerugian energi, dan bahwa energi panas secara alami mengalir dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Dalam sistem pendingin, untuk membalik arah alami aliran panas (dari suhu rendah ke suhu tinggi), diperlukan kerja eksternal, yang dalam hal ini disediakan oleh kompresor. Hal ini menunjukkan pentingnya konsep

entropi (S), yakni ukuran tingkat ketidakteraturan atau degradasi energi dalam sistem. Proses kompresi secara ideal bersifat isentropik (entropi konstan), artinya entropi sistem tidak berubah selama kompresi, $\Delta S = 0$. Namun dalam praktiknya, gesekan dan kehilangan panas menyebabkan peningkatan entropi, sehingga sistem mengalami irreversibilitas. Selanjutnya, proses ekspansi yang terjadi pada pipa kapiler atau katup ekspansi menyebabkan peningkatan entropi yang signifikan tanpa adanya kerja yang dilakukan ($W = 0$), hal ini adalah akibat dari penurunan tekanan secara tiba-tiba yang tidak dapat dimanfaatkan untuk kerja[14].

Sementara itu, proses evaporasi dan kondensasi berlangsung pada tekanan tetap, namun tetap menyebabkan kenaikan entropi karena perpindahan kalor. Sementara itu, proses ekspansi pada pipa kapiler, yang berlangsung secara adiabatik dan isenthalpi, justru meningkatkan entropi secara drastis akibat penurunan tekanan tanpa disertai kerja. Hukum ini menjelaskan keterbatasan efisiensi sistem refrigerasi atau dikenal *Coefficient of Performance* (COP) dan menjadi dasar dari siklus Carnot terbalik yang mana suatu model teoretis ideal yang merepresentasikan batas maksimum kinerja sistem pendingin.

2.3.3 COP (*Coefficient of Performance*)

Coefficient of Performance (COP) pada sistem refrigerasi merupakan indikator efisiensi termal dari suatu siklus pendinginan. COP menggambarkan efisiensi siklus sebagai rasio antara kalor yang diserap oleh refrigeran di evaporator (yaitu energi yang bertanggung jawab atas proses pendinginan) terhadap energi kalor ekuivalen yang harus diberikan untuk menggerakkan kompresor. COP secara matematis dinyatakan sebagai perbandingan antara jumlah panas yang diserap dari ruang pendingin (Q_e) dengan kerja yang dilakukan oleh kompresor (W_{in}). Efisiensi pendinginan tidak hanya tergantung pada besar kecilnya panas yang diserap, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh performa kompresor. Secara matematis, hubungan tersebut dituliskan sebagai:

$$COP_{aktual} = \frac{Q_e}{W_{in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2.5)$$

Hukum Termodinamika II mengindikasikan bahwa selalu ada energi yang hilang dalam bentuk peningkatan entropi sehingga COP aktual akan selalu lebih kecil dari

COP siklus Carnot ideal, menandakan adanya *irreversibilitas* dalam sistem. Dimana COP siklus Carnot dituliskan:

$$COP_{\text{Carnot}} = \frac{T_e}{T_k - T_e} \quad (2.6)$$

COP Carnot sendiri adalah efisiensi teoretis maksimal dari sistem refrigerasi atau pompa kalor yang bekerja secara ideal berdasarkan prinsip siklus Carnot yang mana semakin kecil selisih suhu antara T_k dan T_e semakin tinggi COP-nya. Sehingga efisiensi sistem untuk menunjukkan kinerja efisiensi yaitu perbandingan antara COP aktual dengan COP carnot pada temperatur kerja yang sama dapat diperoleh menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{COP_{\text{aktual}}}{COP_{\text{Carnot}}} \times 100\% \quad (2.7)$$

keterangan:

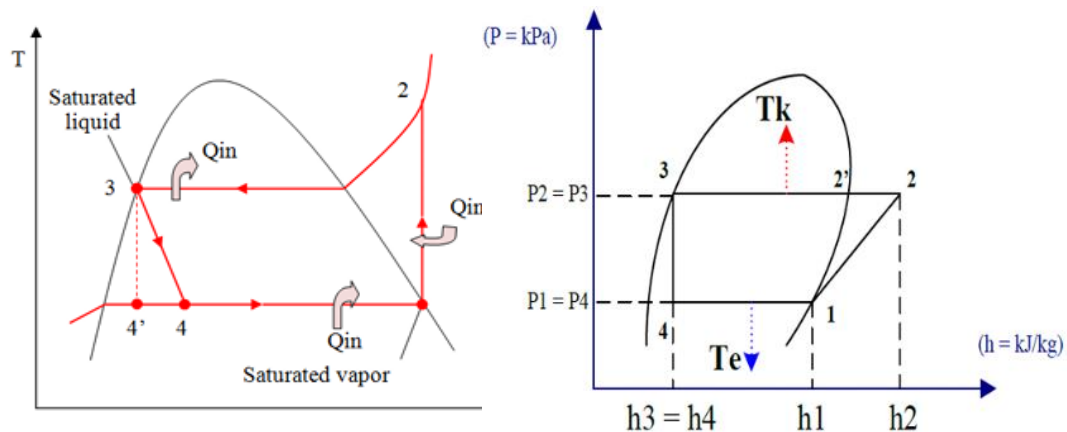
Q_e	= kalor yang diserap oleh evaporator	(kW)
W_c	= kerja kompresi yang dilakukan	(kW)
h_1	= entalpi dari refrigeran pada titik 1	(kJ/kg)
h_2	= entalpi dari refrigeran pada titik 2	(kJ/kg)
h_4	= entalpi dari refrigeran pada titik 4	(kJ/kg)
T_e	= temperatur evaporasi	(K)
T_k	= temperatur kondensasi	(K)

Dengan memahami konsep ini, perancangan dan optimasi *air-cooled chiller* dapat dilakukan dengan meminimalkan *irreversibilitas* untuk meningkatkan efisiensi pendinginan[11].

2.3.4 Diagram T-s dan P-h

Dalam analisis sistem refrigerasi, khususnya pada siklus kompresi uap, digunakan dua jenis diagram utama untuk memahami dan menghitung proses termodinamika yang terjadi, yaitu diagram T-s (Temperatur–Entropi) dan diagram P-h (Tekanan–Entalpi). Diagram T-s menunjukkan hubungan antara temperatur dan entropi, yang berguna untuk menggambarkan perubahan energi dalam bentuk panas selama proses-proses seperti evaporasi, kompresi, kondensasi, dan ekspansi. Dalam diagram ini, area berbentuk kubah menggambarkan zona fasa campuran

antara cair dan uap. Di dalam kubah tersebut, refrigeran berada dalam kondisi jenuh, sementara di luar kubah berada pada fase cair subdingin (*subcooled*) atau uap panas lanjut (*superheated*). Diagram ini sangat bermanfaat untuk melihat efisiensi proses dan perubahan entropi secara visual.



Gambar 2.4 Diagram T-s dan Diagram P-h Sistem Refrigeran[15]

Sementara itu, diagram P-h pada **Gambar 2.4** menggambarkan hubungan antara tekanan dan entalpi, dan lebih umum digunakan dalam perhitungan teknik karena memberikan gambaran kuantitatif mengenai jumlah energi panas yang diserap atau dilepaskan serta kerja yang dilakukan kompresor. Dalam diagram P-h, kubah saturasi juga digunakan untuk memisahkan daerah cair, campuran, dan uap, dengan proses evaporasi dan kondensasi biasanya berlangsung pada tekanan konstan. Proses ekspansi tampak sebagai penurunan tekanan yang tajam dengan perubahan entalpi yang hampir konstan. Kedua diagram ini saling melengkapi dan sangat penting dalam mendesain, menganalisis, serta meningkatkan efisiensi sistem pendingin[14]. Dari diagram P-h itu kita dapat menganalisis setiap proses yang ada pada siklus refrigerasi kompresi uap seperti berikut;

a. Proses Kompresi

Dalam proses ini mengacu pada kondisi dimana tidak terjadi pemindahan panas antara sistem (dalam hal ini refrigeran di dalam kompresor) dan lingkungan sekitarnya selama proses berlangsung. Dengan kata lain, sistem ini dianggap terisolasi secara termal sehingga seluruh perubahan energi yang terjadi hanya berasal dari kerja mekanik yang berasal dari kompresor, bukan dari tambahan atau pelepasan kalor. Secara matematis hal ini dinyatakan dengan $Q=0$. Oleh karena itu,

energi yang dianalisis dalam proses kompresi hanya berfokus pada perubahan entalpi akibat kerja kompresor. Jadi berdasarkan **Gambar 2.4** Dalam proses kompresi dapat dirumuskan dengan:

$$W_{In} = \dot{m}_{Ref}(h_2 - h_1) \quad (2.8)$$

Dimana:

W_{In}	= daya masuk ke kompresor	(kW)
$\dot{m}_{Ref}$	= laju aliran massa dalam proses kompresi	(kg/s)
h_1	= entalpi dari refrigeran pada titik 1	(kJ/kg)
h_2	= entalpi dari refrigeran pada titik 2	(kJ/kg)

[10]

b. Proses Kondensasi

Pada proses kondensasi dalam siklus kompresi uap, asumsi yang umum digunakan adalah bahwa perubahan energi kinetik dan energi potensial tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap total perubahan energi sistem. Nilai ini dianggap tidak berpengaruh signifikan karena perbedaan kecepatan aliran dan elevasi antar titik dalam sistem relatif kecil. Oleh karena itu, lebih difokuskan pada perubahan entalpi sebagai representasi utama dari perpindahan energi panas dalam sistem, karena kondensor juga tidak memiliki elemen mekanis yang menghasilkan atau menerima kerja secara langsung. Oleh karena itu, kerja W pada kondensor juga dianggap nol, dan proses ini cukup dianalisis melalui perubahan entalpi akibat pelepasan panas.

$$Q_k = \dot{m}_{Ref}(h_2 - h_3) \quad (2.9)$$

Dimana:

Q_k	= laju aliran kalor kondensasi	(kW)
$\dot{m}_{Ref}$	= laju aliran massa dalam proses kondensasi	(kg/s)
h_2	= entalpi dari refrigeran pada titik 2	(kJ/kg)
h_3	= entalpi dari refrigeran pada titik 3	(kJ/kg)

[10]

c. Proses *Throttling*

Proses *throttling*, yang terjadi dalam komponen seperti pipa kapiler atau alat ekspansi, merupakan proses di mana tekanan refrigeran diturunkan secara drastis tanpa adanya pertukaran kalor maupun kerja mekanis. Dalam proses ini, tidak ada kerja yang dilakukan atau dihasilkan ($W = 0$) karena tidak terdapat komponen bergerak atau mekanisme fisik untuk menghasilkan kerja. Proses *throttling* ini juga diasumsikan adiabatik, yang artinya tidak ada pertukaran kalor dengan lingkungan ($q = 0$). Oleh karena itu, satu-satunya parameter energi yang tetap dalam proses ini adalah entalpi, sehingga proses *throttling* diklasifikasikan sebagai proses isentalpik dengan rumus:

$$h_1 = h_3 \quad (2.10)$$

Dimana:

h_1 = entalpi dari refrigeran pada titik 1 (kJ/kg)

h_3 = entalpi dari refrigeran pada titik 4 (kJ/kg)

[10]

d. Proses Evaporasi

Dalam proses evaporasi juga tidak jauh berbeda dengan kondensor dimana perubahan energi kinetik dan energi potensial tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap total perubahan energi sistem, karena aliran dan elevasi antar titik dalam sistem relatif kecil. Selain itu evaporator juga tidak memiliki elemen mekanis yang menghasilkan atau menerima kerja secara langsung. Oleh karena itu, kerja W pada kondensor juga dianggap nol dan hanya dipengaruhi perubahan entalpi akibat pelepasan panas.

$$Q_e = \dot{m}_{Ref}(h_1 - h_4) \quad (2.11)$$

Dimana:

Q_e = laju aliran kalor evaporasi (kW)

$\dot{m}_{Ref}$ = laju aliran massa dalam proses evaporasi (kg/s)

h_1 = entalpi dari refrigeran pada titik 1 (kJ/kg)

h_4 = entalpi dari refrigeran pada titik 4 (kJ/kg)

[10].

e. Laju aliran massa ($\dot{m}_{Ref}$)

Laju aliran massa refrigeran ($\dot{m}_{Ref}$) dapat dihitung berdasarkan perbandingan antara daya masuk ke kompresor terhadap kerja kompresi, yang merupakan selisih entalpi refrigeran antara titik masuk dan keluar kompresor. Persamaan ini dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{m}_{Ref} = \frac{\text{daya masuk kompresor}}{\text{kerja kompresi}} = \frac{\dot{W}_{in}}{h_2 - h_1} \quad (2.12)$$

Dimana:

$\dot{m}_{Ref}$	= Laju aliran massa refrigeran	(kg/s)
$\dot{W}_{in}$	= daya aktual yang disuplai ke kompresor	(kW)
h_1	= entalpi dari refrigeran pada titik 1	(kJ/kg)
h_2	= entalpi dari refrigeran pada titik 2	(kJ/kg)

Rumus ini berguna dalam analisis termodinamika sistem refrigerasi kompresi uap untuk menentukan seberapa besar massa refrigeran yang bersirkulasi per satuan waktu agar dapat mempertahankan proses pendinginan. Nilai $\dot{m}_{Ref}$ yang dihasilkan digunakan untuk menghitung kapasitas pendinginan serta efisiensi sistem (COP)[10].

2.4 Bagian Komponen *Mini air cooled chiller*

Tidak jauh berbeda dengan pendingin lainnya seperti *air conditioning* (AC) dan kulkas, *mini air cooled chiller* memiliki komponen utama berupa kompresor, kondensor, evaporator dan katup ekspansi. Selain itu, *mini air cooled chiller* juga memiliki komponen pendukung seperti *filter dryer*. Perbedaan *chiller* sendiri dengan pendingin AC maupun kulkas adalah di media yang didinginkan yang mana AC dan kulkas mendinginkan udara sedangkan *chiller* mendinginkan air sebagai refrigeran sekunder. Berikut penjelasan fungsi dan bagian komponen chiller:

2.4.1 Kompresor

Kompresor dalam refrigerasi kompresi uap merupakan komponen vital yang digunakan sebagai penggerak utama yang mensirkulasikan refrigeran ke seluruh sistem. Fungsi utamanya menghisap uap refrigeran berekanan dan bersuhu rendah



Gambar 2.6 Kompresor Secop SC15CL [17]

Kompresor Secop SC15CL pada **Gambar 2.6** merupakan salah satu tipe hermetic *reciprocating compressor* yang dirancang khusus untuk digunakan dengan refrigerant R-404A, yang umum dipakai dalam aplikasi komersial seperti *freezer*, *showcase* pendingin, dan *mini chiller*. Kompresor ini beroperasi pada rentang tegangan 220–240V. Kompresor SC15CL menggunakan sistem kerja satu silinder dan dilengkapi dengan start relay, overload protector, dan sistem kontrol internal. Karakteristik termodinamikanya sangat kompatibel dengan refrigerant R-404A, yang memiliki tekanan kerja tinggi dan memerlukan sistem kompresi yang kuat namun efisien.

Efisiensi kerja kompresor torak sangat dipengaruhi oleh rasio kompresi, kondisi suhu refrigeran, dan sistem pelumasan yang baik. R-404A, sebagai refrigeran HFC (Hydrofluorocarbon), tidak larut dengan baik dalam oli mineral konvensional. Oleh karena itu, digunakan oli sintetik jenis polyol ester (POE) yang memiliki kompatibilitas tinggi dengan R-404A. Oli POE mampu larut dengan baik dalam refrigeran, memastikan pelumasan yang efektif pada komponen-komponen bergerak di dalam kompresor, serta mencegah terjadinya keausan dan kerusakan akibat gesekan[17]. Untuk spesifikasi Kompresor Secop SC15CL dapat dilihat dari **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2. Spesifikasi Kompresor Secop SC15CL [17]

Parameter	Spesifikasi
Konfigurasi Motor	CSIR (<i>Capacitor Start – Induction Run</i>)
Catu Daya	220-240V/50Hz

Parameter	Spesifikasi
Rentang Tegangan	198-254V
Starting torsi	HST (<i>High Starting Torque</i>)
Tipe Pelumas	Polyolester
Kapasitas pelumas	499cm ³ / 16,9fl.oz
<i>Refr. charge - limit</i>	1300g / 45,9oz
Proteksi Motor	1 ~ <i>internal</i>
Refrigeran	R404A, R507
Pemutus Arus	20,43A
Komponen (<i>pre-assembled</i>)	Relay start capacitor (80μF)

2.4.2 Kondensor

Kondensor merupakan komponen sistem refrigeran yang berfungsi menerima uap refrigeran bertekanan dan suhu tinggi dari kompresor lalu melepaskan kalor dengan mendinginkan uap tersebut hingga mencapai titik embunnya melalui pelepasan kalornya. Pelepasan kalor pada kondensor tersebut menyebabkan uap itu mengembun dan berubah fase ke dalam bentuk cairan[18].



Gambar 2.7 Kondensor
(Dokumen Penulis)

Kondensor yang digunakan pada sistem Mini air cooled chiller ini yaitu kondensor pendingin udara seperti pada **Gambar 2.7** Kondensor jenis ini terdiri dari koil pipa pendingin yang bersirip pelat (aluminium atau tembaga). Udara mengalir dengan arah tegak lurus pada bidang pendingin, gas refrigeran yang bertemperatur tinggi masuk ke bagian atas dari koil dan secara berangsur mencair

dalam alirannya ke bawah. Kondensor udara sendiri memiliki efisiensi yang dipengaruhi oleh laju aliran udara, luas permukaan sirip, dan suhu lingkungan[2].

Kondensor ini dilengkapi fan bantu untuk pelepasan kalornya. Tipe fan pada kondensor ini yaitu tipe M4Q045-CA03-51 dengan motor jenis *shaded pole* atau *Permanent-Split Capacitor* (PSC) produk dari ebm-papst yang dirancang untuk menggerakkan kipas aksial dalam sistem ventilasi, pendingin, dan HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Motor ini memiliki daya rendah dan putaran tetap sehingga memungkinkan pengoperasian terus-menerus dalam lingkungan industri yang membutuhkan pendinginan stabil dan berkesinambungan. Selain itu, motor ini memiliki fitur proteksi termal (thermal protector) yang menjaga motor dari overheating akibat beban berlebih atau suhu lingkungan tinggi[19]. Untuk spesifikasi fan M4Q045-CA03-51 dapat dilihat pada **Tabel 2.3** berikut.

Tabel 2.3. Spesifikasi Fan M4Q045-CA03-51[19]

Parameter	Spesifikasi
Catu Daya	230 V AC/50 Hz, 230 V AC/60 Hz (1~)
Kecepatan	1300 r/min, 1500 r/min
Daya input	36 W, 34 W
Daya output	10 W, 9W
Arus	0.25 A , 0.22 A
Arus Starting	0.33 A, 0.3 A

2.4.3 Filter Dryer

Filter dryer merupakan salah satu komponen penting dalam sistem refrigerasi yang berfungsi untuk menyaring kotoran serta menghilangkan kandungan uap air dari refrigeran sebelum memasuki komponen ekspansi. Komponen ini berbentuk tabung yang di dalamnya terdapat media penyerap kelembapan (*desikant*), saringan partikel, dan penahan agar partikel desikant tidak ikut terbawa aliran refrigeran. Untuk menjaga desikant tetap padat di dalam tabung, biasanya digunakan pegas penekan pada salah satu sisi saringan[20].



Gambar 2.8 *Filter Dryer* Tembaga
(Dokumen Penulis)

Filter dryer copper seperti pada **Gambar 2.8** merupakan alat bantu yang digunakan pada refrigeration dengan jenis refrigerant halogen (*fluor*) khususnya R-404A yang akan digunakan pada sistem ini nantinya. Didalam *filter dryer* berisi suatu bahan pengering yang disebut (*dessicant*) digunakan untuk menyerap air yang dikandung refrigeran, jenis bahan pengering yang sering digunakan adalah silica gel karena mempunyai daya serap air lebih besar. Bahan pengering tersebut setelah kotor ada yang dapat diganti dan ada pula yang tidak dapat diganti tergantung dari konstruksi tabung *filter dryer*. Pada refrigerasi alat bantu *filter dryer* ditempatkan di saluran cairan refrigerant tekanan tinggi yaitu saluran antara kondensor dan ekspansi[20].

2.4.4 Alat Ekspansi Pipa Kapiler

Alat ekspansi adalah salah satu komponen dalam sistem refrigerasi uap yang berfungsi sebagai pengatur tekanan dan laju aliran refrigeran menuju evaporator. Alat ini memiliki dua fungsi utama, yaitu menurunkan tekanan refrigeran dalam fase cair yang berasal dari kondensor, serta mengatur jumlah refrigeran masuk ke evaporator sesuai kebutuhan pendinginan. Alat ekspansi yang umum digunakan yaitu pipa kapiler dan katup ekspansi termostastik (*thermostatic expansion valve/TEV*). [13]

Pada sistem *mini air cooled chiller* ini digunakan pipa kapiler dimana memiliki dimensi kecil untuk mengendalikan refrigeran dari sisi tekanan tinggi ke dalam sisi tekanan rendah dalam sistem. Ketika refrigeran cair mengalir melalui pipa kapiler, terjadi penurunan tekanan (*pressure drop*) yang signifikan akibat gesekan dan efek pembatasan aliran. Proses ini tidak hanya menurunkan tekanan, tetapi juga secara simultan menurunkan suhu refrigeran sehingga sesuai dengan suhu operasi evaporator.



Gambar 2.9 Pipa Kapiler[13]

Digunakan pipa kapiler seperti pada **Gambar 2.9** dalam sistem ini salah satunya karena kemudahan saat *startup* (sistem dinyalakan kembali). Saat sistem tidak beroperasi, tekanan di sisi kondensor dan evaporator dapat mengalami kesetimbangan karena tidak adanya kontrol aktif seperti pada katup ekspansi, sehingga beban awal pada kompresor saat start menjadi lebih ringan dan dapat memperpanjang umur kompresor. Selain itu desain pipa kapiler yang sederhana, tidak memerlukan aktuator, serta perangkat elektronik menjadikannya lebih efisien jika dibandingkan dengan katup ekspansi termostatik untuk sistem pendingin berkapasitas kecil[13].

2.4.5 Evaporator

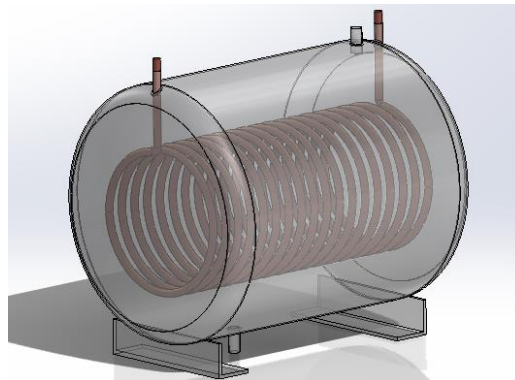
Evaporator adalah jenis dari penukar kalor sebagai media pemindahan kalor melalui permukaan evaporator agar refrigerant cair menguap dan menyerap panas dari suatu ruangan. Refrigeran yang berada dalam fase campuran cair jenuh dan uap menyerap kalor sehingga berubah menjadi uap. *Heat transfer* terjadi karena temperatur refrigeran yang lebih rendah daripada temperatur disekitar evaporator[18].



Gambar 2.10 *Helical Coil*

(Dokumen Penulis)

Evaporator yang akan digunakan dalam sistem ini yaitu evaporator dengan *helical coil* yang dapat dilihat pada **Gambar 2.10**. *Evaporator immersed helic coil* memiliki peran penting dalam sistem termal karena kemampuannya untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas melalui desain spiral dalam sistem pendingin dengan kapasitas kecil hingga menengah, seperti pada mesin chiller atau unit pendingin air sederhana. Sistem ini bekerja dengan merendam koil atau pipa berisi refrigeran ke dalam suatu wadah berisi air. Desain ini memungkinkan panjang tabung yang lebih besar dalam ruang terbatas, serta menghasilkan aliran tidak teratur (turbulen) yang mempercepat pencampuran fluida dan memperkecil lapisan batas termal, sehingga mempercepat proses pertukaran energi panas.



Gambar 2.11 *Evaporator Helical Coil Tube and Shell*
(Dokumen Penulis)

Ketika refrigerant mengalir melalui koil dalam bentuk cair bersuhu rendah, ia menyerap panas dari air pada *evaporator helical coil tube and shell* pada **Gambar 2.11** hingga menyebabkan air menjadi dingin dan refrigerant berubah fase menjadi uap. Untuk kapasitas air sendiri dapat ditentukan menyesuaikan dengan volume tabung yang digunakan, dengan rumus:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (2.13)$$

Untuk proses perpindahan panas sendiri berlangsung secara efisien karena adanya kontak langsung antara dinding koil dan fluida pendingin dan untuk perpindahan kalor ke air yang dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.14)$$

Sehingga kapasitas pendinginan dapat dihitung dengan rumus :

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.15)$$

dengan :

V	= volume tabung	(cm ³)
π	= phi (3,14)	(cm ³)
r^2	= jari-jari tabung	(cm ³)
h	= ketinggian tabung	(cm ³)
Q	= perpindahan kalor	(kj)
m	= massa air	(kg)
c	= kalor jenis air	(kj/kg)
ΔT	= target suhu air	(°C)
P	= kapasitas pendinginan	(kj)
t	= waktu pendinginan	(s)

[2]

2.5 Refrigeran

Refrigeran adalah zat cair yang bersirkulasi dalam sistem refrigerasi untuk menyerap panas melalui ekspansi dan evaporasi, sehingga menghasilkan efek pendinginan. Setiap refrigeran memiliki karakteristik termodinamika berbeda yang memengaruhi kinerjanya[4].

Refrigeran yang umum digunakan sekarang mengandung CFC (Chlorofluorocarbon) dan HFC (Hydrofluorocarbon) dalam sistem pendingin telah terbukti memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, terutama dalam hal kerusakan lapisan ozon dan peningkatan pemanasan global. CFC diketahui dapat merusak lapisan ozon di atmosfer. Sementara itu, meskipun HFC tidak merusak lapisan ozon, namun senyawa ini memiliki potensi pemanasan global (*Global Warming Potential/GWP*) yang cukup tinggi[21].

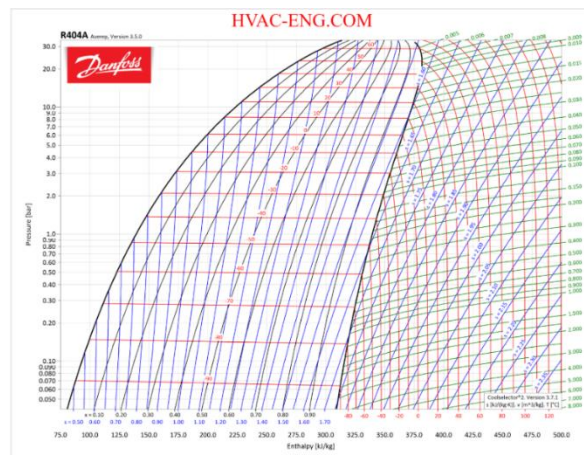
Untuk mengantisipasi hal ini, maka pemakaian serta produksi zat-zat yang dapat menimbulkan kerusakan lapisan ozon ini mulai dilarang secara nasional maupun internasional. Sebagai tindak lanjut dari larangan ini maka dibuatlah jenis refrigerant yang tidak menandung bahan yang dapat merusak lapisan ozon, salah satu alternatif yang digunakan untuk menggantikan refrigeran jenis ini adalah R-404A[4].

2.5.1 Refrigerant R-404A

Refrigeran R-404A adalah campuran non-azeotropik dari tiga senyawa hidrofluorokarbon (HFC): R-125, R-143a, dan R-134a. Senyawa ini dikembangkan sebagai pengganti refrigeran R-502 dan R-22, yang memiliki dampak lingkungan signifikan terhadap lapisan ozon. Dalam aspek termodinamika, R-404A memiliki kapasitas pendinginan spesifik yang tinggi dan cocok digunakan pada sistem refrigerasi berskala besar maupun kecil serta mampu beroperasi di berbagai suhu dan memiliki tekanan tinggi sehingga resiko pembekuan evaporator rendah. [22]. Namun, nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang cukup tinggi menjadi salah satu kekurangannya. Meski demikian, R-404A tetap relevan dalam desain sistem pendingin yang memprioritaskan kestabilan suhu dan tekanan, khususnya pada sistem *mini water chiller* atau *cold room*[23]. Berikut untuk karakteristik dari refrigeran R-404A pada **Tabel 2.4** dan diagram P-h refrigeran R-404A pada **Gambar 2.12** yang dapat digunakan untuk menilai efektivitas desain sistem refrigerasi.

Tabel 2.4 Tabel Spesifikasi Refrigeran R-404A[4]

Spesifikasi	R-404A
<i>Name-Scientific</i>	Blend of R-125 (44±2%), R-143a (52±1%), & R-134a (4±2%) HFC-404A
<i>Ozone Depletion Potential</i>	0
<i>Global Warming Potential</i>	3,922
<i>Application</i>	<i>Low to Medium Temperature Systems</i>
<i>Replacement For</i>	CFC R-502, R-12, & R-22
<i>Toxicity Levels</i>	<i>A (No Toxicity Identified.)</i>
<i>Flammability Levels</i>	<i>Class 1 -No Flame Propagation</i>
<i>Boiling Point</i>	-46.6° Celsius or -51.88° Fahrenheit
<i>Critical Temperature</i>	72.14° Celsius or 161.852° Fahrenheit
<i>Critical Pressure</i>	3.735 MPA or 541.716 PSI



Gambar 2.12 Diagram P-H Refrigeran R-404A[24]

Refrigerant Guys
PT – Chart R404A

ChemPenn
Refrigerant Gases

Saturation Pressure-Temperature Data for R-404A (psig)*

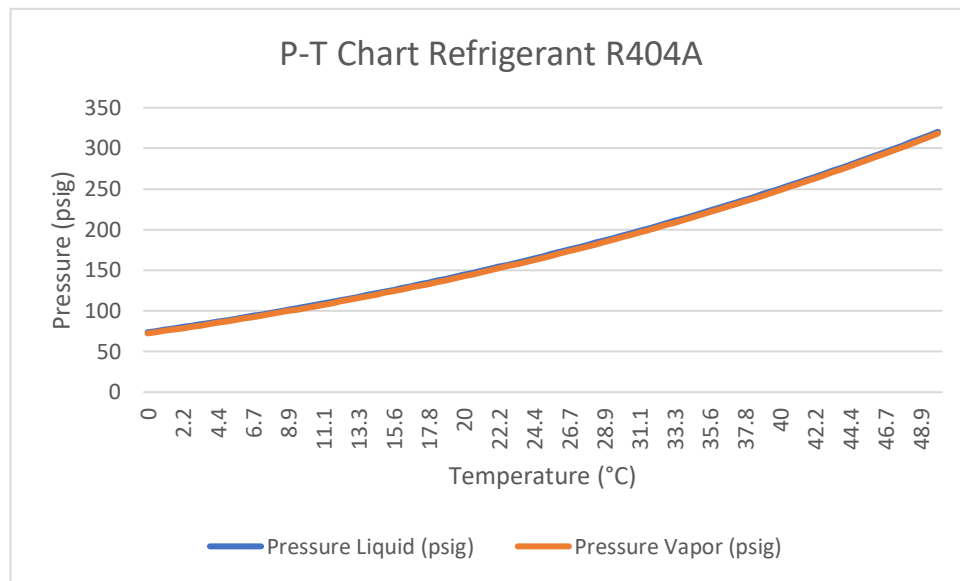
Temp (°F)	Pressure Liquid Vapor	Temp (°C)	Temp (°F)	Pressure Liquid Vapor	Temp (°C)	Temp (°F)	Pressure Liquid Vapor	Temp (°C)	Temp (°F)	Pressure Liquid Vapor	Temp (°C)
-49	0.0	0.3	-45.0	1	34.7	33.6	-17.2	51	107.2	105.6	10.6
-48	1.3	0.7	-44.4	2	35.7	34.6	-16.7	52	109.2	107.6	11.1
-47	1.7	1.2	-43.9	3	36.7	35.6	-16.1	53	111.2	109.6	11.7
-46	2.1	1.6	-43.3	4	37.7	36.6	-15.6	54	113.3	111.6	12.2
-45	2.6	2.0	-42.8	5	38.8	37.7	-15.0	55	115.3	113.6	12.8
-44	3.0	2.4	-42.2	6	39.8	38.7	-14.4	56	117.4	115.7	13.3
-43	3.5	2.9	-41.7	7	40.9	39.8	-13.9	57	119.5	117.8	13.9
-42	4.0	3.4	-41.1	8	42.0	40.9	-13.3	58	121.7	119.9	14.4
-41	4.4	3.8	-40.6	9	43.1	42.0	-12.8	59	123.8	122.1	15.0
-40	4.9	4.3	-40.0	10	44.3	43.1	-12.2	60	126.0	124.2	15.6
-39	5.4	4.8	-39.4	11	45.4	44.3	-11.7	61	128.2	126.4	16.1
-38	5.9	5.3	-38.9	12	46.6	45.4	-11.1	62	130.5	128.7	16.7
-37	6.4	5.8	-38.3	13	47.8	46.6	-10.6	63	132.7	130.9	17.2
-36	7.0	6.3	-37.8	14	49.0	47.8	-10.0	64	135.0	133.2	17.8
-35	7.5	6.8	-37.2	15	50.2	49.0	-9.4	65	137.3	135.5	18.3
-34	8.0	7.4	-36.7	16	51.5	50.2	-8.9	66	139.7	137.8	18.9
-33	8.6	7.9	-36.1	17	52.7	51.5	-8.3	67	142.0	140.2	19.4
-32	9.2	8.5	-35.6	18	54.0	52.7	-7.8	68	144.4	142.6	20.0
-31	9.7	9.0	-35.0	19	55.3	54.0	-7.2	69	146.9	145.0	20.6
-30	10.3	9.6	-34.4	20	56.6	55.3	-6.7	70	149.3	147.4	21.1
-29	10.9	10.2	-33.9	21	57.9	56.6	-6.1	71	151.8	149.9	21.7
-28	11.5	10.8	-33.3	22	59.3	57.9	-5.6	72	154.3	152.4	22.2
-27	12.2	11.4	-32.8	23	60.6	59.3	-5.0	73	156.8	154.9	22.8
-26	12.8	12.0	-32.2	24	62.0	60.6	-4.4	74	159.4	157.5	23.3
-25	13.4	12.7	-31.7	25	63.4	62.0	-3.9	75	162.0	160.1	23.9
-24	14.1	13.3	-31.1	26	64.8	63.4	-3.3	76	164.6	162.7	24.4
-23	14.8	14.0	-30.6	27	66.3	64.8	-2.8	77	167.3	165.3	25.0
-22	15.4	14.6	-30.0	28	67.8	66.3	-2.2	78	170.0	168.0	25.6
-21	16.1	15.3	-29.4	29	69.2	67.8	-1.7	79	172.7	170.7	26.1
-20	16.8	16.0	-28.9	30	70.7	69.2	-1.1	80	175.4	173.4	26.7
-19	17.5	16.7	-28.3	31	72.3	70.7	-0.6	81	178.2	176.2	27.2
-18	18.3	17.4	-27.8	32	73.8	72.3	0.0	82	181.0	179.0	27.8
-17	19.0	18.2	-27.2	33	75.4	73.8	0.6	83	183.8	181.8	28.3
-16	19.8	18.9	-26.7	34	77.0	75.4	1.1	84	186.7	184.7	28.9
-15	20.5	19.7	-26.1	35	78.6	77.0	1.7	85	189.5	187.5	29.4
-14	21.3	20.4	-25.6	36	80.2	78.6	2.2	86	192.5	190.4	30.0
-13	22.1	21.2	-25.0	37	81.8	80.2	2.8	87	195.4	193.4	30.6
-12	22.9	22.0	-24.4	38	83.5	81.8	3.3	88	198.4	196.4	31.1
-11	23.7	22.8	-23.9	39	85.2	83.5	3.9	89	201.4	199.4	31.7
-10	24.6	23.6	-23.3	40	86.9	85.2	4.4	90	204.5	202.4	32.2
-9	25.4	24.5	-22.8	41	88.6	86.9	5.0	91	207.6	205.5	32.8
-8	26.3	25.3	-22.2	42	90.4	88.6	5.6	92	210.7	208.6	33.3
-7	27.1	26.2	-21.7	43	92.2	90.4	6.1	93	213.8	211.7	33.9
-6	28.0	27.0	-21.1	44	94.0	92.2	6.7	94	217.0	214.9	34.4
-5	28.9	27.9	-20.6	45	95.8	94.0	7.2	95	220.2	218.1	35.0
-4	29.8	28.8	-20.0	46	97.6	95.8	7.8	96	223.4	221.4	35.6
-3	30.8	29.8	-19.4	47	99.5	97.6	8.3	97	226.7	224.6	36.1
-2	31.7	30.7	-18.9	48	101.4	99.5	8.9	98	230.0	227.9	36.7
-1	32.7	31.6	-18.3	49	103.3	101.4	9.4	99	233.4	231.3	37.2
0	33.7	32.6	-17.8	50	105.3	103.3	10.0	100	236.8	234.6	37.8

*Red Italics Indicate Inches of Mercury Below Atmospheric Pressure

Gambar 2.13 Tabel P-T Data Refrigeran R404A[25]

Pada **Gambar 2.12** dan **Gambar 2.13** merupakan dua aspek yang paling penting digunakan sebagai acuan perancangan sistem refrigerasi. Untuk **Gambar 2.12** yaitu diagram P-H (*Pressure-Enthalpy*) R-404A yang digunakan untuk desain sistem dan analisis teoretis untuk merancang sistem refrigerasi menggunakan refrigeran R-404A. Untuk **Gambar 2.13** yaitu tabel P-T (*Pressure-Temperature*)

R-404A yang digunakan sebagai acuan aktual sistem pada saat pengujian sistem refrigerasi menggunakan R-404A.



Gambar 2.14 P-T Chart Refrigeran R-404A

(Dokumen Penulis)

Pada **Gambar 2.14** merupakan *chart* yang dibuat berdasarkan tabel data P-T **Gambar 2.13** dengan parameter *pressure liquid* dan *vapor* (psig) serta temperature (°C). *Chart* tersebut dimulai di titik 0°C hingga 50°C refrigeran R-404A dengan nilai *pressure* linier terhadap temperatur, jadi semakin tinggi temperatur semakin tinggi juga *pressure* yang digunakan untuk kompresi refrigeran R-404A.

2.6 Power Supply 24 V DC

Catu daya atau sering disebut dengan *power supply* adalah perangkat elektronika yang berguna sebagai sumber daya untuk perangkat lain. Secara umum istilah catu daya berarti suatu sistem penyearah-filter yang mengubah AC menjadi DC murni. Rangkaian *power supply* 24V pada penelitian ini berperan sebagai sumber utama energi listrik untuk seluruh perangkat dalam sistem *mini cooled water chiller* berbasis PLC. *Power supply* ini menyediakan tegangan DC stabil sebesar 24 volt, untuk menghidupkan komponen PLC Schneider Modicon TM221CE24T, sensor suhu RTD PT100, pressure transmitter Wisner WPT-71G Series, serta aktuator untuk AHU. *Power supply* ini tergolong jenis *Switching Mode Power Supply* (SMPS), yang bekerja dengan efisiensi tinggi melalui proses

penyearahan arus AC, penyaringan (filtering), dan switching frekuensi tinggi, sehingga menghasilkan output tegangan DC yang stabil[26].

Penggunaan *power supply* jenis switching pada sistem 24V DC menjamin keamanan rangkaian, terutama saat terjadi lonjakan arus dari beban induktif pertama kali dinyalakan (*inrush current*) karena memiliki proteksi seperti *overvoltage protection* (OVP), *overcurrent protection* (OCP), *short circuit protection* (SCP), dan *over temperature protection* (OTP)[26]. Untuk penelitian ini digunakan catu daya input 220V dan output 24V 5A. Bentuk fisik catu daya dapat dilihat pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15 *Power Supply* 24V DC 5A[26]

Untuk memastikan bahwa *power supply* dapat mendukung seluruh beban secara stabil, dilakukan estimasi daya total dari seluruh komponen sistem. Berdasarkan perhitungan:

$$P_{total} = V \times I = 24V \times 5A = 120 \text{ Watt} \quad (2.15)$$

Daya 120 Watt ini menjadi daya maksimum yang dapat disuplai secara kontinu. Daya tersebut lebih dari cukup untuk PLC TM221CE24T, transmitter suhu dan tekanan, serta aktuator yang digunakan dalam AHU. Berikut data spesifikasi *power supply* 24 V DC pada **Tabel 2.5**.

Tabel 2.5 Spesifikasi *Power Supply* 24 V DC[26]

Spesifikasi	Nilai
Tegangan	24 V
Arus	5 A
Daya	120 Watt
Tegangan Input	AC 100-240V

2.7 PLC

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat kendali digital yang digunakan dalam sistem otomasi industri sebagai kendali sebuah sistem dan proses melalui instruksi logika yang diprogram. PLC dapat beroperasi secara *real time* dan dapat menerima input berupa sensor, memproses data sesuai logika pemrograman, serta menendalikan aktuator ataupun output lainnya berdasarkan kondisi tertentu. Selain itu di dalam PLC juga terdapat juga rangkaian logika, urutan eksekusi, perhitungan, selang waktu, dan fungsi aritmatika. PLC secara umum memiliki fungsi *Sequencing Control* dan *Monitoring Plant*. Dalam fungsi *Sequencing Control* PLC memproses sinyal input menjadi output yang digunakan untuk pemrosesan teknis secara berurutan (*sequential*) sesuai urutan program yang sedang dijalankan. Untuk fungsi *Monitoring Plant* PLC akan secara *real time* memonitor status sistem dan mengambil tindakan yang diperlukan sehubungan dengan proses yang dikendalikan[27].

PLC memiliki tiga komponen utama, yaitu unit input/output (I/O), unit pemroses pusat (CPU), dan memori. PLC bekerja dengan menerima data input, baik digital maupun analog yang telah dikonversi oleh ADC. Data ini kemudian diolah oleh CPU sesuai dengan program yang tersimpan di dalam memori, dan hasilnya dikirim sebagai sinyal digital ke modul output untuk menggerakkan perangkat keluaran. Terdapat beberapa metode pemrograman PLC yang disesuaikan dengan kebutuhan proses, di antaranya *Ladder Diagram*, *Function Block Diagram* (FBD), *Instruction List*, *Sequential Function Chart* (SFC) dan *Structured Text*. Maka dari itu, pemilihan tipe PLC harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem, dan dalam penelitian ini nantinya akan digunakan PLC Schneider Modicon M241[27].

2.7.1 PLC Schneider Modicon M241

PLC Modicon M241 dari Schneider Electric adalah jenis PLC berkinerja tinggi dalam jajaran EcoStruxure™ Machine, dirancang untuk aplikasi otomasi skala menengah hingga kompleks. M241 memiliki kemampuan multitasking, dilengkapi dengan prosesor cepat, port Ethernet, USB, dan CANopen. PLC ini mendukung pemrograman menggunakan EcoStruxure Machine Expert

(SoMachine) dan bahasa IEC 61131-3, termasuk Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST), dan Function Block Diagram (FBD)[28].



Gambar 2.16 PLC Schneider TM241CE24T[28]

PLC Schneider Modicon TM241CE24T pada **Gambar 2.16** adalah bagian dari seri Modicon M241 yang dirancang untuk aplikasi industri dengan kompleksitas menengah hingga tinggi. PLC ini memiliki pemrosesan logika cepat, komunikasi protokol industri (Modbus TCP, Ethernet/IP, CANopen), serta integrasi langsung dengan sistem SCADA/HMI melalui port Ethernet. Beberapa keunggulan TM241CE24T yaitu memiliki kapasitas memori yang cukup besar yaitu 8 MB program dan 64 MB sistem memori RAM, serta memiliki 4 *fast input* (HSC mode). Namun PLC TM241CE24T ini tidak dilengkapi dengan pin I/O analog sehingga harus menambah modul ekspansi I/O analog jika ingin menggunakan sensor maupun aktuator analog. Berikut spesifikasi PLC Modicon TM241CE24T dijabarkan pada **Tabel 2.6** sebagai berikut.

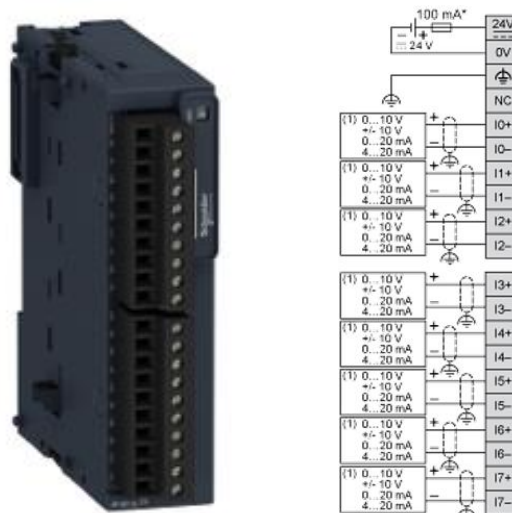
Tabel 2.6. PLC Schneider TM241CE24T *Spesification* [28]

Parameter	Spesifikasi
Suplai tegangan	24 V DC
Jumlah I/O	24
Jumlah input	14, 8 <i>fast input</i> (HSC mode) at 200 kHz
Jumlah output	10, 4 <i>fast input</i>
Frekuensi Output	20 kHz <i>fast output</i> (PWM mode)
	100 kHz <i>fast output</i> (PLS mode)
	1 kHz output

Parameter	Spesifikasi
Kapasitas memori	8 MB program 64 MB system memory RAM
Counting Input	4 fast input (HSC mode) 100 kHz 32 bits
Tipe koneksi	USB port mini B USB 2.0 Ethernet with connector RJ45 RS232/RS485

2.7.2 Schneider Modul Modicon TM3

Modul Schneider Modicon TM3AI8 adalah modul ekspansi analog yang berfungsi untuk membaca dan memproses sinyal dalam sistem kendali berbasis PLC. Fungsi utamanya adalah untuk membaca dan mengakuisisi data dari berbagai sensor yang menghasilkan sinyal analog standar, seperti sinyal arus (4-20 mA atau 0-20 mA) dan sinyal tegangan (0-10 V atau -10 V hingga +10 V). Modul ini dirancang agar kompatibel dan dapat diintegrasikan secara langsung dengan PLC seri Modicon M241 dengan 8 input analog. TM3AI8 memiliki resolusi 12-bit (atau 11-bit + *sign*[29].



Gambar 2.17 Modul Schneider Modicon TM3AI8 dan Wiring Diagram [29]

Pada **Gambar 2.17** merupakan modul TM3AI8 serta wiring diagram yang mana untuk modul ini harus ada *supply* eksternal 24 VDC dan untuk input

analognya terdapat 2 terminal (I+ dan I-) yang salah satu terminal digunakan untuk masukan sensor dan terminal lainnya akan digunakan untuk *common* terminal. Dalam sistem *mini water chiller* ini, modul TM3AI8 digunakan sebagai pembacaan sensor suhu RTD PT100 dan sensor tekanan Wisner dengan unit pemroses pusat (CPU) PLC. Sinyal arus 4-20 mA dari *transmitter* sensor akan dihubungkan ke terminal input modul TM3AI8, kemudian akan dikonversi menjadi nilai digital yang dapat dibaca dan diolah oleh program logika PLC untuk melakukan monitoring dan kontrol presisi terhadap sistem refrigerasi. Untuk spesifikasi Schneider Modicon TM3AI8 dapat dilihat pada **Tabel 2.7** berikut.

Tabel 2.7. Tabel Spesifikasi Modul Schneider Modicon TM3AI8 [29]

Parameter	Spesifikasi
Suplai tegangan	24 V DC
<i>Compatibility</i>	Modicon M241 Modicon M241 Modicon M251 Modicon M262
Analog input	8
Analog input tipe	current 4...20 mA current 0...20 mA voltage 0...10 V voltage - 10...10 V
Resolusi analog input	12 bits 11 bits + sign
<i>Overload (continuous)</i>	13 V voltage 40 mA current
Akurasi pengulangan	+/-0.5 %FS input

2.7.3 EcoStruxure Machine Expert

EcoStruxure Machine Expert merupakan sebelumnya dikenal sebagai SoMachine buatan Schneider Electric yang dirancang untuk membangun dan mengelola sistem otomasi berbasis PLC Modicon. Perangkat lunak ini mendukung

pemrograman dalam standar IEC 61131-3 seperti *Ladder Diagram* (LD), *Structured Text* (ST), dan *Function Block Diagram* (FBD), menjadikannya fleksibel untuk berbagai kebutuhan kontrol industri[30].

EcoStruxure Machine Expert mencakup konfigurasi modul input/output, pemetaan komunikasi menggunakan protokol seperti Modbus TCP/IP, serta integrasi ke perangkat antarmuka seperti HMI dan SCADA. Fitur tambahan seperti *watch window*, pemantauan online, dan alat debugging sangat membantu dalam mengamati perubahan data I/O secara *real-time*. Berikut merupakan tampilan awal *software EcoStruxure Machine Expert* seperti pada **Gambar 2.18** [30].



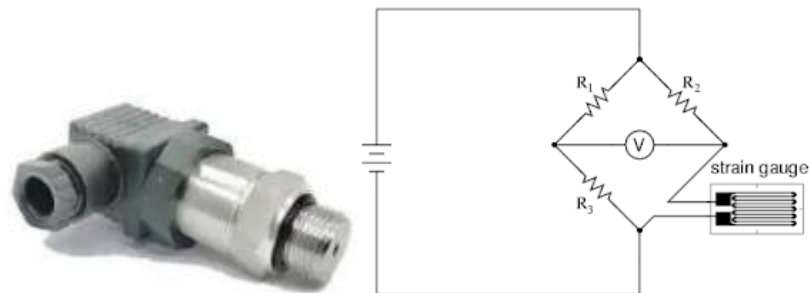
Gambar 2.18 EcoStruxure Machine Expert
(Dokumen Penulis)

Dibandingkan dengan *EcoStruxure Machine Expert – Basic* yang hanya bisa support PLC Modicon M221, *EcoStruxure Machine Expert* dapat digunakan pada PLC Modicon M241, M251, M262, dan Safety M262 yang didukung sistem kontrol kompleks dan terintegrasi industri, mendukung integrasi kompleks HMI/SCADA (Vijeo Designer, OPC) serta support komunikasi Modbus + Ethernet/IP, CANopen, EtherCAT, OPC UA, MQTT sehingga memungkinkan ekspansi ke SCADA dan IoT lebih lengkap[31].

2.8 Sensor Tekanan Wisner WPT-71G Series

Sensor tekanan berfungsi sebagai alat ukur yang mendeteksi tekanan fluida, baik berupa gas maupun cairan, dan mengonversinya menjadi sinyal listrik yang dapat diproses lebih lanjut oleh sistem. Salah satu jenis sensor tekanan yang umum

digunakan di bidang industri adalah sensor tipe *strain gauge* berbasis piezoresistif, seperti Wisner WPT-71G Series. Sensor tekanan seri Wisner WPT-71G Series dikategorikan sebagai pressure transducer yang menghasilkan sinyal analog standar, yaitu 4–20 mA atau 0–10 V, yang kompatibel dengan PLC dan mikrokontroler. Sensor ini biasanya dibuat dari bahan *stainless steel* (SS-316L) memastikan ketahanan terhadap berbagai media dan lingkungan yang keras, serta stabilitas jangka panjang [32].



Gambar 2.19 Wisner WPT-71G Series dan Sistem Kerjanya [33]

Wisner WPT-71G Series pada **Gambar 2.19** bekerja berdasarkan prinsip piezoresistif sendiri merupakan kemampuan material untuk mengalami perubahan resistansi listrik saat terkena tekanan mekanis. Di dalam sensor, terdapat elemen strain gauge yang tertanam pada membran logam tipis. Ketika tekanan fluida (gas atau cairan) mengenai membran tersebut, membran mengalami deformasi atau perubahan bentuk fisik. Deformasi ini menyebabkan perubahan resistansi pada strain gauge. Perubahan resistansi yang sangat kecil ini kemudian dideteksi melalui rangkaian jembatan *Wheatstone*, yang dirancang khusus untuk membaca perubahan resistansi mikro dengan sangat presisi. Ketidakseimbangan yang terjadi dalam jembatan ini menghasilkan tegangan keluaran yang sebanding dengan tekanan yang diterima sensor. Tegangan tersebut kemudian diperkuat oleh rangkaian internal dan dikonversi menjadi sinyal listrik analog[34]. Untuk melakukan konversi tersebut sensor harus dilakukan scalling antara arus 4-20mA ke 12 bit yaitu 0 - 4095 *discrete levels* nilai ADC pembacaan dari pin input analog PLC sehingga menjadi 0-20 bar dengan rumus:

$$Scaling = \frac{\text{nilai pembacaan}}{\text{selisih batas atas dan bawah}} \times \text{max konversi}$$

$$Scaling = \frac{\text{nilai pembacaan}}{4095} \times scale \quad (2.16)$$

Lalu untuk mencari nilai eror pembacaan sensor dapat digunakan rumus eror berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{(\text{nilai pembacaan} - \text{nilai referensi})}{\text{nilai referensi}} \times 100\% \quad (2.17)$$

Berikut Spesifikasi sensor tekanan Wisner WPT-71G Series pada **Table 2.8**.

Tabel 2.8. Spesifikasi Sensor Tekanan Wisner WPT-71G Series [33]

Parameter	Spesifikasi
Model	WPT-71G Series Piezoresistive Pressure Transmitter
Rentang pengukuran	0~800 bar, 0-20 bar used
Output Signal	4-20 mA (used), 0-10V, 0-5V, 1-5V according to type
Material Housing	Stainless Steel
Material Sensor Cell	SS-316L
Koneksi proses	G 1/4 BSPP Male
Koneksi elektrik	DIN 43650A
Proteksi	IP65 atau IP68
Akurasi	±0.5% of full scale
Proses Temperatur	85°C
Aplikasi	gas / liquid
Catu daya	DC 12-36 V

2.9 Sensor Suhu RTD PT100

Sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*) tipe PT100 merupakan salah satu sensor suhu paling presisi dan stabil yang digunakan dalam sistem otomasi industri, termasuk pada sistem refrigerasi kompresi uap seperti *air cooled water chiller*. PT100 mengacu pada karakteristik resistansi 100 ohm pada suhu 0°C, berbahan dasar platinum karena kestabilan termalnya yang tinggi dan hubungan linier antara resistansi terhadap suhu.



Gambar 2.20 Sensor RTD PT100 dan Sistem Kerjanya [35]

Sensor RTD PT100 seperti pada **Gambar 2.20** bekerja berdasarkan prinsip efek termoresistif, di mana peningkatan suhu menyebabkan kenaikan resistansi logam. Karakteristik linier dan kestabilannya menjadikan RTD PT100 cocok untuk aplikasi pengukuran suhu yang membutuhkan akurasi tinggi, terutama pada suhu rendah seperti target pendinginan dalam sistem chiller[35].

Dalam konteks integrasi ke sistem PLC (Programmable Logic Controller), sinyal resistansi dari RTD tidak dapat dibaca secara langsung oleh PLC. Oleh karena itu, digunakan transmitter RTD untuk mengubah sinyal resistansi menjadi sinyal arus standar industri (biasanya 4–20 mA), yang kemudian dapat diterima oleh input analog PLC. Agar PLC dapat membaca nilai dari sensor harus dilakukan scaling antara arus 4-20mA ke 12 bit yaitu 0 - 4095 *discrete levels* nilai ADC pembacaan dari pin input analog PLC sehingga menjadi 0-100°C dengan rumus:

$$Scaling = \frac{\text{nilai pembacaan}}{\text{selisih batas atas dan bawah}} \times \text{max konversi}$$

$$Scaling = \frac{\text{nilai pembacaan}}{4095} \times 100 \quad (2.18)$$

Selain itu untuk mencari nilai eror pembacaan sensor dapat digunakan rumus eror berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{(\text{nilai pembacaan} - \text{nilai referensi})}{\text{nilai referensi}} \times 100\% \quad (2.19)$$

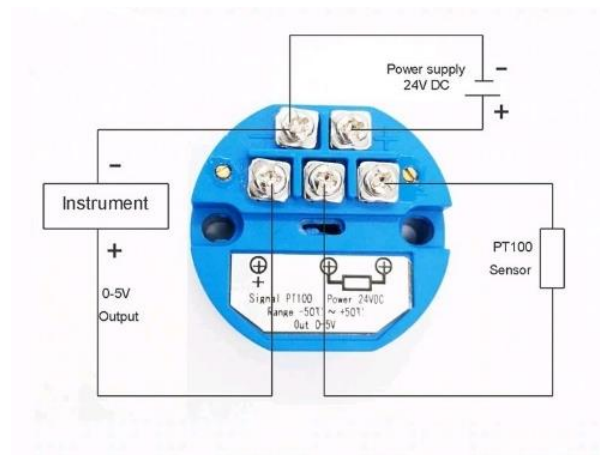
Sedangkan untuk spesifikasi RTD PT100 ini sendiri disajikan pada **Tabel 2.9** di bawah ini.

Tabel 2.9 Tabel Spesifikasi RTD PT100[36]

Parameter	Spesifikasi
Nomor Model	WZPT-03
Konfigurasi Kabel	3-wire
Rentang Temperatur	-50°C to 400°C
Material Elemen Sensing	Platinum (Pt), stabil secara termal
Akurasi	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
Isolasi	Tersedia dalam casing tahan korosi atau stainless (IP65/IP67)
Diameter kabel	0.3, 0.45mm (twisted pair)
Sertifikasi Umum	ISO9001

2.9.1 Transmitter RTD PT100

Transmitter RTD (*Resistance Temperature Detector*) adalah perangkat konversi sinyal yang mengubah resistansi variabel dari sensor PT100 menjadi sinyal arus analog 4–20 mA atau tegangan 0–5V. Konversi ini bertujuan untuk memastikan transmisi sinyal suhu yang akurat dan bebas gangguan ke sistem kendali, bahkan dalam instalasi dengan jarak kabel panjang[37].

**Gambar 2.21** Transmitter RTD[37]

Dalam sistem refrigerasi otomatis, transmitter RTD seperti pada **Gambar 2.21** memungkinkan kalibrasi suhu presisi pada suhu rendah serta penyimpanan data suhu *real-time* oleh PLC untuk monitoring dan pengambilan keputusan otomatis deengan spesifikasi pada **Tabel 2.10** berikut:

Tabel 2.10 Tabel Spesifikasi Transmitter RTD[37]

Parameter	Spesifikasi
Tipe Input	RTD PT100 (3 wire)
Output	4–20 mA
Tegangan Operasi	24 VDC
Rentang Temperature	0°C ~100°C (Tergantung model)
Akurasi Konversi	0.2% FS
Isolasi Galvanik	Tersedia pada transmitter industri untuk menghindari gangguan sinyal
Casing	IP65/IP67 tahan air dan debu (tergantung merek)
Aplikasi	Mengkonversi sinyal resistansi dari PT100 menjadi sinyal standar industri untuk PLC
Ukuran	44(D) x 18(H) mm

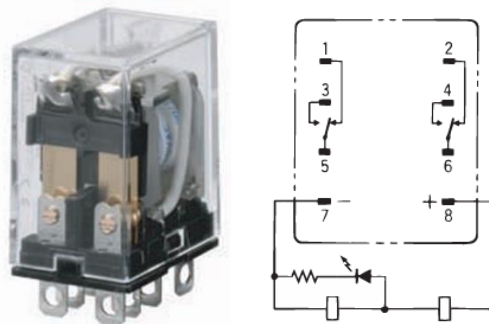
2.10 Relay

Relay merupakan salah satu komponen elektrik yang bekerja dengan kontak mekanik. Pada prinsipnya, relay bekerja ketika coil mendapat sumber arus berupa arus *alternating current* (AC) maupun *direct current* (DC) tergantung dari jenis coil yang digunakan. Ketika coil pada relay telah bekerja, maka akan menggerakkan kontak logam untuk bekerja. Sehingga relay mampu bekerja dengan arus kecil namun dapat menghantarkan arus yang lebih besar melalui kontaknya. Relay mampu mengisolasi rangkaian logika tegangan rendah dengan perangkat kerja tegangan tinggi, sehingga meningkatkan keamanan dan kestabilan sistem secara keseluruhan [38].

2.10.1 Relay Omron LY2N

Relay Omron LY2N merupakan salah satu tipe relay elektromagnetik dengan kontak DPDT (Double Pole Double Throw) yang digunakan dalam sistem otomasi industri. Relay ini bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetisme, di mana arus listrik yang dialirkan melalui kumparan (koil) akan menghasilkan medan magnet.

Medan magnet ini kemudian menarik sebuah angker (armatur) logam, yang pergerakannya akan mengalihkan posisi kontak saklar dari kondisi normalnya (misalnya dari *Normally Closed* ke *Normally Open*).



Gambar 2.22 Relay LY2N & Pin Konfigurasi[39]

Relay LY2N seperti pada **Gambar 2.22** memiliki tegangan kerja pada koil LY2N umumnya 12VDC, 24VDC atau 220V AC, dan kontakannya mampu menangani beban hingga 10 A pada 240 VAC dan 10 A pada 28 VDC. Relay LY2N Dalam sistem refrigerasi ini, relay tersebut digunakan agar output PLC yang berarus rendah dapat mengendalikan kompresor dan fan kondensor 220 VAC yang berarus tinggi, berdasarkan sinyal suhu evaporator. Fungsi utamanya adalah sebagai saklar beban sekaligus isolator yang melindungi sirkuit PLC dari gangguan tegangan tinggi di sisi aktuatur[39]. Untuk spesifikasi Relay Omron LY2N dapat dilihat pada **Tabel 2.11**.

Tabel 2.11 Tabel Spesifikasi Relay Omron LY2N[39]

Parameter	Spesifikasi
Jumlah Pin	8 pin (2 coil terminals dan 6 kontak terminal untuk NO/NC kontak)
Jumlah Kontak	2 SPDT (Single Pole Double Throw) total 2 NO dan 2 NC
Tegangan Koil	12VDC, 24VDC, 24VAC, 110VAC, 220VAC (tergantung model)
Kapasitas Arus Kontak	10 A , 240 VAC / 28 VDC
Soket Relay	PTF08A kompatibel dengan LY2N