

BAB II

DASAR TEORI

Pada bab ini akan menjelaskan tentang tinjauan pustaka hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan beserta dasar teori yang digunakan untuk membuat dan merancang tugas akhir merancang sistem distribusi *water* refrigeran dan *air handling unit* untuk kontrol suhu ruangan menggunakan (PLC) pada mesin *mini aircooled water chiller*. Teori yang digunakan dalam pembuatan tugas akhir ini mencakup konsep pendinginan pada mesin *chiller* meliputi sistem distribusi *water cooled* dan sistem *air handling unit*, sistem kontrol pengendalian otomatisasi menggunakan plc dengan aktuator pompa dan *fan* berdasarkan umpan balik sensor untuk mengontrol suhu ruangan. Setiap teori yang dibahas dalam bab ini saling mendukung dan berperan penting dalam memastikan hasil akhir dari penelitian yang akan dibuat.

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis mengacu pada beberapa penelitian terdahulu yang relevan dan mendukung pengembangan *aircooled chiller* sebagai media pendinginan seperti pada **Tabel 2.1** berikut :

Tabel 2.1. Tinjauan pustaka

No	Penulis	Judul	Keterangan
1.	Alfan Ekajati Latief, M. et all.	Rancang Bangun Reservoir Pendingin Menggunakan <i>Chiller</i> dan Pengujian Pada Hasil Pemotongan <i>Plastic Composite</i> Kapasitas 5 kg/jam	Penelitian ini mengembangkan mesin pendinginan menggunakan <i>chiller</i> untuk pemotongan <i>plastic composite</i> menjadi bentuk pelet. Peneliian ini berfokus pada bagaimana cara mendinginkan air dalam <i>reservoir</i> pendingin, dengan memanfaatkan prinsip kerja mesin <i>chiller</i> . Yang mana air didinginkan melalui <i>coil evaporator</i> kemudian di distribusikan ke dalam <i>reservoir</i> . Lalu dalam reservoir terjadi proses pertukaran kalor dari material <i>plastic composite</i> yang bersuhu tinggi dengan air yang bersuhu rendah hingga plastic composit kaku akibat pendingian yang cepat dengan begitu

			akan mempermudah dalam melakukan pemotongan sesuai bentuk yang diinginkan[6]. Jurnal ini menjadi acuan untuk membuat sistem pendinginan dan proses distribusi air pendingin menggunakan coil evaporator pada mesin <i>chiller</i> tetapi berbeda dalam penggunaan proses pertukaran kalor yang terjadi dalam penelitian yang akan penulis buat.
2.	I Putu Oka Sutrisna, I G N Adia Atmika	Perancangan Air <i>Handling Unit</i> (AHU) Sebagai Energi Alternatif Dalam Penghematan Energi Listrik Pada Pendingin Ruangan (AC)	Penelitian ini berfokus pada perancangan sistem AHU (<i>air handling unit</i>) yang untuk efisiensi energi dengan meningkatkan pendinginan pada mesin <i>water chiller</i> . [7] Sistem ini memiliki persamaan dengan penelitian penulis yaitu merancang sistem AHU dengan pengaturan temperature air <i>chiller</i> untuk didistribusikan.
3	Suryadimal. Et all.	Analisis Performa Sistem Pendingin Mesin Mini Water Chiller	Penelitian ini membahas perhitungan beban termal yang harus ditangani oleh AHU dan bagaimana debit air (<i>water flow</i>) mempengaruhi suhu ruangan. [8] Penelitian ini menjadi landasan perencanaan laju aliran (<i>flow rate</i>) pada <i>Air handling unit</i> .

2.2 Mesin Pendingin

Mesin pendingin merupakan perangkat yang digunakan untuk menurunkan suhu dan kelembaban hingga mencapai tingkat yang diinginkan [9]. Proses kerja mesin pendingin atau sirkulasi refrigeran dimulai dari kompresor, yang berfungsi menghisap dan menekan refrigeran dalam bentuk gas bertekanan tinggi menuju kondensor. Di kondensor, refrigeran mengalami proses kondensasi, yaitu perubahan dari gas menjadi cair. Sebelum mencapai kondensor, refrigerant melewati *strainer* yang berfungsi sebagai penyaring kotoran agar tidak masuk ke pipa kapiler. Selanjutnya, refrigeran mengalir ke pipa kapiler atau katup ekspansi, di mana terjadi penurunan suhu dan tekanan. Kemudian, refrigeran masuk ke evaporator dan mengalami proses penguapan dari cair menjadi gas, dibantu oleh

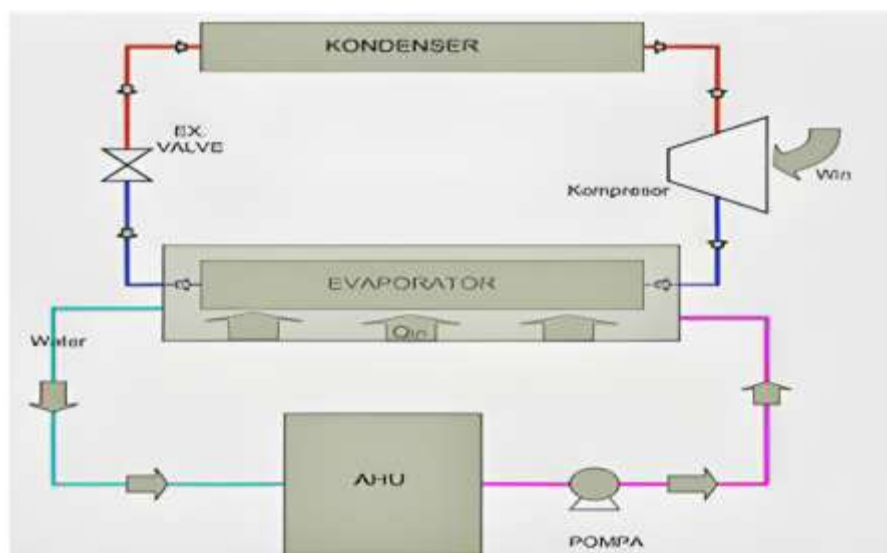
blower yang meniupkan udara dingin dari evaporator ke dalam ruangan. Setelah itu, refrigeran kembali menuju kompresor. Sebelum masuk ke kompresor, cairan refrigeran dipisahkan oleh *accumulator* karena kompresor hanya dapat menghisap refrigeran dalam bentuk gas [10].

Pada penelitian saya kali ini membuat mesin pendingin *chiller* dengan memanfaatkan air yang didinginkan menggunakan refrigeran dalam tabung *heat exchanger* untuk kemudian didistribusikan ke ruangan.

2.3 Mesin *Chiller*

Chiller adalah alat pendingin yang umumnya digunakan untuk menghasilkan air dingin (*chilled water*). Air dingin yang dihasilkan oleh *chiller* ini bisa dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, salah satunya untuk mengatur suhu udara. Dalam sistem pengkondisian udara berskala besar, *chilled water* berperan sebagai refrigeran sekunder (fluida kerja) yang membantu mengurangi penggunaan refrigeran utama yang harganya relatif tinggi [11].

Prinsip kerja *chiller* pada dasarnya melibatkan proses perpindahan panas, di mana panas berpindah dari material bersuhu tinggi ke material bersuhu lebih rendah. Proses penyerapan panas ini dimulai di bagian evaporator yang terletak di dalam *Heat Exchanger*. *Heat Exchanger* sendiri merupakan sebuah alat berbentuk pipa yang di dalamnya terdapat pipa lain. Pipa bagian luar berfungsi untuk mengalirkan air, sementara pipa bagian dalam digunakan untuk mengalirkan udara atau refrigeran[12]. Seperti pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2. 1. Proses Kerja Chiller[12].

Pada *Heat Exchanger* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1**, terjadi proses perpindahan panas antara refrigeran dan air. Panas dari air diserap oleh refrigeran, sehingga setelah melewati *Heat Exchanger*, suhu air menjadi lebih rendah. Air yang telah didinginkan ini kemudian dialirkan menuju *Air Handling Unit* (AHU), yang berfungsi untuk mendinginkan udara. AHU dilengkapi dengan *heat exchanger* berupa pipa yang dilengkapi kisi-kisi, yang berperan utama dalam mendinginkan air dan udara melalui proses pertukaran panas antar keduanya, sehingga menghasilkan suhu udara yang lebih stabil [12].

2.4 Siklus Refrigerasi

Refrigeran merupakan senyawa yang digunakan dalam sistem pendingin untuk menyerap panas dari udara di dalam ruangan dan mentransfernya ke lingkungan luar melalui proses siklus kompresi dan ekspansi [13]. Dalam proses pendinginan, refrigeran berperan sebagai fluida kerja yang mengalami perubahan fase, yakni dari cair menjadi uap, lalu kembali lagi menjadi cair. Proses ini berlangsung dalam sistem sirkulasi tertutup. Namun, pada sistem pendingin yang menggunakan udara sebagai refrigeran, fase refrigeran tetap berada dalam bentuk gas sepanjang siklusnya [14]. Berikut adalah beberapa siklus Refrigasi.

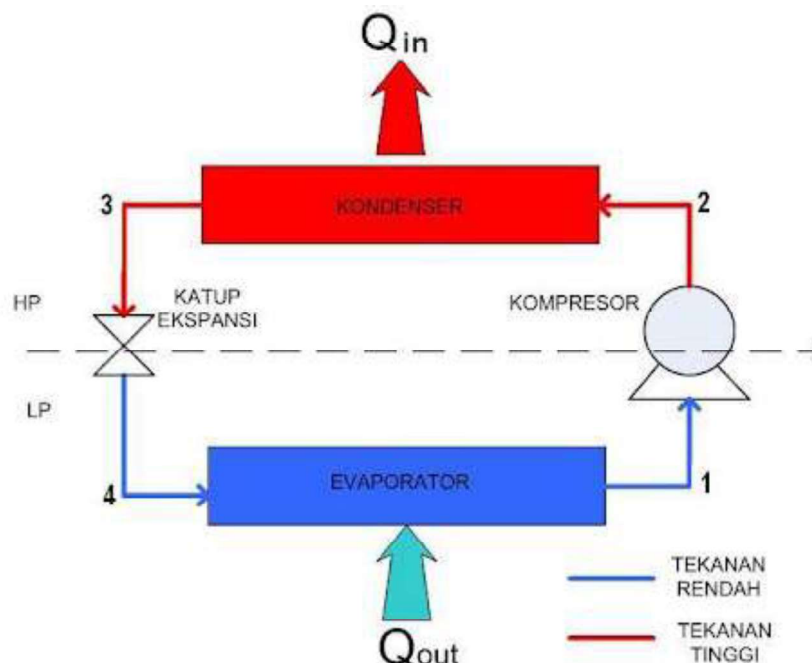
- a. Siklus Refrigasi kompresi uap (*Vapor Compression Refrigeration Cycle*).

- b. Siklus refrigerasi pancaran uap (*Steam Jet Refrigeration Cycle*).
- c. Siklus refrigerasi udara (*Air Refrigeration Cycle*).
- d. Siklus refrigerasi penyerapan (*Absorbtion Refrigeration Cycle*) [14].

2.4.1 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

Dalam siklus refrigerasi kompresi uap, refrigeran dalam bentuk uap jenuh dikompresi oleh kompresor sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat, menghasilkan uap kering. Selanjutnya, uap tersebut dikondensasikan di dalam kondensor hingga berubah menjadi cair. Setelah itu, tekanan dan suhu refrigeran diturunkan melalui katup ekspansi agar suhunya menjadi lebih rendah dari suhu lingkungan. Saat melewati evaporator, refrigeran cair ini menguap sambil menyerap panas dari benda atau area di sekitar evaporator [14]. Sistem aliran refrigeran tersebut dapat kita lihat pada **Gambar 2.2**. Dalam menjalankan fungsinya refrigeran mengalami proses sebagai berikut :

- a. Kompresi (pemampatan) di kompresor.
- b. Kondensasi (pengembunan) di kondensor.
- c. Ekspansi (penurunan tekanan) di katup ekspansi.
- d. Evaporasi (penguapan) di evaporator.



Gambar 2.2. Sistem Kompresi Uap [14].

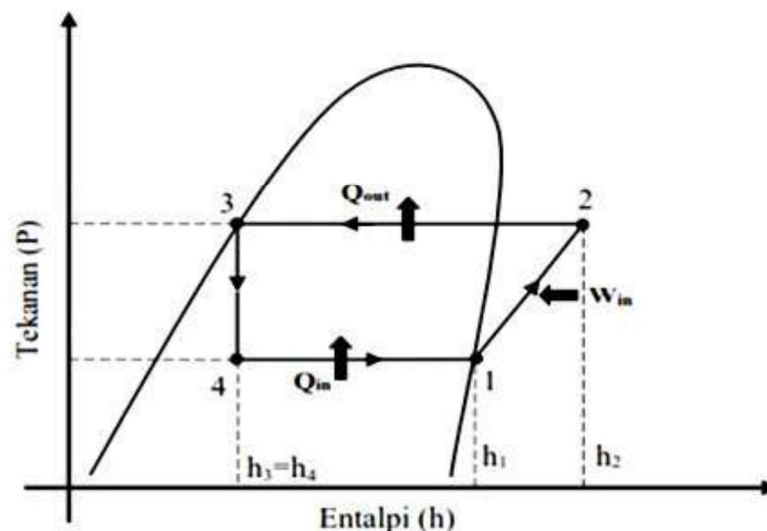
Menurut proses kerja sistem, siklus kompresi uap di bedakan atas dua bagian yaitu:

1. Siklus refrigerasi kompresi uap ideal (teoritis).

Siklus refrigrasi kompresi uap ideal merupakan siklus teoritis, dimana pada siklus tersebut mengasumsikan beberapa proses seperti **Gambar 2.3** berikut :

- a. 1 – 2 Merupakan proses kompresi kering *adiabatik* dan *reversible*, dimana refrigeran dalam kondisi uap *superheated* dikompresi di dalam kompresor dari tekanan rendah (tekanan evaporator) ke tekanan yang lebih tinggi (tekanan kondensor). Pada awalnya, refrigeran yang berbentuk uap jenuh dengan suhu dan tekanan rendah dihisap oleh kompresor dari evaporator. Selanjutnya, kompresor meningkatkan tekanannya hingga mencapai tekanan kondensasi. Proses kompresi ini bertujuan untuk menaikkan suhu refrigeran, agar suhu di dalam kondensor lebih tinggi dibandingkan suhu lingkungan, sehingga memungkinkan terjadinya perpindahan panas dari refrigeran ke lingkungan. Oleh karena itu, tahapan 1-2 dalam siklus ini merupakan proses kompresi isentropik yang berlangsung sepanjang garis entropi konstan, dimulai dari kondisi uap jenuh hingga mencapai tekanan kondensasi [15]
- b. 2 – 3 Merupakan peroses pelepasan kalor reversible pada tekanan konstan. Setelah melalui proses kompresi, refrigeran berada dalam kondisi uap *superheated* dengan tekanan dan suhu tinggi. Agar dapat berubah menjadi cair, refrigeran harus melepaskan panas ke lingkungan. Proses pelepasan panas ini berlangsung di dalam alat penukar panas yang disebut kondensor. Di kondensor, refrigeran mengalir dan bertemu dengan fluida pendingin (seperti udara atau air) yang memiliki suhu lebih rendah dari refrigeran. Akibatnya, panas berpindah dari refrigeran ke fluida pendingin, menyebabkan suhu refrigeran turun dari uap *superheated* menjadi uap jenuh. Setelah itu, refrigeran mengembun menjadi cair dan keluar dari kondensor dalam bentuk cair jenuh. Proses kondensasi ini merupakan pelepasan panas secara *isobarik reversibel*, yakni berlangsung pada tekanan tetap. Dengan demikian, tahapan proses 2-3 menggambarkan penurunan suhu uap *superheated* dan perubahan fase menjadi cair pada tekanan konstan, yang ditampilkan sebagai garis horizontal pada diagram tekanan-entalpi [15].

- c. 3 – 4 Merupakan proses ekspansi *unreversible* pada *entalpi* konstan. Refrigeran dalam bentuk cair jenuh kemudian mengalir ke alat ekspansi. Di dalam katup ekspansi, refrigeran mengalami proses penurunan tekanan secara tidak *reversibel* dengan kondisi *entalpi* tetap. Setelah melewati katup ekspansi, refrigeran keluar dalam bentuk campuran antara uap dan cair pada tekanan serta suhu yang sesuai dengan tekanan evaporator. Proses 3-4 ini berlangsung dengan *entalpi* konstan, yang pada diagram digambarkan sebagai garis tegak lurus [15].
- d. 4 – 1 Merupakan proses penambahan kalor *reversible* pada tekanan konstan yang menyebabkan terjadinya penguapan menuju uap jenuh. Refrigeran dalam bentuk campuran uap dan cair mengalir melalui penukar panas yang disebut evaporator. Pada tekanan kerja evaporator, titik didih refrigeran harus lebih rendah dari suhu media yang akan didinginkan agar terjadi perpindahan panas dari media tersebut ke refrigeran. Selama proses ini, refrigeran yang masih dalam bentuk cair akan menguap di dalam evaporator, dan setelah itu meninggalkan evaporator sebagai uap jenuh. Proses penguapan ini merupakan pemasukan panas yang berlangsung secara *isobarik* dan *reversibel*, di mana refrigeran berubah fase menjadi uap jenuh. Tahapan 4-1 ini digambarkan sebagai garis mendatar pada diagram karena dianggap terjadi pada tekanan konstan selama refrigeran mengalir melalui evaporator [15].



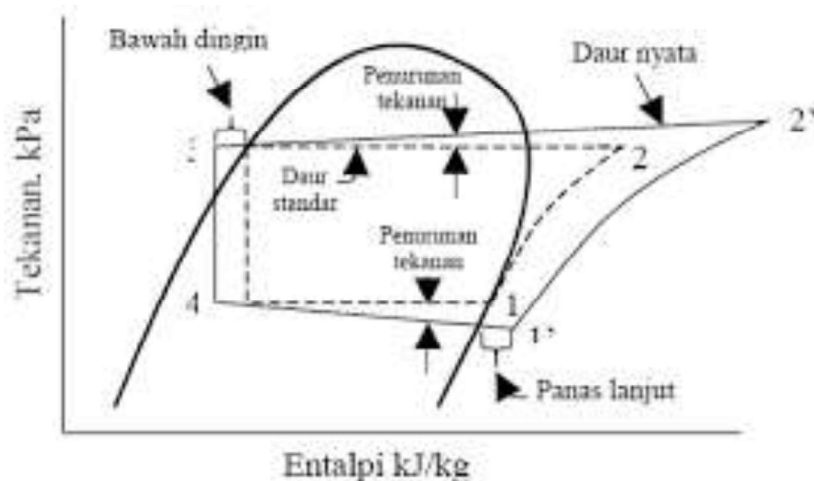
Gambar 2. 3. Diagram P-h Daur Kompresi Uap [15].

2. Siklus refrigerasi kompresi uap aktual (sebenarnya).

Siklus refrigerasi kompresi uap yang terjadi secara nyata berbeda dengan siklus ideal (teoritis). Perbedaan ini disebabkan oleh berbagai asumsi yang diterapkan pada siklus standar. Dalam siklus nyata, sering terjadi pemanasan lanjutan pada uap refrigeran setelah keluar dari evaporator dan sebelum mencapai kompresor. Pemanasan ini dapat terjadi karena jenis alat ekspansi yang digunakan atau karena penyerapan panas di jalur hisap (*suction line*) yang menghubungkan evaporator dengan kompresor.

Hal serupa juga terjadi pada refrigeran dalam fase cair yang mengalami pendinginan lebih lanjut sebelum memasuki katup ekspansi atau pipa kapiler. Kondisi ini merupakan hal yang umum dan berfungsi untuk memastikan bahwa seluruh refrigeran yang masuk ke kompresor berada dalam bentuk uap sepenuhnya (100%).

Perbedaan utama antara siklus nyata dan siklus ideal terletak pada adanya penurunan tekanan di dalam kondensor dan evaporator. Dalam siklus nyata, penurunan tekanan ini terjadi akibat gesekan antara refrigeran dan dinding pipa. Dampaknya, proses kompresi dari titik 1 ke titik 2 membutuhkan energi atau kerja yang lebih besar dibandingkan dengan siklus ideal seperti pada **Gambar 2.4** berikut:



Gambar 2.4. Daur Kompresi Uap Nyata Dibanding Uap Standar [16].

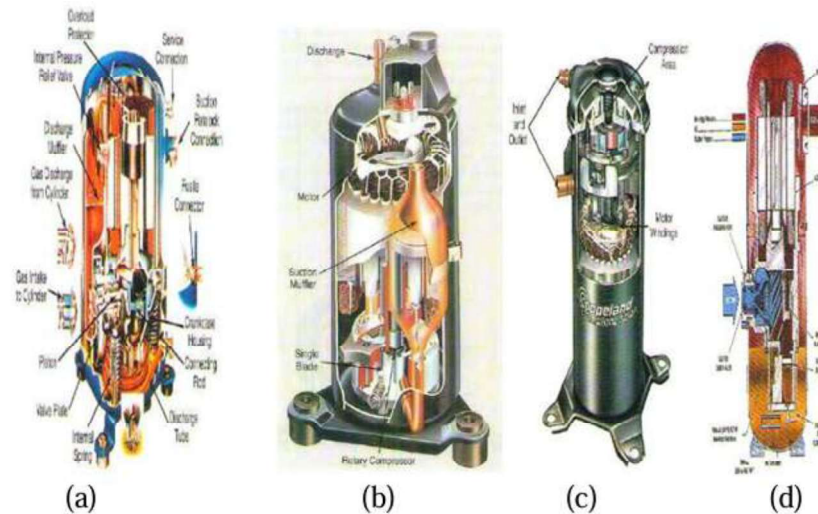
Garis 4 – 1' menggambarkan terjadinya penurunan tekanan pada refrigeran saat mengalir melalui saluran hisap (*suction line*) dari evaporator menuju kompresor. Sementara itu, garis 1 – 1' menunjukkan proses pemanasan lanjutan pada uap refrigeran, yang ditandai dengan garis yang melampaui batas uap jenuh. Proses 1' – 2' merupakan tahapan kompresi uap refrigeran di dalam kompresor. Dalam siklus ideal, proses ini diasumsikan berlangsung secara isentropik, artinya tidak terjadi pertukaran kalor antara refrigeran dan dinding silinder kompresor. Namun, pada kenyataannya, proses tersebut bersifat politropik, bukan isentropik. Garis 2' – 3' menunjukkan penurunan tekanan yang terjadi di dalam pipa-pipa kondensor, sedangkan garis 3 – 3' menunjukkan penurunan tekanan di bagian jalur cair (*liquid line*).

2.5 Komponen Utama Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

Pada sistem refrigrasi ada beberapa komponen utama yang menunjang sistem untuk berjalan dengan sempurna seperti kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator. Berikut akan dijabarkan fungsi dan kegunaan dari masing – masing komponen siklus refrigrasi kompresi uap.

2.5.1 Kompresor

Dalam sistem refrigerasi, kompresor merupakan salah satu komponen utama yang berperan penting dalam menjaga sirkulasi refrigeran dan memastikan proses perpindahan panas berlangsung efektif [17]. Kompresor berfungsi untuk menghisap uap refrigeran dari evaporator yang berada pada tekanan rendah, kemudian menekannya menjadi uap bertekanan tinggi. Proses ini menghasilkan perbedaan tekanan antara sisi masuk (*suction*) dan sisi keluar (*discharge*), yang memungkinkan refrigeran terus mengalir ke seluruh sistem. Dengan adanya tekanan tinggi tersebut, refrigeran dapat menuju kondensor untuk melepaskan panas. Berdasarkan konstruksi dan mekanismenya, kompresor pada sistem refrigerasi dapat dibagi menjadi 5 macam, yaitu kompresor torak (*reciprocating*), kompresor putar (*rotary*), kompresor sekrup (*screw*), kompresor gulung (*scroll*), dan kompresor sentrifugal (*centrifugal*) [18] seperti pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5. Beberapa Jenis Kompresor Hermetik, (A) Reciprocating, (B) Rotary, (C) Scroll, (D) Screw [19].

Pada penelitian ini menggunakan kompresor hermetik jenis torak yang mana Kompresor ini termasuk dalam jenis *positive displacement compressor* yang bekerja dengan cara memampatkan serta mengalirkan udara atau gas secara berselang-seling dari dalam silinder. Proses pemampatan berlangsung di dalam ruang silinder, di mana komponen mekanis yang digunakan untuk menekan udara atau gas disebut piston atau torak. Tekanan yang dihasilkan pada keluaran udara atau gas dikenal sebagai tekanan *discharge*, yaitu tekanan hasil kerja dari kompresor tipe *reciprocating* ini[20].

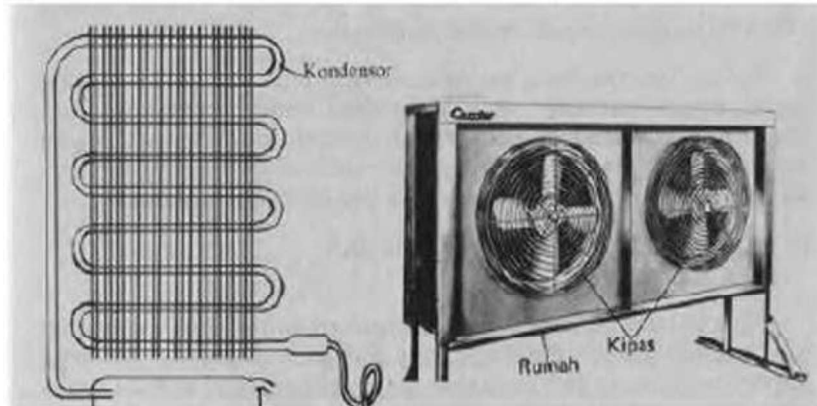
2.5.2 Kondensor

Kondensor berfungsi untuk membuang kalor dan mengubah wujud bahan pendingin dari gas menjadi cair. Selain itu kondensor juga digunakan untuk membuat kondensasi bahan pendingin gas dari kompresor dengan suhu tinggi dan tekanan tinggi[17]. Kondensor ada tiga macam menurut pendinginannya yaitu :

1. Kondensor dengan pendinginan udara (*aircooled*).
2. Kondensor dengan pendinginan air (*watercooled*).
3. Kondensor dengan pendinginan campuran udara dan air (*evaporative*).

Kondensasi pada mesin pendingin merupakan proses pengubahan referigeran berfasa *superheated* menjadi berfasa cairan-jenuh pada tekanan konstan. Kondensor berpendingin udara dapat berupa pipa bersirip-sirip, pipa tersebut didinginkan oleh udara luar yang dihembus *fan* supaya terjadi kondensasi pada

referigeran[18]. Berikut pada **Gambar 2.6** adalah contoh kondensor tipe pipa bersirip, rumah kondensor serta kipas untuk menghembuskan udara panas ke luar kondensor.



Gambar 2.6. Kondensor [18].

2.5.3 Evaporator

Pada **Gambar 2.7** adalah evaporator spiral evaporator berfungsi sebagai komponen tempat terjadinya pertukaran panas dengan lingkungan sekitar. Proses penyerapan panas berlangsung ketika refrigeran yang mengalir di dalam evaporator memiliki suhu lebih rendah dibandingkan suhu sekitarnya, sehingga panas dari lingkungan akan mengalir menuju refrigeran. Kalor yang diserap tersebut menyebabkan kenaikan *entalpi* refrigeran, sehingga refrigeran mengalami perubahan fase dari campuran uap-cair menjadi uap jenuh. Evaporator juga dikenal dengan istilah koil pendingin dan umumnya terdiri dari pipa-pipa bersirip yang membentuk kumparan untuk memperluas permukaan pertukaran panas[18].

Evaporator memiliki fungsi yang berlawanan dengan kondensor, yaitu bukan melepaskan panas ke udara sekitar, melainkan menyerap panas dari udara di sekitarnya. Dalam merancang evaporator, perlu diperhatikan agar proses penguapan refrigeran berlangsung secara efektif, dengan penurunan tekanan seminimal mungkin serta kemampuan menyerap panas dari media yang didinginkan secara efisien. Desain evaporator sangat dipengaruhi oleh lokasi pemasangannya dan jenis media yang akan didinginkan, baik itu berbentuk gas, cair, maupun padat. Dalam berbagai kondisi beban, refrigeran akan menguap saat mengalir melalui pipa atau permukaan evaporator. Oleh karena itu, penting untuk

memastikan bahwa cairan refrigeran tetap membasahi seluruh permukaan evaporator guna menjaga efisiensi proses perpindahan panas[17].



Gambar 2.7. Evaporator Bentuk Spiral [16].

2.5.4 Katup Ekspansi

Setelah refrigeran mengalami kondensasi di kondensor, cairan refrigeran tersebut dialirkan menuju katup ekspansi. Katup ini berfungsi untuk mengatur jumlah refrigeran yang masuk ke evaporator, sehingga sesuai dengan laju aliran dan proses penguapan refrigeran di dalamnya. Selain itu, katup ekspansi juga memiliki peran penting dalam menurunkan tekanan refrigeran sebelum memasuki evaporator. Adapun jenis – jenis katup ekspansi:

1. Pipa kapiler (*capillary tube*).
2. Katup ekspansi otomatis (*automatic expansion valve*).
3. Katup ekspansi termostatik (*hand expansion valve*).
4. Katup ekspansi manual (*hand expansion valve*).
5. Katup apung sisi tekanan rendah (*low side float valve*).
6. Katup apung sisi tekanan tinggi (*high side float valve*).
7. Katup ekspansi termoelektrik (*thermal elektrik expansion valve*).

Untuk penelitian kali ini menggunakan katup ekspansi tipe pipa kapiler karena pipa kapiler adalah suatu alat seperti pipa tembaga dengan suatu diameter kecil dibanding pipa pipa tembaga yang lain seperti pada **Gambar 2.8**. Pipa kapiler ini memiliki diameter yang bervariasi tergantung dari jumlah kapasitas pendinginan dan jumlah daya kompresornya, pipa kapiler sendiri biasanya ditempatkan dengan cara digulung melingkar demi menghemat suatu tempat dengan menggunakan mal

kapasitor bekas agar tidak pipih. Dan dapat di simpulkan bahwa alat ini tidak bisa dipakai untuk sistem pendinginan yang menggunakan kapasitas pendinginan yang besar, dikarenakan dalam pemilihan suatu pipa kapiler ada batasan jumlah maksimal daya kompresor yang bisa diaplikasikan ke sistem dengan alat ini[20].

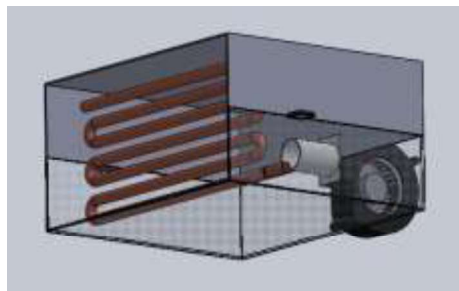


Gambar 2.8. Pipa Kapiler[18].

2.6 Sistem AHU (*Air Handling Unit*)

Sistem tata udara sentral seperti *Air Handling Unit* (AHU) dan *Fan Coil Unit* (FCU) merupakan perangkat pengolah udara yang dilengkapi dengan kipas serta komponen pendingin. Peralatan ini berfungsi untuk melakukan sirkulasi, penyaringan, pemanasan, pengurangan kelembapan (dehumidifikasi), penambahan kelembapan (humidifikasi), serta pencampuran udara guna menciptakan kondisi udara yang sesuai. Pada siklus primer refrigeran bersirkulasi dengan kompresor, empat komponen utama kondensor, katup ekspansi dan evaporator, pada siklus refrigeran sekunder oleh pompa air menuju AHU dan FCU[8].

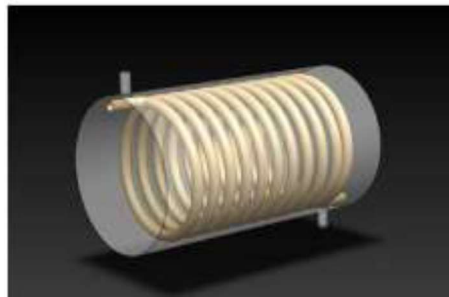
Pada penelitian ini menggunakan AHU sederhana dengan sistem sirkulasi dan pengurangan kelembaban seperti pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9. *Air Handling Unit* Sederhana.

2.6.1 Tube Heat exchanger

Shell and Tube merupakan salah satu tipe alat penukar panas yang secara konstruksi terdiri dari kumpulan pipa kecil yang ditempatkan di dalam sebuah tabung silinder (*shell*). Dalam sistem ini, terdapat dua jenis fluida: satu fluida mengalir di dalam pipa-pipa (*tube*), sementara fluida lainnya mengalir melalui ruang di dalam *shell*. Proses perpindahan panas terjadi antara kedua fluida tersebut, di mana panas berpindah dari fluida yang bersuhu lebih tinggi ke fluida yang bersuhu lebih rendah[21].



Gambar 2.10. Evaporator tube and shell heat exchanger[22]

Pada **Gambar 2.10** adalah *shell and tube* pada penelitian ini fluida yang mengalir dalam *tube* adalah refrigeran kimia (Freon), sedangkan fluida yang mengalir dalam *shell* adalah air (*water*). Prinsip kerja dari *shell and tube* ini adalah sebuah *tube* evaporator yang dibentuk coil melingkar di dalam *shell* berbentuk tabung yang berfungsi untuk mendinginkan fluida air di dalam *shell* dengan fluida freon yang di kompresi oleh kompresor sehingga fluida freon menjadi dingin, lalu dalam *shell* ini terjadi perpindahan kalor dari air yang bersuhu tinggi ke suhu yang lebih rendah pada freon. Pada prinsip kerja tersebut berlaku hukum perpindahan panas sensibel yang dapat diuraikan dengan persamaan berikut :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Keterangan :

Q = Laju perpindahan kalor (kw)

m = Laju aliran massa air yang melewati *shell* (Kg/s)

C_p = Kalor spesifik air murni (J/kg°C)

ΔT = Selisih suhu masuk dan keluar (°C)

Dalam penelitian ini diketahui bahwa Q adalah kapasitas evaporator yang telah di ketahui sebelumnya sebesar 2,3205kw maka dari data penyerapan kalor tersebut, dapat di cari laju aliran massa air dengan persamaan berikut:

$$m_{air} = \frac{Q_e}{c_{p_{air}} \cdot T_{air\ masuk} - T_{air\ keluar}} \quad (2.2)$$

Keterangan :

m_{air} = Laju aliran massa air (kg/s)

Q_e = Laju perpindahan kalor pada evaporator (kw)

C_p = Kalor spesifik air murni (J/kg°C)

T_{masuk} = suhu air masuk (°C)

T_{keluar} = suhu air keluar (°C)

Cara mengubah satuan laju aliran massa air dari kg/s menjadi liter/s untuk menghitung kebutuhan kecepatan pompa dapat menggunakan persamaan laju aliran volumetris berikut :

$$V = \frac{m}{p} \quad (2.3)$$

Keterangan :

V = Laju aliran volumetris (L/s)

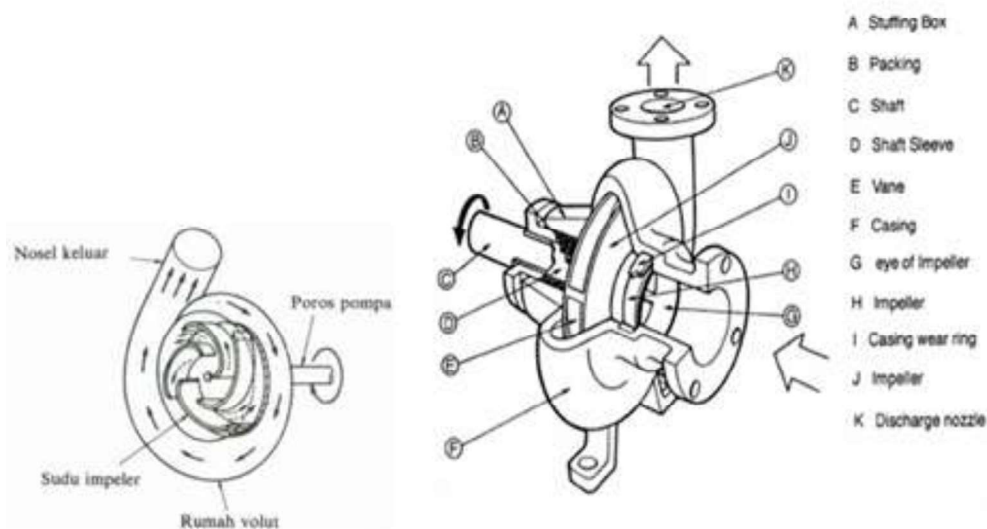
m = laju aliran massa air (kg/s)

p = Densitas air (L/s)

2.6.2 Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal merupakan salah satu jenis pompa tipe *rotodynamic* yang prinsip kerjanya menggunakan gaya sentrifugal untuk menghasilkan fluida bertekanan. Pentingnya peran pompa dalam berbagai proses sirkulasi *water chiller*, menjadikan pengujian pompa sentrifugal menjadi aspek yang sangat krusial dalam menjaga kinerja yang optimal dan keamanan operasi. Bagian utama dari pompa

sentrifugal terdiri dari tiga komponen seperti pada **Gambar 2.11** yaitu *impeller*, *casing*, dan *shaft* atau poros penggerak. Poros yang menggerakkan *impeller* menyebabkan gaya hisapan sehingga fluida memasuki mata *impeller* secara aksial. Sudu-sudu pada *impeller* akan mengarahkan dan memberikan momentum pada fluida sehingga kecepatan fluida meningkat. Selubung berbentuk spiral dengan penampang yang secara bertahap meningkat atau disebut juga *volute* akan mengubah energi kinetik dari fluida menjadi tekanan. Selain itu terdapat komponen penting lain pada sistem pemompaan yaitu *valve*. *Valve* digunakan untuk mengatur aliran dan tekanan, menjaga pipa dan pompa dari kelebihan tekanan, mencegah kondisi transien pada aliran, mencegah aliran balik pada sistem pemompaan, mengeluarkan udara dan fungsi lainnya[23].



Gambar 2.11. Bagian Bagian Pompa Sentrifugal [24].

Pada penelitian ini pompa digunakan sebagai aktuator utama untuk pendistribusian *water* refrigeran dari *shell exchanger* ke AHU, dengan kecepatan yang di kontrol sesuai kebutuhan sistem pendinginan. Pengontrolan kecepatan pompa dilakukan oleh kontroler PLC dengan mengatur PWM *duty cycle* pada pompa hingga mendapatkan kecepatan laju aliran yang sesuai dengan rancangan sistem pendingin. Berikut pada **tabel 2.2**. Akan di jabarkan spesifikasi pompa pada sistem distribusi *water* refrigeran.

Tabel 2.2. Spesifikasi pompa

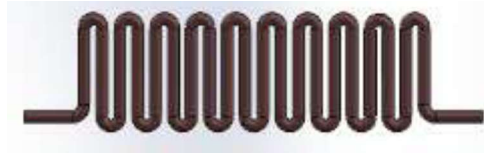
Parameter	Spesifikasi
Tegangan operasi	12V DC
Power	8 watt
Flow rate	600 liter/jam
Temperature	10°C – 60°C
Height	5 meter

2.6.3 Coil Pendingin (Liquid Chilling Evaporator)

Komponen ini berfungsi untuk menyerap panas dan di alirkan melalui *heat exchanger* kemudian di pindahkan ke refrigeran cara kerja dari *liquid chilling evaporator* ini adalah dengan cara mendinginkan fluida cair berupa air. Air yang telah didinginkan nantinya akan didistribusikan pada wadah yang dinamakan AHU. Tipe evaporator yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe *Hellical tube evaporator* dan *Serpentine tube evaporator*[25].

Evaporator tipe *hellical tube* menggunakan pipa yang dibentuk spiral (heliks) untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Desain spiral ini memperpanjang jalur aliran refrigeran dalam ruang yang lebih kecil, meningkatkan luas permukaan kontak, dan menciptakan aliran turbulen yang memperbaiki efisiensi termal[26]. Sedangkan Evaporator tipe *serpentine* merupakan jenis penukar panas yang menggunakan pipa berbentuk berliku-liku menyerupai ular (*serpentine*) sebagai jalur aliran fluida kerja. Desain ini memungkinkan peningkatan efisiensi perpindahan panas melalui pembentukan aliran sekunder dan turbulensi yang disebabkan oleh perubahan arah aliran fluida seperti pada **Gambar 2.12**.

Pada penelitian ini evaporator *tube spiral (helical tube)* digunakan pada pendingin pertama yang terletak pada *shell* seperti pada **Gambar 2.13**, yang berisi refrigeran pendingin kimia dan air pada *shell*, sedangkan pada evaporator kedua yaitu evaporator tipe *Serpentine* yang didalamnya mengalir refrigeran air(*water*) yang sudah didinginkan pada *shell* kemudian dialirkan oleh pompa dan didistribusikan ke ruangan oleh kipas.



Gambar 2.12. *Serpentine tube* evaporator .



Gambar 2.13. *Helical tube* evaporator .

2.6.4 *Fan blower*

Fan blower adalah alat yang mampu menaikkan atau memperbesar tekanan udara atau gas yang akan dialirkan dalam satu ruangan tertentu juga sebagai pengisapan atau pemvakuman udara dan gas tertentu. Untuk kerja *blower* sangat tergantung pada desain *impeller* dimana komponen tersebut sangat berperan penting dalam menaikkan tekanan udara didalam casing agar udara yang terhisap bisa tervakum secara maksimal, sehinggah dengan pemanfaatan udara didalam casing akan terdorong keluar dengan tekanan yang lebih besar [27]. Sesuai pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Fan blower [28].

Impeller adalah komponen yang berputar dari *blower* sentrifugal yang digunakan untuk mengirim/mentransfer energi dari motor dengan mempercepat udara keluar dari pusat rotasi. Mesin *impeller* biasanya berbentuk silinder pendek dengan inlet terbuka, untuk menerima udara yang masuk dan baling-baling untuk mendorong udara secara radial [27]. Dalam penelitian ini fungsi utama dari *fan blower* ini adalah untuk menghisap udara bersuhu tinggi dari ruangan untuk

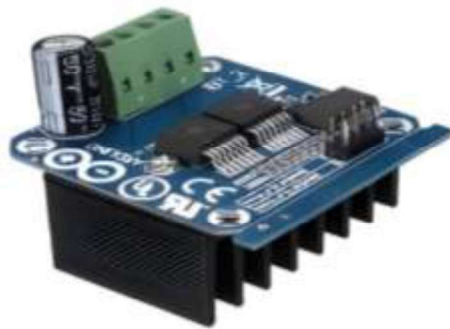
dihembuskan lagi ke dalam ruangan melewati coil pendingin sehingga udara ruangan menjadi bersuhu lebih rendah. Berikut adalah spesifikasi dari *blower* yang digunakan pada penelitian ini pada **tabel 2.3**, spesifikasi *fan blower*.

Tabel 2.3. Spesifikasi *Fan blower*.

Parameter	Spesifikasi
Tipe	PAPST RG133
Tegangan Operasional	6 - 24V DC
Power	40 W
<i>Flow Rate</i>	1950 RPM

2.6.5 *Driver motor* BTS 7960

Driver motor adalah peningkat arus. Fungsi dari motor *driver* adalah untuk merubah sinyal kontrol dengan arus rendah menjadi arus yang lebih tinggi ataupun sebaliknya untuk menggerakkan motor. Pada penelitian ini, menggunakan *driver* motor BTS7960 seperti pada **Gambar 2.15**. dengan pertimbangan spesifikasi yang bisa mengontrol arus yang tinggi hingga 43A seperti pada **Tabel 2.4**.

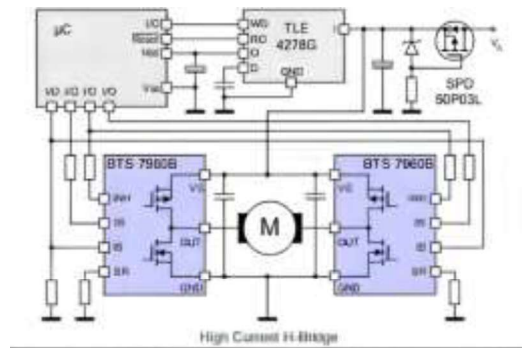


Gambar 2.15. *Driver Motor* BTS 7960 [29].

Modul BTS7960 adalah sebuah *driver* motor H-bridge yang dirancang untuk mengendalikan motor dengan arus besar. Modul ini sudah terintegrasi penuh, sehingga sangat mudah dihubungkan ke mikrokontroler. Berkat IC *driver* di dalamnya, modul ini memiliki banyak fitur proteksi otomatis (terhadap panas, tegangan, dan arus berlebih) serta fitur canggih seperti pendeteksi arus. Secara keseluruhan, BTS7960 merupakan solusi yang efisien, aman, dan hemat biaya untuk menggerakkan motor PWM berdaya tinggi dalam bentuk yang ringkas [30].

Driver motor ini memiliki ketahanan yang cukup baik dan dapat mengontrol motor DC yang memerlukan arus tinggi. *Driver* motor ini dapat mengalirkan arus

hingga 43 A dan memiliki rentang tegangan input yang dialirkan ke motor sebesar 5,5V-27V DC. Motor *Driver* BTS7960 memiliki 8 pin diantaranya R_PWM, L_PWM, R_EN, L_EN, R_IS, L_IS, VCC, GND. Pin R_PWM berfungsi untuk membalikkan putaran motor, dan L_PWM di kondisi low. Pin L_PWM berfungsi untuk membalikkan putaran motor, dan R_PWM di kondisi low. Pin R_EN dan pin L_EN dihubungkan ke 5V [31].



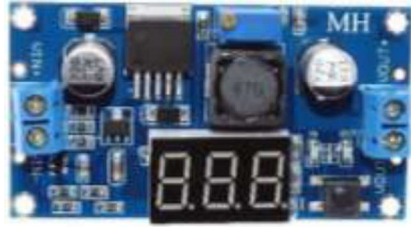
Gambar 2.16. Diagram Skematik *Driver* Motor DC BTS 7960 [32].

Pada **Gambar 2.16** diagram skematik *driver* motor BTS7960 terdiri dari mikrokontroler, regulator TLE4278G, proteksi MOSFET SPD50P03L, dan dua IC BTS7960B yang membentuk rangkaian H-Bridge. Mikrokontroler menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur kecepatan dan logika *HIGH/LOW* untuk mengendalikan arah putaran motor. TLE4278G berfungsi menstabilkan tegangan suplai logika, sedangkan SPD50P03L melindungi rangkaian dari arus balik dan lonjakan tegangan. Dua BTS7960B sebagai *half-bridge driver* bekerja menangani arus besar hingga 43 A dan memungkinkan kontrol motor maju, mundur, atau berhenti dengan aman karena sudah dilengkapi proteksi arus lebih dan panas berlebih.

Tabel 2.4. Spesifikasi *Driver* Motor BTS 7960.

Parameter	Spesifikasi
Tegangan operasi (Vs)	5,5 V – 27 V
Arus kontinu maksimal	43 A
Arus puncak (peak current)	±55 A (durasi singkat)
Logika input	TTL/CMOS 3,3 V – 5 V kompatibel
Frekuensi PWM maksimal	25KHz

2.6.6 Buck converter LM2596



Gambar 2.17. LM2596 DC buck converter

Buck converter LM2596 menampilkan sebuah modul penurun tegangan yang menggunakan sirkuit terintegrasi (IC) LM2596. IC ini berfungsi sebagai konverter DC-DC step-down, atau yang sering disebut konverter buck, dengan kapasitas arus 3A. Rangkaian elektronika daya ini bekerja dengan cara mengubah tegangan DC konstan menjadi tegangan DC variabel, yang besarnya diatur oleh siklus kerja dari rangkaian pengontrol. Keunggulan utama dari modul IC Step Down LM2596 adalah kemampuannya untuk menjaga tegangan keluaran tetap stabil meskipun tegangan masukan mengalami fluktuasi [30]. Hal tersebut dapat di lihat pada **Gambar 2.17.**

Pada penelitian ini modul *buck converter* digunakan untuk *stepdown* tegangan dari *power supply* 24V DC ke 5V DC untuk sensor *waterflow*, sisi sekunder *optocoupler* dan IC *driver* motor BTS7960. Berikut **pada Tabel 2.5** spesifikasi dari LM2596 *buck converter*:

Tabel 2.5. Spesifikasi LM2596 DC Buck Converter.

Parameter	Spesifikasi
Input	<40 V DC
Output	1,25 – 37 V DC
Maksimal arus	3 A
Fitur	Adjustable output
Frekuensi	150 Khz
Efisiensi	<92 %
Dimensi	66 36 mm

Untuk mengetahui seberapa baik nilai input yang diubah menjadi output oleh komponen buck converter ini digunakan persamaan (2.4) sebagai berikut.

$$\eta = \frac{\text{daya output}}{\text{daya input}} \times 100\% \quad (2.4)$$

2.6.7 Sensor *Flowmeter*

Flowmeter adalah alat atau sensor yang digunakan untuk mengukur laju aliran fluida baik cair maupun gas dalam sebuah sistem. Sensor ini banyak digunakan dalam bidang industri, seperti sistem distribusi air, pengolahan limbah, industri kimia, dan sistem HVAC, guna memantau efisiensi proses dan menghindari pemborosan energi [33]. Jenis – jenis sensor *flowmeter* dibagi beberapa jenis yaitu:

1. *Ultrasonic flowmeter*

Ultrasonic flowmeter bekerja berdasarkan prinsip pengukuran waktu tempuh gelombang ultrasonic. Sensor ini tidak memiliki komponen mekanik bergerak sehingga sangat tahan terhadap keausan dan cocok digunakan dalam sistem aliran air bersih[33]. Aplikasinya umumnya ada si irigasi dan distribusi air rumah tangga[34].

2. *Thermal Mass Flowmeter*

Flowmeter tipe *Thermal Mass* bekerja dengan cara mendeteksi perubahan panas dalam fluida yang mengalir. Sensor ini biasanya digunakan untuk pengukuran karena mampu langsung mengukur massa aliran gas tanpa memerlukan kompensasi tekanan maupun suhu[35].

3. *Differential Pressure Flowmeter*

Flowmeter *Differential Pressure* ini bekerja berdasarkan perbedaan tekanan diantara dua titik sebuah aliran yang terjadi penyempitan seperti *Oriface* atau *Venturi*. Konsep ini mengacu pada prinsip *Bernoulli*. Sensor jenis ini banyak digunakan dalam sistem tertutup[36].

4. *Vortex Flowmeter*

Vortex Flowmeter menggunakan prinsip pembentukan pusaran di belakang suatu benda (*Bluff Body*) yang diletakan dalam jalur aliran. Jumlah pusaran per detik berbanding lurus dengan kecepatan aliran. Alat ini efektif untuk cairan dan gas. Alat ini tidak memiliki komponen bergerak sehingga tidak memerlukan banyak perawatan[37].

5. *waterflow sensor*

Sensor ini terdiri dari rotor dan sensor *Hall effect*. Prinsip kerja dari sensor *Hall effect* ialah ketika aliran air melewati katup dan membuat rotor magnet

berputar dengan kecepatan tertentu terjadilah medan magnet pada rotor yang memberikan efek pada sensor dan menghasilkan sebuah sinyal pulsa berupa tegangan yang dikendalikan oleh mikrokontroler[37]. Sensor ini sangat cocok untuk pengukuran debit lahu aliran air karena konstruksinya yang sederhana dan murah.

Dalam penelitian ini sensor *waterflow* yang digunakan adalah tipe sensor YF-S201 seperti pada **Gambar 2.18**. Sensor ini mendeteksi pengukuran aliran air menggunakan turbin yang mempunyai prinsip kerja rotasi mekanik dan efek hall dengan menghasilkan sinyal pulsa digital yang dapat dihitung untuk menentukan debit air. Dalam datasheet sensor YF-S201 dapat dilihat bahwa rekomendasi batas pengukuran adalah 100 L/H sampai 1800 L/H seperti pada **Tabel 2.7** spesifikasi sensor.



Gambar 2.18. Sensor *Waterflow* YF – S201[38].

Tabel 2.6. data kalibrasi sensor Yf-S201[38].

<i>Flow (L/H)</i>	<i>Frekuensi (Hz)</i>	<i>Error</i>
120	16	+10%
240	32,5	
360	49,3	
480	65,5	5%
600	82	
720	90,2	

Pada **Tabel 2.6** data kalibrasi sensor YF-S201 menjelaskan karakteristik sensor yang menunjukan hubungan antara laju aliran air dalam (L/H) dengan frekuensi pulsa output dalam (Hz) dan data *error* menunjukan data pada rentang aliran 120 (L/H) memiliki nilai akurasi yang rendah sebesar +10% nilai *error*

sedangkan pada rentang aliran 240 – 720 (L/H) memiliki nilai akuransi yang tinggi dengan nilai *error* 5%. Dalam penelitian ini data frekuensi (Hz) sensor digunakan untuk melakukan pembacaan kecepatan pompa yang mana digunakan satuan (L/m) maka dari itu data kalibrasi sensor yang digunakan sebagai acuan untuk memperkirakan hasil pembacaan harus di konversi ke dalam satuan (L/m) terlebih dahulu dengan persamaan (2.5) berikut :

$$f = Q \cdot K \quad (2.5)$$

Keterangan :

f = Frekuensi (Hz)

Q = Laju aliran (L/m)

K = Konstanta kalibrasi $\left(\frac{Hz}{L/m}\right)$

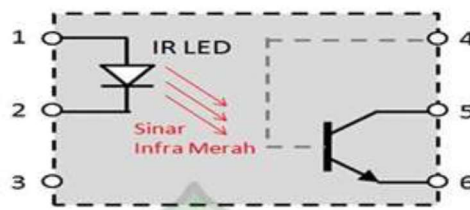
Tabel 2.7. Spesifikasi Sensor YF – S201 [38].

Parameter	Spesifikasi
Model	YF – S201
Normal Voltage	5 to 18 VDC
Working Voltage	DC 4.5V – 24V
Max. Working Current	15mA (DC 5V)
Load Capacity	≤ 10 mA (DC 5V)
Flow Rate Range	1~30L/min
Operating Temperature	$\leq 80^{\circ}\text{C}$
Liquid Temperature	$\leq 120^{\circ}\text{C}$
Operating Humidity	35%~90%RH
Allowing Pressure	$\leq 1.75\text{MPa}$
Storage Temperature	$-25 \sim + 80^{\circ}\text{C}$
Storage Humidity	25%~95%RH
Electric strength	1250V/min
Insulation resistance	$\geq 100\text{M}\Omega$
External threads	1/2"
Outer diameter	20mm
Intake diameter	9mm
Outlet diameter	12mm

2.6.8 Optocoupler

Dalam bidang elektronika, *Optocoupler* juga dikenal dengan istilah Opto-isolator, Photocoupler, atau Optical Isolator merupakan sebuah komponen yang berperan sebagai penghubung sinyal dengan memanfaatkan cahaya sebagai media transmisinya. Secara umum, *Optocoupler* terdiri dari dua bagian utama, yaitu bagian pemancar (transmitter) yang bertugas menghasilkan cahaya, dan bagian penerima (*receiver*) yang berfungsi untuk mendeteksi atau menangkap cahaya yang dipancarkan tersebut.[39].

Pada dasarnya, kombinasi *Optocoupler* LED-Phototransistor merupakan jenis *Optocoupler* yang terdiri atas dua komponen utama, yaitu sebuah LED (*Light Emitting Diode*) yang memancarkan cahaya infra merah (IR LED), serta sebuah phototransistor sebagai elemen yang peka terhadap cahaya. Phototransistor ini berfungsi untuk mendeteksi sinyal cahaya infra merah yang dihasilkan oleh IR LED. Untuk memahami lebih lanjut mengenai cara kerja dari *Optocoupler*, penjelasan detail mengenai prinsip kerjanya dapat dilihat rangkaian internal komponen *Optocoupler* **Gambar 2.19** berikut:



Gambar 2.19. Rangkaian Internal *Optocoupler*[39].

Dari **Gambar 2.19** dapat dijelaskan bahwa Arus listrik yang mengalir melalui IR LED akan menyebabkan IR LED memancarkan sinyal cahaya Infra merahnya. Intensitas cahaya tergantung pada jumlah arus listrik yang mengalir pada IR LED tersebut. Kelebihan ahaya infra merah adalah pada ketahanannya yang lebih baik jika dibandingkan dengan cahaya yang tampak. cahaya infra merah tidak dapat dilihat dengan mata telanjang[39].

Sensor *optocoupler* adalah komponen elektronik yang memiliki struktur kompleks dan tersusun dari beberapa elemen penting yang bekerja secara terpadu untuk mentransmisikan sinyal melalui media cahaya optik. Secara umum, *optocoupler* memiliki dua bagian utama, yakni *transmitter* yang berperan sebagai

pemancar cahaya optik, serta *receiver* yang berfungsi untuk mendeteksi cahaya yang dipancarkan[40]. Di samping kedua bagian utama tersebut, sensor *optocoupler* juga terdiri atas beberapa elemen pendukung lainnya yang turut berperan dalam proses kerjanya, yaitu:

1. Transmitter

Transmitter merupakan komponen vital dalam sistem komunikasi yang bertugas memproses dan mengubah sinyal input agar dapat dikirimkan melalui saluran atau media tertentu. Fungsi utamanya adalah mentransformasikan sinyal yang diterima menjadi bentuk yang kompatibel untuk dikirim ke unit penerima, baik melalui udara, kabel, maupun serat optik. Sebagai contoh, dalam sistem komunikasi radio, transmitter akan mengkonversi sinyal audio atau data menjadi sinyal radio yang dapat dipancarkan melalui gelombang elektromagnetik.

2. *Reciver*

Receiver merupakan elemen kedua yang sangat penting dalam sistem *optocoupler*, berfungsi untuk mendeteksi cahaya yang dipancarkan oleh transmitter. Komponen ini dirancang khusus untuk menangkap cahaya optik yang dihasilkan oleh dioda pemancar pada bagian transmitter, lalu mengkonversinya menjadi sinyal listrik yang dapat diolah lebih lanjut oleh rangkaian elektronik. Jenis receiver yang digunakan dapat bervariasi, seperti fototransistor, fotodioda, atau fotorelay, dan pemilihannya disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi serta spesifikasi teknis dari sensor *optocoupler* yang digunakan.

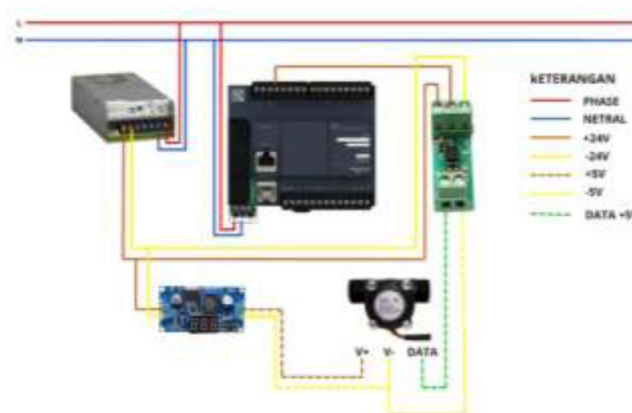
3. Isolator

Isolator adalah komponen vital dalam sistem elektronik yang berfungsi untuk memberikan pemisahan dan perlindungan antara bagian-bagian rangkaian yang memiliki perbedaan tegangan listrik. Fungsinya sangat penting dalam menjaga keandalan dan keselamatan sistem, khususnya saat terdapat perbedaan tegangan yang signifikan atau potensi gangguan listrik. Dengan memisahkan bagian bertegangan tinggi dari bagian lain yang bertegangan rendah atau tidak bertegangan, isolator mencegah terjadinya arus pendek serta melindungi komponen-komponen sensitif dari kerusakan akibat lonjakan atau kebocoran arus listrik.

4. *Housing*

Housing atau wadah pada sensor *optocoupler* memiliki peran penting dalam menjaga performa dan keandalan sensor dengan melindungi serta menempatkan komponen-komponen internal pada posisi yang tepat. Fungsi utama *housing* adalah memberikan perlindungan fisik terhadap elemen-elemen sensitif dari berbagai pengaruh eksternal yang dapat mengganggu kinerja sensor. *Housing* ini biasanya terbuat dari material yang tahan terhadap benturan, getaran, serta kondisi lingkungan yang keras seperti debu, kelembapan, dan suhu ekstrem, sehingga memastikan sensor dapat bekerja secara optimal dalam berbagai situasi.

Dalam penelitian tugas akhir ini menggunakan *Optocoupler* tipe PC817 karena dibutuhkan untuk merubah output data dari sensor *waterflow* ke input PLC, yang mana output dari sensor *waterflow* bernilai 5V sedangkan input dari PLC untuk bernilai *HIGH* adalah 12 – 24V. sehingga membutuhkan komponen *Optocoupler* sebagai transmitter pengubah input data signal dari sensor YF – S201 yang berupa tegangan 5V menjadi 24V dengan memberikan catu daya pada sisi transistor sebesar 24V untuk suplay pada input PLC seperti pada **Gambar 2.20** Rangkaian komunikasi sensor YF-S201 dengan PLC. Lalu untuk spesifikasi dapat dilihat pada **Tabel 2.8**.



Gambar 2.20. Rangkaian komunikasi sensor YF-S201 dengan PLC.

Tabel 2.8. Spesifikasi modul *optocoupler* PC817.

Parameter	Nilai
Tegangan normal maju LED	1,2V DC

Parameter	Nilai
Tegangan max maju LED	1,4V DC
Tegangan reverse LED	6V DC
Tegangan kolektor emitter max	80V DC
Tegangan emitter kolektor max	6V DC
Current transfer ratio	50% min – 400% max
Rise time	4 us (typ) – 10 us (max)
Fall time	3 us (typ) – 18 us (max)
Transistor output	NPN

2.6.9 Transmitter RTD PT100

Transmitter suhu berbasis RTD PT100 dengan rentang pengukuran 0–100 °C. RTD (*Resistance Temperature Detector*) PT100 bekerja berdasarkan prinsip perubahan resistansi logam platinum yang memiliki nilai resistansi nominal 100 Ω pada 0 °C. Seiring dengan kenaikan suhu, resistansi meningkat secara linier, sehingga sangat sesuai digunakan pada aplikasi industri yang membutuhkan presisi tinggi. Transmitter kemudian mengonversi perubahan resistansi ini menjadi sinyal arus standar industri 4–20 mA, yang umum dipakai karena memiliki ketahanan tinggi terhadap gangguan (*noise*) serta memungkinkan transmisi jarak jauh tanpa penurunan kualitas sinyal[41]. Yang ditunjukkan Pada **Gambar 2.21**.



Gambar 2.21. Transmitter RTD PT100

Tabel 2.9. Spesifikasi Transmitter RTD.

Parameter	Spesifikasi
Type input	Temperature Transmitter RTD
Range	0° – 100°C
Output	4 – 20 mA
Catu daya	24V DC
Accuracy	0,2% FS

Pada **tabel 2.9** ditunjukkan bahwa akurasi 0,2 % FS, sehingga deviasi maksimum pembacaan adalah:

$$Error = 0,2 \% \times 100^{\circ} C = \pm 0,2^{\circ} C$$

Bisa diartikan pada pengukuran 0–100 °C, transmitter mampu memberikan data suhu dengan kesalahan relatif kecil sehingga layak digunakan untuk sistem kontrol yang membutuhkan kestabilan. Studi lain juga menunjukkan bahwa penggunaan RTD PT100 dengan pengkondisian sinyal yang tepat, termasuk linearization dan kompensasi, mampu menjaga kestabilan pengukuran bahkan pada kondisi khusus seperti terowongan angin [42].

Dalam sistem kontrol menggunakan PLC seperti pada penelitian ini menggunakan PLC M241CE24T yang mempunyai resolusi 12bit menghasilkan 4096 level, maka dari itu output transmitter 4 – 20 mA harus dikonversi mengikuti rentang tersebut, sehingga menghasilkan nilai 4 mA untuk 0 dan nilai 20 mA untuk 4095, untuk menampilkan nilai suhu aktual, diperlukan scaling ke dalam range 0 – 100°C dengan persamaan (2.7):

$$Scaling = \frac{\text{nilai pembacaan}}{4095} \times 100 \quad (2.6)$$

Sedangkan untuk mencari nilai *error* pembacaan sensor dapat digunakan rumus *error* sebagai berikut:

$$error \% = \frac{(\text{nilai pembacaan} - \text{nilai referensi})}{\text{nilai referensi}} \times 100\% \quad (2.7)$$

2.6.10 Sensor RTD PT100

Resistance Temperature Detector adalah sensor suhu yang pengukurannya menggunakan prinsip perubahan resistansi atau hambatan listrik logam yang dipengaruhi oleh perubahan suhu. RTD adalah salah satu sensor suhu yang paling banyak digunakan dalam otomatisasi dan proses kontrol [41]. pada **gambar 2.22** adalah contoh *RTD* secara fisik.



Gambar 2.22. Sensor *Resistance Temperature Detector* (RTD) PT100.

Pada tipe elemen *wire-wound* atau tipe standar, RTD terbuat dari kawat yang tahan korosi, yang dililitkan pada bahan keramik atau kaca, yang kemudian ditutup dengan selubung *probe* sebagai pelindung. Selubung *probe* ini biasanya terbuat dari logam *inconel* (logam dari paduan besi, chrom, dan nikel). *Inconel* dipilih sebagai selubung dari RTD karena tahan korosi dan ketika ditempatkan dalam medium cair atau gas, selubung *inconel* cepat dalam mencapai suhu medium tersebut. Di antara kawat RTD dan selubung juga terdapat keramik (porselen isolator) sebagai pencegah hubung pendek antara kawat platina dan selubung pelindung[41].

Pada penelitian ini, sensor suhu yang digunakan adalah PT100 yang tergolong jenis sensor suhu RTD. Resistansi nominal sensor RTD adalah besarnya resistansi sensor pada saat memiliki suhu 0°C. Meskipun hampir semua nilai resistansi dapat dicapai untuk resistansi nominal, tetapi yang paling umum adalah platinum 100 Ω atau disingkat PT100. Pada suhu 0°C nilai resistansi yang terbaca pada RTD adalah 100 Ω . Antara nilai resistansi dan suhu adalah linier. Untuk spesifikasi dari sensor RTD PT100 dapat dilihat pada **Tabel 2.10** dibawah.

Tabel 2.10. Spesifikasi Sensor RTD PT100.

Parameter	Spesifikasi
Model	WZPT - 03
Konfigurasi kabel	3 wire
Temperature range	-50 sampai 400°C
Akurasi	$\pm 1,5^\circ\text{C}$

2.7 PLC Schneider M241CE24T

PLC (*Programmable Logic Controller*) adalah peralatan elektronika yang beroperasi secara digital, yang menggunakan *programmable* memori untuk menyimpan internal bagi intruksi – intruksi fungsi spesifik seperti logika,

sekuensial, *timing*, *counting* dan aritmatika untuk mengendalikan secara digital atau analog input atau output sebagai tipe mesin[43].

Dalam penelitian ini tipe PLC yang digunakan adalah TM241CE24T dari Schneider seperti ditunjukan pada **Gambar 2.23** yang memiliki keunggulan performa tinggi, dan integrasi yang luas dengan sistem industri, dengan kapasitas I/O digital sebanyak 24 kanal (14 *input* dan 10 *output* transistor tipe *sink*), serta dilengkapi dengan berbagai antarmuka komunikasi seperti *Ethernet*, *USB mini*, dan port serial RS-232/485. Perangkat ini juga memiliki memori program sebesar 256 KB dan prosesor berkecepatan tinggi berbasis 32-bit RISC yang mendukung pemrosesan logika kontrol secara efisien [44].



Gambar 2.23. PLC TM241CE24T[44]

PLC TM241CE24T menawarkan berbagai fitur canggih, seperti pada **Tabel 2.11** diantaranya adalah *Web Server* bawaan yang memungkinkan pengguna mengakses dan memonitor sistem secara langsung melalui jaringan lokal menggunakan *browser web*. Selain itu, perangkat ini mendukung protokol komunikasi industri populer seperti *Modbus TCP/RTU*, *CANopen*, dan *Ethernet/IP*, sehingga mudah diintegrasikan dengan berbagai perangkat dan sistem otomasi lainnya. PLC ini juga mendukung kontrol gerakan (*motion control*) hingga empat sumbu menggunakan sinyal *Pulse Train Output* (PTO), yang sangat berguna dalam aplikasi mesin bergerak atau sistem presisi tinggi. Dalam hal pemrograman, PLC ini menggunakan perangkat lunak **EcoStruxure Machine Expert** (sebelumnya dikenal sebagai SoMachine) yang mendukung standar pemrograman IEC 61131-3. Bahasa pemrograman yang didukung antara lain *Ladder Diagram* (LD), *Function*

Block Diagram (FBD), *Structured Text* (ST), *Instruction List* (IL), dan *Sequential Function Chart* (SFC).

Dalam penelitian ini PLC TM241CE digunakan untuk membaca sinyal dari sensor *waterflow* YF-S201 dan RTD PT100 untuk mengatur *aktuator* pompa dan *fan blower*, fungsi ini digunakan pada sistem distribusi udara pada mesin *water chiller*. Dalam pengaplikasiannya, PLC TM241 menerima sinyal digital dari dari sensor *waterflow* menggunakan input *HSC* pada PLC (*High Speed Counter*) untuk membaca kecepatan laju aliran massa dari *shell* ke dalam sistem AHU, lalu PLC juga membaca input masukan analog dari sensor RTD PT100 yang digunakan untuk mengatur kecepatan *fan blower*[44].

Tabel 2.11. Spesifikasi PLC TM241CE24T [44]

Spesifikasi	Keterangan
Jumlah Input Digital	14, discrete input 8 fast input (sink/source)
Jumlah Output Digital	10 output transistor 4 fast output (sink)
Protokol Komunikasi	Modbus RTU, Modbus TCP, Ethernet/IP
Memori Program (user application)	256 KB
Memori Variabel Data	64 KB
Port Ekspansi	Mendukung modul ekspansi TM3 (I/O tambahan)
Output PTO (Pulse Train Output)	Hingga 4 kanal (untuk kontrol motor stepper/servo)
Tegangan Operasi	24 VDC
Lingkungan Operasi	0 – 55°C, kelembaban 5–95% non-kondensasi
Software Pemrograman	EcoStruxure™ Machine Expert (sebelumnya SoMachine)
Bahasa Pemrograman	Ladder (LD), Structured Text (ST), Function Block (FBD)

2.8 Modul Ekspansi TM3AI8

Modul ekspansi adalah modul tambahan yang disediakan oleh Schneider untuk memenuhi kebutuhan I/O. Ekspansi ini terdiri dari beberapa tipe diantaranya adalah: TM3AI2H, TM3AI2HG, TM3AI4, TM3AI4G, TM3AI8, TM3AI8G, TM3TI4, TM3TI4G, TM3TI8T, TM3TI8TG, TM3AQ2, TM3AQ2G, TM3AQ4,

TM3AQ4G, TM3AM6, TM3AM6G, TM3TM3 dan TM3TM3G. Ekspansi input/output yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah ekspansi input/output analog TM3AI8, pemilihan tipe ekspansi tentu disesuaikan dengan kebutuhan sistem sendiri. Bentuk fisik ekspansi dapat dilihat seperti **gambar 2.24**.



Gambar 2.24. Modul Ekspansi TM3AI8[45]

Tabel 2.12. Spesifikasi Modul Ekspansi TM3AI8[45].

Spesifikasi	Keterangan
Catu daya	24 VDC
Kompatibilitas	M221, M241, M251, M262
Input analog	8 kanal
Tipe input analog	current 4...20 mA current 0...20 mA voltage 0...10 V voltage - 10...10 V
Resolusi ADC/DAC	12-bit , atau 11-bit + sign
Temperature Operasi	-10-55 °C (horizontal); -10...35 °C (vertical)
Proteksi IP	IP20

Penelitian ini kebutuhan untuk memakai modul ekspansi tipe TM3AI8 adalah untuk masukan input pembacaan dari sensor RTD PT100 yang berupa data analog, karena dalam PLC TM241CE24T tidak dibekali langsung dengan input analog sehingga sesuai dengan **Tabel 2.12** spesifikasi modul TM3AI8 sudah sesuai untuk kebutuhan pembacaan sensor tersebut.

2.9 Low Pass Filter (LC)

Low Pass Filter (LPF) tipe LC merupakan rangkaian filter pasif yang mengombinasikan komponen induktor dan kapasitor untuk mereduksi ripple tegangan serta menekan interferensi elektromagnetik (EMI) pada sistem konverter daya[46]. Prinsip kerja utama dari filter ini didasarkan pada karakteristik impedansi kedua komponen penyusunnya, di mana induktor akan menghambat sinyal

berfrekuensi tinggi melalui reaktansi induktifnya, sementara kapasitor akan mengalirkan sinyal frekuensi tinggi tersebut ke ground melalui reaktansi kapasitifnya[47]. Dalam aplikasinya pada konverter DC-DC maupun inverter, filter LC berfungsi kritis untuk memastikan kualitas daya keluaran tetap stabil dan mendekati bentuk gelombang ideal dengan meminimalkan komponen harmonisa yang timbul akibat proses penyaklaran frekuensi tinggi. Penentuan parameter nilai dan dalam perancangan filter sangat bergantung pada target frekuensi *cut-off*, yang secara ideal harus diletakkan jauh di bawah frekuensi penyaklaran sistem untuk mendapatkan atenuasi yang optimal. frekuensi resonansi atau *cut-off* untuk filter LC ditentukan melalui persamaan berikut :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L} \cdot C} \quad (2.8)$$

2.10 Switch Mode Power Supply (SMPS)

Switching power supply atau dikenal dengan istilah (SMPS) adalah catu daya elektronik yang dapat mensuplay kontrol saklar sesuai tegangan keluaran yang diminta. Konverter daya yang dikenal sebagai SMPS menyalurkan daya tanpa kehilangan daya dari sumber ke beban ideal. Tujuan converter adalah untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan masukan [48].



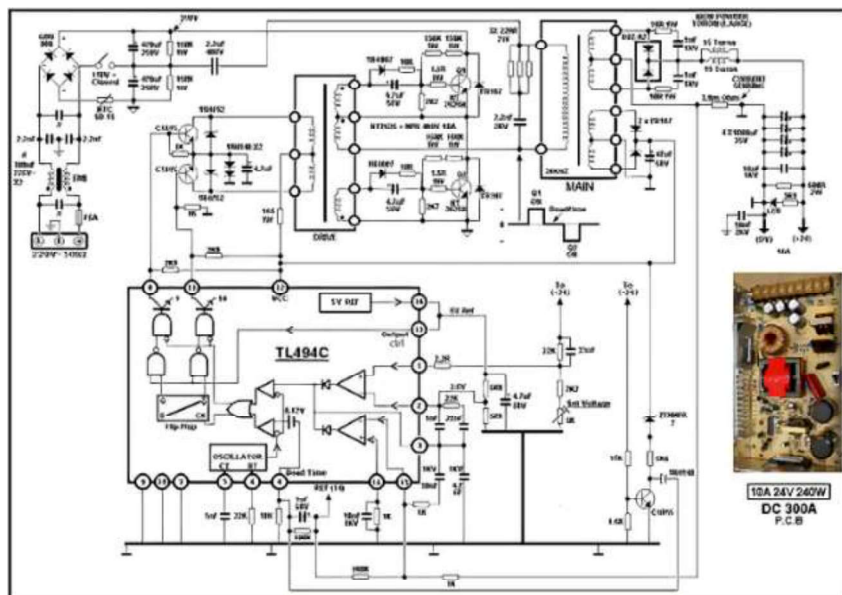
Gambar 2.25. *Power supply* (SMPS) [49].

Pada **Gambar 2.25** menunjukan *power supply* yang digunakan dalam penelitian ini, yang memanfaatkan catu daya mode sakelar (*Switch Mode Power Supply* / SMPS) 24V DC 5A, sebuah perangkat elektronik yang mengubah daya AC menjadi output DC yang teregulasi. Efisiensinya yang tinggi dicapai melalui operasi *switching* frekuensi tinggi, yang secara signifikan mengungguli catu daya

linier konvensional. Secara spesifik, catu daya ini menggunakan topologi *flyback converter*, yang ideal untuk output 24 VDC. Prinsip kerjanya melibatkan penyimpanan energi dalam medan magnet transformator ferit saat sakelar aktif (*on*) dan mentransfer energi tersebut ke output saat sakelar nonaktif (*off*). Pengaturan tegangan output dijaga dengan presisi melalui modulasi lebar pulsa (*duty cycle*) pada sakelar, sementara transformator juga berfungsi menyediakan isolasi galvanik untuk keamanan dan integritas sinyal [50].

SMPS topologi *flyback* menawarkan keunggulan berupa efisiensi tinggi hingga sekitar 77% pada beban 12 V/5 A, serta desain yang lebih ringkas dan ringan daripada rangkaian linier dengan kapasitor dan trafo besar. Meski penelitian tersebut mencatat output maksimum 2,5 A pada 24 V, prinsip efisiensinya tetap berlaku pada desain 24 V/5 A, dengan kebutuhan trafo dan komponen switching yang disesuaikan serta pengaturan loop pengendali umpan balik untuk menjaga regulasi tegangan [51].

Tidak hanya efisiensi, SMPS juga memiliki dimensi yang lebih kecil, bobot yang lebih ringan, dan performa yang lebih baik dalam hal disipasi panas dibandingkan *power supply* linier—dengan catatan bahwa kompleksitas desain dan kebutuhan proteksi terhadap tegangan tinggi perlu diperhatikan, termasuk filter EMI dan proteksi hubung singkat (*short-circuit protection*) [52].



Gambar 2.26. Skematik PSU 24 V DC 5 A [53].

Pada **Gambar 2.26** ditunjukkan rangkaian skematik dari SMPS 24V DC 5A yang mana rangkaian ini adalah sebuah Switch Mode *Power supply* (SMPS) 24V yang otaknya adalah IC TL494. Cara kerjanya dimulai dengan mengubah listrik AC 220V menjadi DC tegangan tinggi. Kemudian, IC TL494 mengontrol transistor daya dengan sinyal pulsa (PWM) berfrekuensi tinggi untuk "memotong-motong" arus DC melalui sebuah transformator, yang pada sisi output diubah menjadi tegangan 24V DC stabil. Kestabilan ini dijaga oleh sistem umpan balik (*feedback*) yang secara otomatis menyesuaikan sinyal PWM dari TL494 jika ada perubahan tegangan. Dilengkapi dengan proteksi arus berlebih dan panas, catu daya ini menawarkan efisiensi tinggi dalam bentuk yang ringkas untuk aplikasi kontrol pompa, kipas *blower* dan sensor. Untuk memastikan bahwa *power supply* dapat mendukung seluruh beban secara stabil, dilakukan estimasi daya total dari seluruh komponen sistem. Berdasarkan perhitungan :

$$P_{total} = V \times I = 24\text{ V} \times 5 = 120\text{ watt} \quad (2.9)$$

Pada penelitian ini SMPS 24V DC hanya digunakan untuk supply kontroler PLC, *power driver* dan sensor tidak termasuk sumber utama pada aktuatur pompa dan *blower* yang akan diberi cadu daya terpisah menggunakan *power supply* 12 VDC, dikarenakan untuk menjaga komponen posesor utama sehingga catu daya 24 V DC 5 ampere sudah cukup untuk mensupply semua kebutuhan daya pada prosesor.