

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam hal ini, penyusun telah melakukan kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan topik tugas akhir yang akan dikembangkan. Kajian ini bertujuan untuk memperoleh gambaran umum mengenai pendekatan-pendekatan sebelumnya, serta mengidentifikasi celah yang dapat dijadikan dasar pengembangan sistem secara lebih optimal.

Penelitian oleh Imam Mutaqin (2023) yang berjudul “Rancang Bangun Alat Pendingin Panel Surya Otomatis Menggunakan Uap Air Berbasis IoT” dilakukan sebagai upaya menurunkan suhu permukaan panel surya dengan memanfaatkan mist maker sebagai penghasil uap air. Sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 dan telah terintegrasi dengan *platform* IoT untuk pemantauan suhu secara *real-time* serta pengendalian otomatis pompa air. Sistem ini berhasil menjaga suhu panel tetap stabil, sehingga mendukung peningkatan efisiensi daya *output* panel surya. Namun, penelitian ini belum menyediakan fitur pengaturan ambang suhu secara fleksibel maupun sistem notifikasi terhadap kondisi tidak normal, sehingga dapat menjadi peluang pengembangan lanjutan [3].

Selanjutnya, penelitian oleh Husnie Mubarak dkk. dalam Jurnal Kohesi (2024) yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Peningkatan Daya *Output* pada Solar Panel dengan Metode Pendinginan Otomatis Berbasis Mikrokontroler” membahas sistem pendingin otomatis yang menggunakan kombinasi mikrokontroler Arduino Uno dan ESP32. Dengan sensor suhu, tegangan, dan arus, sistem dapat memantau kondisi panel dan mengaktifkan pendingin secara otomatis. Data dikirim ke Thingspeak untuk pemantauan *real-time*. Penelitian ini menunjukkan adanya peningkatan daya *output* sebesar 15,02%, namun belum dilengkapi fitur keypad sebagai pengatur batas suhu secara langsung, serta sistem proteksi berbasis notifikasi terhadap kondisi tidak normal [4].

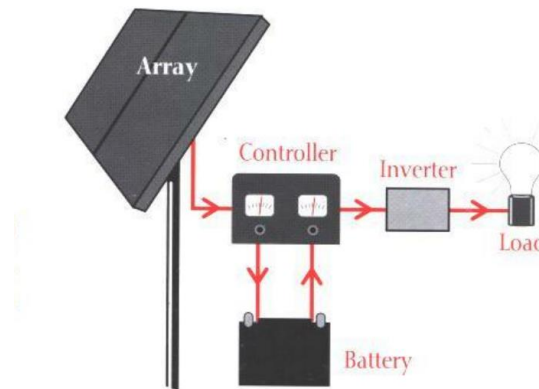
Penelitian lainnya dilakukan oleh Ichsan Jatnika (2021) dari Universitas Komputer Indonesia yang berjudul “Perancangan Sistem Pendingin Otomatis Panel Surya Untuk Peningkatan Daya *Output* Berbasis Mikrokontroler”. Penelitian ini

mengembangkan sistem pendingin otomatis yang digerakkan oleh mikrokontroler Arduino dengan sensor suhu, arus, tegangan, dan intensitas cahaya. Sistem mengaktifkan pompa air saat suhu panel melebihi ambang batas. Analisis dilakukan melalui perangkat lunak LabVIEW. Dari pengujian, sistem ini berhasil meningkatkan daya rata-rata dari 22,32 watt menjadi 27,8 watt. Namun, sistem tersebut belum mendukung perubahan ambang suhu secara langsung tanpa pemrograman ulang, serta belum terintegrasi ke dalam sistem IoT [5].

Dari beberapa kajian tersebut, penyusun menyimpulkan bahwa sistem pendingin otomatis pada panel surya yang terintegrasi dengan IoT merupakan hal yang sangat dibutuhkan untuk menjaga efisiensi dan umur pakai panel. Oleh karena itu, penyusun melakukan pengembangan sistem “RANCANG BANGUN PANEL SURYA DENGAN PENDINGIN AIR GUNA OPTIMALISASI DAYA *OUTPUT* DENGAN IOT BERBASIS ESP32” dengan pendekatan yang lebih terintegrasi dan adaptif. Penyusun menggunakan metode pendinginan air melalui pipa tembaga berbentuk zigzag di bagian bawah panel sebagai media pembuang panas. Sistem dikendalikan oleh ESP32 dan mendukung pemantauan suhu, arus, tegangan, dan daya secara *real-time*. Selain itu, sistem ini dikembangkan dengan penambahan fitur keypad 1x4 untuk pengaturan batas suhu secara manual tanpa pemrograman ulang, sensor ultrasonik yang dihubungkan dengan solenoid valve untuk sistem pembuangan otomatis apabila air melebihi batas, serta notifikasi Telegram sebagai sistem peringatan apabila suhu panel dalam kondisi tidak normal. Dengan begitu, sistem yang dikembangkan ini diharapkan mampu menjadi solusi yang lebih efisien, andal, dan aman dalam pengelolaan panel surya berbasis IoT.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya



Gambar 2. 1 Sistem PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem penyedia energi listrik yang memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber utama dan dikonversi menjadi energi listrik melalui teknologi fotovoltaik. Teknologi ini menggunakan sel surya yang terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon, yang mampu menghasilkan arus listrik searah (DC) saat terkena cahaya matahari. Sel-sel ini dirangkai menjadi modul, kemudian disusun dalam bentuk panel untuk menghasilkan energi listrik yang dapat digunakan sesuai kebutuhan [6].

PLTS sangat cocok diterapkan di wilayah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN), terutama di daerah pedalaman atau pulau-pulau terpencil. Di daerah tersebut, ketersediaan energi listrik menjadi tantangan besar karena sulitnya infrastruktur distribusi listrik. Oleh karena itu, penerapan PLTS menjadi solusi yang tepat untuk memenuhi kebutuhan dasar seperti penerangan rumah, sistem pompa air, alat kesehatan di puskesmas, dan sarana komunikasi.

Keunggulan utama dari sistem PLTS antara lain adalah penggunaan energi yang tersedia secara gratis, tidak menghasilkan suara saat beroperasi, ramah lingkungan, serta minim perawatan karena tidak memiliki bagian yang bergerak. Selain itu, sistem ini dapat bekerja secara otomatis dan efisien di wilayah dengan intensitas cahaya matahari yang tinggi seperti Indonesia

Besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

P = Daya yang dibangkitkan oleh panel surya (Watt)

V = Tegangan keluaran panel surya (Volt)

I = Arus keluaran panel surya (Ampere)

2.2.2 Faktor yang mempengaruhi Daya *Output* Panel Surya

Daya *output* panel surya dipengaruhi oleh berbagai faktor yang menentukan efisiensi konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Adapun beberapa faktor utama yang memengaruhi kinerja panel surya adalah sebagai berikut:

1. Intensitas Cahaya Matahari (Iradiasi)

Intensitas cahaya matahari merupakan faktor utama yang menentukan jumlah energi yang dapat dikonversi oleh panel surya. Semakin tinggi intensitas iradiasi yang diterima, maka semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan. Sebaliknya, pada kondisi mendung atau saat matahari terhalang, intensitas akan menurun dan berdampak langsung pada penurunan *output* daya.

2. Suhu Permukaan Panel Surya

Meskipun panel surya membutuhkan cahaya matahari, peningkatan suhu permukaan panel justru dapat menurunkan efisiensi. Suhu tinggi menyebabkan tegangan keluaran menurun, sehingga mengurangi total daya. Oleh karena itu, menjaga suhu dalam rentang optimal sangat penting untuk menjaga efisiensi sistem.

3. Jenis Material Panel Surya

Bahan penyusun sel surya seperti monokristalin, polikristalin, atau thin-film memiliki karakteristik efisiensi yang berbeda. Misalnya, panel monokristalin umumnya memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan dengan jenis lainnya, tetapi juga lebih mahal dalam produksinya.

4. Kondisi Cuaca

Keadaan cuaca seperti berawan, hujan, atau kabut dapat memengaruhi jumlah cahaya matahari yang sampai ke permukaan panel. Hamburan dan penyerapan oleh partikel di atmosfer mengurangi intensitas radiasi, sehingga menurunkan *output* daya.

5. Orientasi dan Sudut Kemiringan Panel

Penempatan panel dengan orientasi dan kemiringan yang sesuai sangat penting untuk mengoptimalkan penyerapan cahaya matahari sepanjang hari. Sudut yang tidak tepat dapat menyebabkan panel tidak menerima intensitas cahaya maksimum, khususnya pada pagi dan sore hari.

6. Bayangan (*Shading*)

Bayangan dari pohon, bangunan, atau objek lainnya dapat secara signifikan menurunkan efisiensi panel. Bahkan sebagian kecil area yang tertutup dapat mengganggu keseluruhan rangkaian sel karena karakteristik kerja panel yang saling terhubung.

7. Kebersihan Permukaan Panel

Debu, kotoran, atau partikel polusi pada permukaan panel dapat menghalangi masuknya cahaya ke dalam sel surya. Pembersihan rutin diperlukan agar permukaan panel tetap optimal dalam menyerap cahaya matahari [7].

2.2.3 Sistem Pendingin Panel Surya dengan Air pada Pipa Tembaga

Efisiensi panel surya dipengaruhi oleh suhu permukaan modul fotovoltaik. Ketika suhu panel meningkat akibat paparan sinar matahari secara terus-menerus, tegangan *output* akan menurun dan berdampak pada penurunan daya *output* secara keseluruhan. Untuk menjaga suhu panel tetap optimal, diperlukan sistem pendinginan yang dapat mengalirkan panas dari permukaan panel ke lingkungan.

Salah satu metode yang digunakan adalah sistem pendinginan aktif berbasis air, di mana air dialirkan melalui pipa tembaga yang ditempatkan di bagian belakang panel surya. Pipa tembaga dipilih karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi, mudah dibentuk, dan tahan terhadap korosi. Dalam rancangan tugas akhir ini, pipa disusun secara zigzag untuk memperluas area kontak antara pipa dan

permukaan panel surya, sehingga proses perpindahan kalor dapat berlangsung secara efisien melalui mekanisme konduksi dan konveksi.

Panel surya yang dilengkapi dengan sistem pendingin berbasis air menggunakan pipa tembaga terbukti mampu menurunkan suhu kerja panel dan meningkatkan tegangan *output*. Penurunan suhu mencapai rata-rata 13–15°C dibandingkan panel tanpa pendingin, dengan peningkatan tegangan sekitar 1,6 V [8]. Pendinginan ini sangat efektif khususnya di wilayah tropis dengan tingkat iradiasi tinggi.

Efektivitas perpindahan panas juga dipengaruhi oleh laju aliran air di dalam pipa. Pada laju aliran yang lebih rendah, air memiliki waktu lebih lama untuk menyerap panas, namun peningkatan suhu panel cenderung lebih tinggi. Sebaliknya, aliran lebih cepat mampu menjaga suhu panel lebih stabil [9].

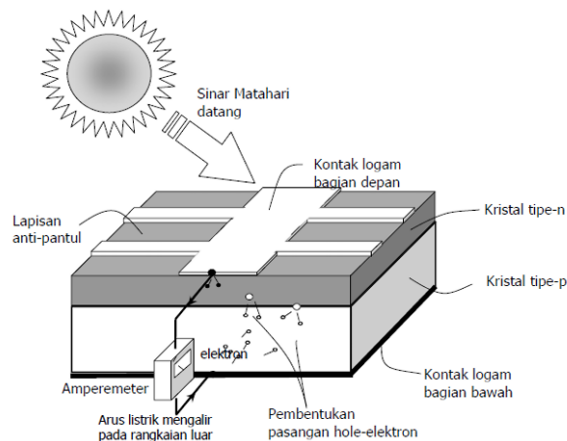
Sistem ini dikendalikan secara otomatis menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor suhu DS18B20. Sensor ini mendeteksi suhu permukaan panel dan mengaktifkan pompa air ketika suhu melebihi batas tertentu. Dengan pengontrolan suhu berbasis IoT, sistem dapat beroperasi secara efisien dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Strategi ini mampu menjaga suhu panel pada kisaran optimal 30–45°C dan mendukung peningkatan daya *output* secara signifikan.

2.2.4 Panel Surya (Solar Panel)

Panel surya merupakan perangkat yang terdiri dari material semikonduktor yang bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaiik, yaitu proses konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Ketika permukaan sel surya menerima cahaya matahari, foton dari cahaya tersebut akan memberikan energinya kepada elektron dalam material semikonduktor. Energi ini mendorong elektron berpindah dan menimbulkan beda potensial, sehingga menghasilkan arus listrik yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi [10].

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah suhu permukaan panel. Peningkatan suhu di atas batas optimal dapat menurunkan efisiensi kerja panel. Berdasarkan penelitian, setiap kenaikan suhu

sebesar 1°C dari suhu kerja standar (25°C) dapat mengurangi daya *output* yang dihasilkan sekitar 0,5%. Oleh karena itu, pengendalian suhu menjadi aspek penting dalam upaya optimalisasi daya keluaran dari panel surya.



Gambar 2. 2 Efek Fotovoltaik Pada Sel Surya

Salah satu parameter penting dalam menilai efisiensi panel surya adalah Fill Factor (FF). Fill Factor menunjukkan seberapa besar efisiensi panel dalam menghasilkan daya listrik dibandingkan dengan kondisi idealnya. Nilai FF dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

FF = Fill Factor

V_{mp} = Tegangan maksimum panel

I_{mp} = Arus maksimum panel

V_{oc} = Tegangan saat kondisi hubung terbuka

I_{sc} = Arus saat kondisi hubung singkat

Efisiensi panel surya secara keseluruhan sangat bergantung pada nilai FF ini, serta pengaruh suhu, intensitas cahaya matahari, dan kondisi pemasangan panel surya di lapangan [10]. Secara umum, terdapat beberapa jenis panel surya yang umum digunakan, yaitu:

1. Panel Surya Monokristalin

Tipe ini terbuat dari satu kristal silikon murni. Panel monokristalin memiliki efisiensi tinggi, yaitu sekitar 15% hingga 20%, dan dikenal memiliki performa baik dalam kondisi penyiaran rendah. Secara fisik, panel ini memiliki sel berwarna hitam pekat dan bentuk sudut potong [11].

2. Panel Surya Polikristalin

Panel ini terbuat dari potongan silikon yang mengandung lebih dari satu kristal (multikristal). Efisiensinya berkisar antara 13% hingga 16%. Secara visual, panel ini memiliki warna biru gelap dengan pola kristal acak. Umumnya lebih ekonomis dibandingkan tipe monokristalin [11].

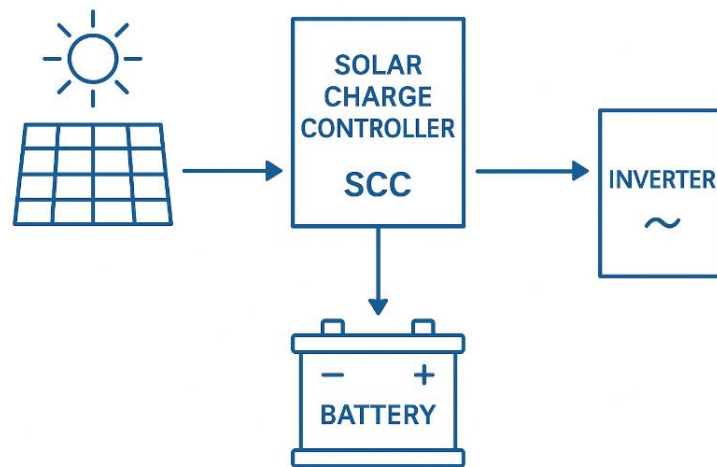
3. Panel Surya Thin-Film (Lapisan Tipis)

Tipe ini menggunakan lapisan tipis bahan semikonduktor seperti amorphous silicon yang disemprotkan ke substrat. Bentuknya tipis, fleksibel, dan ringan, namun memiliki efisiensi relatif lebih rendah, yaitu sekitar 8,5%. Cocok digunakan untuk aplikasi portabel atau permukaan tidak rata [11].

2.2.5 *Solar Charge Controller*

Solar Charge Controller (SCC) adalah perangkat elektronik yang berfungsi sebagai pengatur aliran arus listrik antara panel surya, baterai, dan beban. SCC memiliki peran penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), yaitu untuk mengatur proses pengisian baterai secara aman dan efisien serta mencegah *overcharging* (pengisian berlebih) maupun *overdischarging* (pengosongan berlebih) pada baterai.

Ketika energi dari panel surya disalurkan ke baterai, SCC akan mengatur tegangan dan arus yang masuk agar tidak melebihi kapasitas maksimum baterai. Jika tegangan baterai telah mencapai batas tertentu (misalnya 14,3V), maka SCC akan secara otomatis menghentikan pengisian atau menurunkan arus masuk. Sebaliknya, ketika baterai sudah mulai habis dan tegangan turun, SCC akan kembali mengaktifkan proses pengisian dari panel surya jika sinar matahari tersedia.



Gambar 2. 3 Diagram Rangkaian Panel Surya-SCC-Baterai-Inverter

Fungsi utama SCC mencakup:

1. Mengatur tegangan dan arus dari panel surya ke baterai.
2. Melindungi baterai dari pengisian berlebih (*overcharge*).
3. Mencegah pengosongan baterai secara berlebihan (*overdischarge*).
4. Menyediakan *output* stabil untuk beban (*load*).
5. Meningkatkan efisiensi sistem PLTS secara keseluruhan.

Terdapat dua jenis utama *Solar Charge Controller*, yaitu:

1. PWM (*Pulse Width Modulation*)

Teknologi ini mengatur pengisian baterai dengan cara menurunkan tegangan panel mendekati tegangan baterai dan mengontrol pulsa arus masuk.

2. MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

Teknologi ini bekerja lebih cerdas dengan menyesuaikan impedansi agar daya maksimal dari panel surya dapat diserap dan dialirkan ke baterai, umumnya memiliki efisiensi lebih tinggi dibanding PWM.

2.2.6 Baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*)

Baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*) merupakan jenis baterai yang bersifat tertutup dan memiliki katup pengatur tekanan, dirancang agar gas hasil elektrolisis dapat dikondensasi kembali menjadi cairan. Karakteristik tertutup ini membuat baterai VRLA bebas perawatan (*maintenance-free*) karena tidak

memerlukan penambahan air secara berkala. Baterai jenis ini sangat cocok digunakan dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) karena keamanannya tinggi dan perawatannya rendah [12].

Secara umum, baterai berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik hasil konversi dari cahaya matahari oleh panel surya. Proses penyimpanan dan pelepasan energi ini dilakukan melalui reaksi elektrokimia. Saat proses pengisian (charging), energi listrik diubah menjadi energi kimia, dan sebaliknya saat digunakan (discharging), energi kimia diubah kembali menjadi energi listrik.

Dalam penggunaannya pada sistem PLTS, terdapat beberapa parameter penting yang harus diperhatikan agar baterai dapat bekerja optimal dan berumur panjang:

1. Kapasitas Baterai (Ah)

Kapasitas menunjukkan seberapa banyak muatan listrik yang dapat disimpan dalam satuan Ampere-Hour (Ah). Misalnya, baterai 12V 100Ah dapat menyuplai beban 1A selama 100 jam atau beban 10A selama 10 jam.

2. *Depth of Discharge* (DoD)

Depth of Discharge (DoD) adalah parameter yang menunjukkan seberapa dalam baterai dikosongkan dari kapasitas totalnya. Semakin kecil DoD yang digunakan, semakin lama umur baterai. Umumnya, baterai VRLA direkomendasikan memiliki DoD sekitar 80%, artinya hanya 80% dari total kapasitas baterai yang boleh digunakan, sedangkan 20% sisanya dipertahankan untuk mencegah kerusakan permanen [12].

Pemilihan baterai VRLA dibanding jenis lainnya seperti baterai basah atau lithium-ion didasarkan pada keunggulannya, antara lain:

1. Tertutup rapat dan aman digunakan di dalam ruangan
2. Tidak memerlukan perawatan berkala
3. Memiliki tingkat efisiensi tinggi dalam siklus *charge-discharge*
4. Tidak menimbulkan asap atau uap asam selama operasi normal

2.2.7 Inverter

Inverter merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya, terutama untuk sistem yang memerlukan *output* berupa arus bolak-balik (AC). Fungsi utama inverter adalah mengubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya dan disimpan dalam baterai menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh peralatan rumah tangga atau sistem instalasi listrik standar [11].

Jenis-Jenis Inverter Berdasarkan Bentuk Gelombangnya :

1. *Modified Sine Wave Inverter*

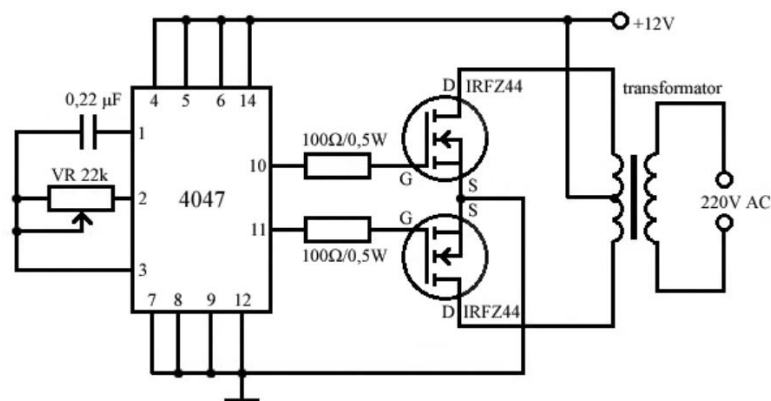
Menghasilkan gelombang listrik yang mendekati bentuk sinus tetapi tidak sepenuhnya mulus. Cocok untuk beban ringan seperti kipas dan lampu LED [13].

2. *Pure Sine Wave Inverter*

Menghasilkan gelombang AC yang halus dan stabil, menyerupai listrik dari PLN. Aman digunakan untuk peralatan elektronik sensitif seperti komputer dan kulkas [13].

3. *Square Wave Inverter*

Menghasilkan gelombang berbentuk kotak. Kurang cocok untuk peralatan elektronik modern karena bisa menimbulkan *noise* dan panas berlebih [13].



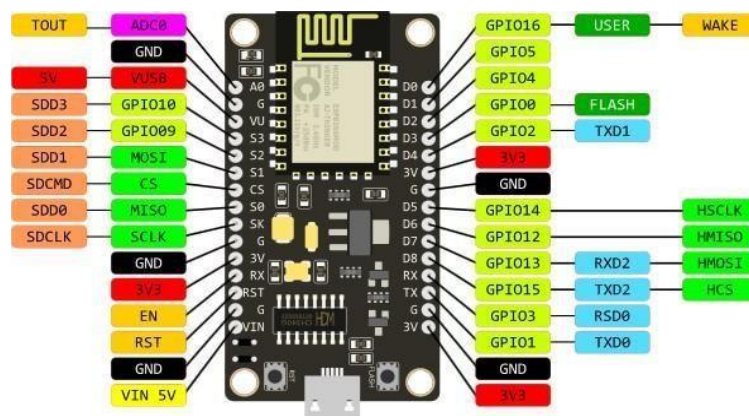
Gambar 2. 4 Rangkaian Inverter DC to AC

2.2.8 Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan dirancang khusus untuk kebutuhan sistem tertanam dan *Internet of Things* (IoT). Mikrokontroler ini memiliki keunggulan dalam hal konektivitas nirkabel, karena telah terintegrasi dengan modul Wi-Fi dan Bluetooth, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, I2C, SPI, dan PWM.

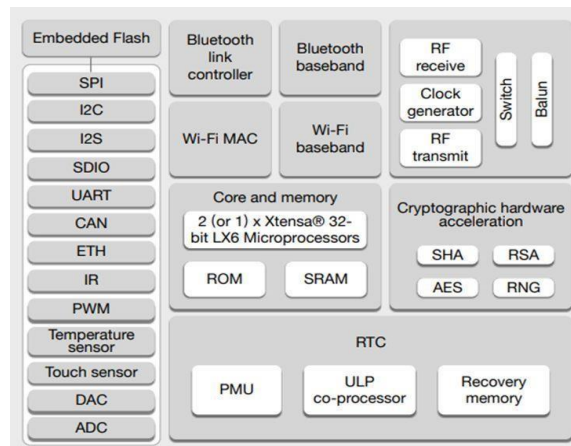
Dilengkapi dengan prosesor dual-core 32-bit Xtensa LX6, ESP32 mampu bekerja secara efisien dan stabil untuk menjalankan berbagai proses secara paralel. Mikrokontroler ini juga memiliki memori internal berupa ROM, SRAM, serta flash memory hingga 4MB, yang memungkinkan penyimpanan kode program dan data dalam jumlah cukup besar.

ESP32 mendukung hingga 36 pin GPIO yang bersifat multifungsi dan dapat dikonfigurasi sebagai input maupun *output* digital, analog, serta komunikasi data. Selain itu, ESP32 mampu melakukan pembacaan sinyal analog melalui ADC 12-bit, serta menghasilkan sinyal analog melalui DAC.



Gambar 2. 5 Pinout ESP32

Salah satu keunggulan penting dari ESP32 adalah kemampuannya menjalankan sistem operasi FreeRTOS, yang memungkinkan pengelolaan multitugas secara efisien dan responsif. Hal ini membuat ESP32 sangat cocok digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kendali otomatis, pemantauan data, dan komunikasi jarak jauh secara *real-time*.



Gambar 2. 6 Diagram Blok ESP32

Dengan kelengkapan fitur dan efisiensi daya yang baik, ESP32 menjadi pilihan umum dalam pengembangan sistem IoT, termasuk pada rancang bangun sistem berbasis panel surya seperti yang dibahas dalam tugas akhir ini [14].

2.2.9 Sensor Suhu

Sensor suhu digital seperti Sensor DS18B20 yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi pengukuran suhu [15]. Sensor ini menggunakan protokol komunikasi *1-Wire*, yang memungkinkan banyak sensor terhubung ke satu pin mikroprosesor atau mikrokontroler. Protokol *1-Wire* adalah sistem bus yang menyediakan komunikasi data melalui satu jalur sinyal. Fitur utama protokol ini meliputi:

1. *Single-master system*
2. Menggunakan *pull-up resistor* tunggal
3. Kemampuan *multi-drop*, memungkinkan banyak perangkat pada satu bus
4. Menggunakan kode CRC untuk integritas data

Sensor DS18B20 berfungsi untuk mengukur suhu lingkungan sekitar dan mengubahnya menjadi data digital melalui proses konversi analog ke digital yang dilakukan secara internal. Komunikasi data antara sensor dan mikrokontroler

4. Kontrol Logika *1-Wire*

Komponen ini bertanggung jawab untuk mengelola komunikasi protokol *1-Wire*, termasuk pengiriman sinyal dan data antara sensor dan mikrokontroler.

5. Regulator Tegangan

Mengatur tegangan internal dari sumber daya eksternal (3V hingga 5.5V).

Sensor DS18B20 memiliki tiga pin yang harus diketahui, karena sangat penting untuk pengoperasian sensor ini dengan benar. Bagian-bagian pin pada sensor DS18B20 dijelaskan sebagai berikut [15] :

1. Pin VCC (Pin 3) dihubungkan ke sumber tegangan positif, biasanya 3.3V atau 5V.
2. Pin GND (Pin 1) dihubungkan ke ground sistem (GND). Ini memastikan bahwa sensor memiliki referensi tegangan yang benar.
3. Pin Data (Pin 2) dihubungkan ke salah satu pin GPIO mikrokontroler. Data dikirim dan diterima melalui jalur ini menggunakan protokol *1-Wire*.
4. Resistor Pull-Up: Pada jalur data, sebuah resistor pull-up $4.7k\Omega$ digunakan yang terhubung antara jalur data dan VCC. Resistor ini penting untuk memastikan bahwa sinyal data tetap stabil dan tinggi saat tidak ada komunikasi.

2.2.10 Sensor Tegangan

Sensor tegangan DC merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur besar tegangan searah (DC) pada suatu sistem kelistrikan. Tegangan yang diukur oleh sensor kemudian dikonversi menjadi sinyal analog yang dapat diterima dan diproses oleh mikrokontroler menggunakan fitur ADC (Analog to Digital Converter). Sensor ini sangat berguna dalam aplikasi pemantauan sistem daya, seperti catu daya DC, baterai, maupun panel surya.

Prinsip kerja sensor tegangan DC secara umum memanfaatkan rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) yang terdiri dari dua buah resistor yang disusun secara seri. Tujuannya adalah untuk menurunkan tegangan input ke tingkat yang

aman dan sesuai dengan batas input ADC mikrokontroler (biasanya maksimal 3.3V pada ESP32 atau 5V pada Arduino) [16].

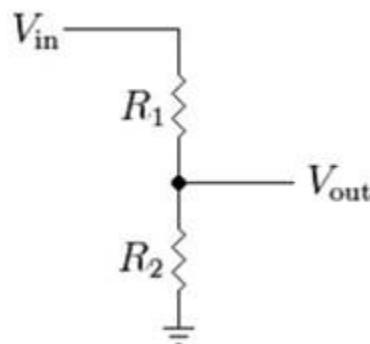
Rumus dasar pembagi tegangan adalah sebagai berikut:

$$V_{out} = V_{in} \times \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

- V_{in} = Tegangan input yang akan diukur
- V_{out} = Tegangan yang masuk ke ADC mikrokontroler
- R_1 dan R_2 = Nilai resistansi resistor pembagi tegangan

Berikut di Gambar 2.8 adalah skema dasar pembagi tegangan untuk mengukur tegangan DC menggunakan dua resistor:



Gambar 2. 8 Rangkaian Pembagi Tegangan

Tegangan V_{in} masuk melalui resistor R_1 , kemudian diturunkan melalui R_2 , dan *output*-nya V_{out} diambil dari titik tengah antara R_1 dan R_2 , lalu dihubungkan ke pin ADC pada mikrokontroler. GND dari rangkaian dihubungkan ke GND mikrokontroler agar pembacaan stabil.

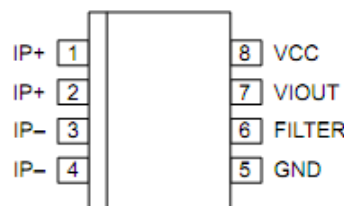
Jenis-jenis Sensor Tegangan DC yaitu ada Modul Sensor Tegangan 0-25V, Pembagi Tegangan Manual, INA219 (Sensor Digital) [17].

2.2.11 Sensor Arus

Sensor arus merupakan suatu komponen elektronik yang digunakan untuk mengukur besarnya arus listrik yang mengalir dalam sebuah rangkaian, baik arus searah (DC) maupun arus bolak-balik (AC). Sensor ini akan menghasilkan keluaran berupa sinyal analog atau digital yang kemudian dapat diolah oleh mikrokontroler maupun sistem monitoring lainnya.

Fungsi utama dari sensor arus adalah sebagai alat pemantau guna mencegah kerusakan akibat arus berlebih yang dapat menimbulkan panas berlebih atau gangguan pada sistem. Oleh karena itu, sensor ini banyak digunakan dalam sistem kelistrikan sebagai bagian dari proteksi maupun pemantauan secara *real-time*.

Pin-out Diagram



Gambar 2. 9 Pin out Sesor Arus

Secara umum, sensor arus bekerja berdasarkan dua metode utama:

1. Efek Hall (Hall Effect)

Sensor arus jenis ini memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik saat mengalir melalui konduktor. Medan magnet tersebut akan dideteksi oleh elemen Hall, kemudian dikonversi menjadi tegangan yang besarnya sebanding dengan nilai arus yang diukur. Tegangan ini selanjutnya menjadi sinyal *output* dari sensor.

2. Resistor Shunt (*Shunt resistor*)

Metode ini menggunakan resistor dengan nilai sangat kecil (resistor shunt) yang dipasang seri dengan beban. Ketika arus mengalir melewati resistor, akan muncul tegangan jatuh (*voltage drop*) yang nilainya proporsional terhadap arus. Nilai arus dapat dihitung menggunakan rumus:

$$I = \frac{V}{R} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

I = Arus Listrik (Ampere)

V = Tegangan pada resistor (Volt)

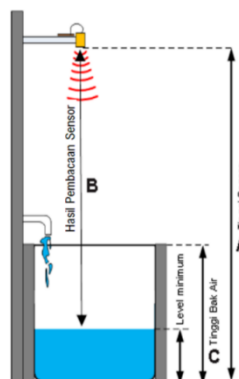
R = Nilai resistansi resistor (Ohm)

Beberapa jenis sensor arus yang umum digunakan antara lain ACS712, INA219, Sensor Shunt Manual, dan Current Transformer (CT).

2.2.12 Sensor Ultrasonik

Sensor ultrasonik merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengukur jarak suatu objek dengan menggunakan gelombang suara berfrekuensi tinggi (di atas ambang pendengaran manusia). Sensor ini bekerja tanpa menyentuh objek secara langsung, sehingga sering dimanfaatkan dalam berbagai sistem otomatisasi, seperti pengukur ketinggian air, sistem parkir otomatis, hingga penghindar rintangan pada robot.

Cara kerja sensor ini didasarkan pada prinsip pantulan gelombang. Sensor akan memancarkan gelombang ultrasonik ke arah depan. Ketika gelombang tersebut mengenai benda, sebagian energinya akan dipantulkan kembali ke sensor. Berdasarkan waktu tempuh gelombang dari sensor ke objek lalu kembali ke sensor, maka jarak objek dapat dihitung.



Gambar 2. 10 Cara Kerja Sensor Ultrasonik [19]

Pada Gambar 2.10 ditampilkan pengukuran ketinggian air dalam wadah dapat dilakukan dengan mengurangi hasil pembacaan sensor dari tinggi tetap sensor

terhadap dasar wadah. Jika tinggi sensor dari dasar wadah dinyatakan sebagai A, dan hasil pembacaan sensor dari permukaan air sebagai B, maka ketinggian air C dapat dihitung dengan rumus [19]:

$$C = A - B \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

A : Ketinggian Tetap Sensor Ultrasonik

B : Hasil Pembacaan Aktual

C : Ketinggian Permukaan Air pada Wadah

2.2.13 LCD 20x4

LCD (Liquid Crystal Display) merupakan komponen elektronika yang berfungsi untuk menampilkan suatu data, dapat berupa karakter, huruf, simbol maupun grafik. Karena ukurannya yang kecil, maka LCD banyak dipasangkan dengan mikrokontroler. LCD tersedia dalam bentuk modul yang mempunyai pin data, kontrol, catu daya, dan pengatur kontras tampilan.

LCD atau *Liquid Crystal Display* pada dasarnya terdiri dari dua bagian utama yaitu bagian *Backlight* (Lampu Latar Belakang) dan bagian *Liquid Crystal* (Kristal Cair). Seperti yang disebutkan sebelumnya, LCD tidak memancarkan pencahayaan apapun, LCD hanya merefleksikan dan mentransmisikan cahaya yang melewatinya. Oleh karena itu, LCD memerlukan *Backlight* atau Cahaya latar belakang untuk sumber cahayanya. Cahaya *Backlight* tersebut pada umumnya adalah berwarna putih. Sedangkan Kristal Cair (*Liquid Crystal*) sendiri adalah cairan organik yang berada diantara dua lembar kaca yang memiliki permukaan transparan yang konduktif. Bagian-bagian LCD atau *Liquid Crystal Display* diantaranya adalah :

1. Lapisan Terpolarisasi 1 (Polarizing Film 1)
2. Elektroda Positif (Positive Electrode)
3. Lapisan Kristal Cair (Liquid Cristal Layer)
4. Elektroda Negatif (Negative Electrode)

5. Lapisan Terpolarisasi 2 (Polarizing film 2)
6. *Backlight* atau Cermin (*Backlight or Mirror*)

Backlight LCD yang berwarna putih akan memberikan pencahayaan pada Kristal Cair atau *Liquid Crystal*. Kristal cair tersebut akan menyaring *backlight* yang diterimanya dan merefleksikannya sesuai dengan sudut yang diinginkan sehingga menghasilkan warna yang dibutuhkan. Sudut Kristal Cair akan berubah apabila diberikan tegangan dengan nilai tertentu. Karena dengan perubahan sudut dan penyaringan cahaya *backlight* pada kristal cair tersebut, cahaya *backlight* yang sebelumnya adalah berwarna putih dapat berubah menjadi berbagai warna.

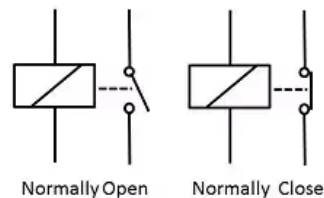
Jika ingin menghasilkan warna putih, maka kristal cair akan dibuka selebar-lebarnya sehingga cahaya *backlight* yang berwarna putih dapat ditampilkan sepenuhnya. Sebaliknya, apabila ingin menampilkan warna hitam, maka kristal cair harus ditutup rapat-rapatnya sehingga tidak ada cahaya *backlight* yang dapat menembus. Dan apabila menginginkan warna lainnya, maka diperlukan pengaturan sudut refleksi kristal cair yang bersangkutan.

2.2.14 Modul Relay

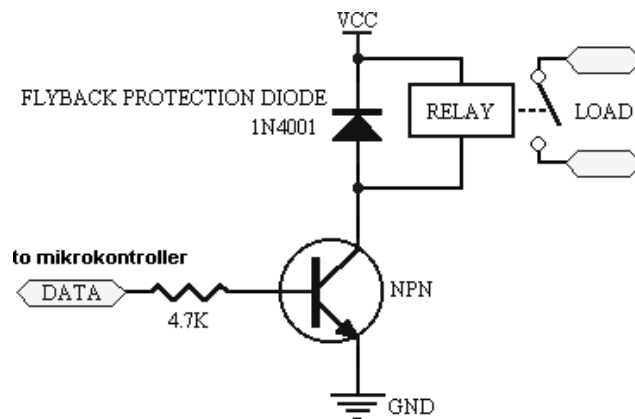
Modul Relay adalah komponen elektronik yang berfungsi sebagai saklar dengan memanfaatkan prinsip elektromagnetik untuk mengontrol aliran listrik. Arus listrik yang mengalir pada kumparan relay akan menghasilkan medan magnet yang menarik kontak mekanis. Pergerakan kontak ini memungkinkan relay menghubungkan atau memutuskan sirkuit listrik sesuai kebutuhan, sehingga memberikan fleksibilitas dalam pengendalian sistem elektronik. Untuk mengaktifkan relay, dibutuhkan arus listrik yang cukup pada kumparan (coil) relay, yang akan menciptakan medan magnet dan menarik kontak saklar untuk menghubungkan atau memutuskan sirkuit utama.

Simbol relay ditunjukkan pada Gambar 2.11. Driver relay berfungsi untuk memperkuat sinyal kontrol dari mikrokontroler sehingga cukup kuat untuk

mengaktifkan relay. Biasanya, driver relay menggunakan transistor atau MOSFET yang dikendalikan oleh sinyal dari mikrokontroler.



Gambar 2. 11 Simbol Relay



Gambar 2. 12 Driver Relay

Driver Relay ditunjukkan pada Gambar 2.12. Rangkaian driver relay ini digunakan untuk mengendalikan beban menggunakan sinyal logika dari mikrokontroler. Karena arus keluaran mikrokontroler tidak cukup besar untuk langsung mengaktifkan relay, maka digunakan sebuah transistor NPN sebagai penguat arus.

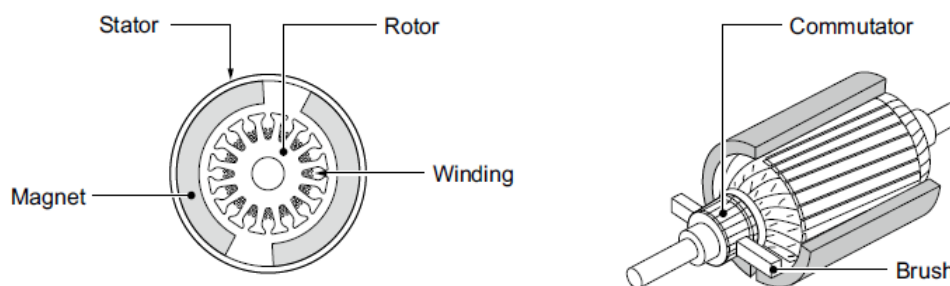
Ketika mikrokontroler memberikan sinyal logika HIGH, arus mengalir melalui resistor 4,7 k Ω menuju basis transistor, yang kemudian mengaktifkan transistor tersebut. Arus selanjutnya mengalir dari VCC melalui kumparan relay dan menuju ke *ground* melalui kolektor-emitor transistor. Arus yang mengalir ini membangkitkan medan magnet pada kumparan, sehingga saklar internal relay berpindah dari posisi NC (*Normally Closed*) ke NO (*Normally Open*), dan beban pun dapat terhubung.

Dioda 1N4001 dipasang paralel terhadap kumparan relay untuk mengalirkan arus balik (*back EMF*) saat relay dimatikan. Hal ini bertujuan untuk melindungi transistor dari lonjakan tegangan yang dapat merusak komponen.

Rangkaian ini memungkinkan mikrokontroler mengendalikan beban berarus besar secara aman dan efisien menggunakan relay sebagai saklar elektronik.

2.2.15 Motor DC Magnet Permanen

Motor DC magnet permanen merupakan salah satu jenis motor arus searah yang menggunakan magnet permanen sebagai medan stator untuk menghasilkan gaya gerak. Berbeda dengan motor DC konvensional yang menggunakan kumparan medan (*field winding*), motor ini memanfaatkan daya magnet dari bahan permanen sebagai sumber medan magnet utamanya. Sementara itu, bagian rotornya tetap berupa kumparan yang dialiri arus listrik. Ketika arus dialirkan ke kumparan rotor, akan terbentuk medan magnet yang kemudian berinteraksi dengan medan dari magnet permanen. Interaksi inilah yang menimbulkan gaya tolak atau tarik, sehingga rotor dapat berputar. Arah putaran motor dapat diubah dengan membalik arah arus pada kumparan.



Gambar 2. 13 Struktur Internal Motor DC Magnet Permanen

Motor DC magnet permanen memiliki beberapa karakteristik yang menjadikannya efisien dan praktis untuk berbagai aplikasi. Karena tidak menggunakan lilitan medan, ukuran motor ini cenderung lebih kecil dan ringan dibandingkan motor DC konvensional. Efisiensinya pun lebih tinggi karena tidak terdapat rugi daya pada kumparan medan, terutama saat digunakan pada beban

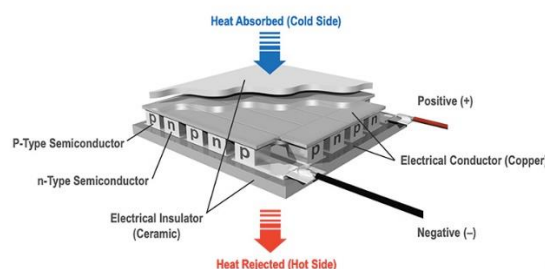
ringan hingga sedang. Selain itu, motor ini memiliki torsi awal yang cukup besar sehingga mampu langsung memutar beban sejak kondisi diam. Umumnya, motor ini beroperasi pada tegangan rendah seperti 6V, 12V, atau 24V DC, sehingga cocok diterapkan pada perangkat elektronik sederhana, mainan, pompa mini, kipas DC, dan sistem otomatisasi kecil lainnya.

2.2.16 Peltier (*Thermoelectric Cooler*)

Peltier merupakan salah satu jenis elemen pendingin yang bekerja berdasarkan prinsip efek termoelektrik, khususnya efek Seebeck. Ketika arus listrik searah dialirkan melalui pasangan material semikonduktor tipe-p dan tipe-n, akan terjadi perpindahan panas dari satu sisi ke sisi lainnya. Akibatnya, satu sisi elemen menjadi dingin karena menyerap kalor dari lingkungan, sementara sisi lainnya menjadi panas karena melepaskan kalor.

Elemen ini tidak memerlukan zat pendingin seperti freon dan tidak memiliki bagian yang bergerak, sehingga lebih ramah lingkungan serta memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Selain itu, bentuknya yang kompak dan fleksibel membuat Peltier mudah diaplikasikan pada berbagai sistem pendingin berskala kecil.

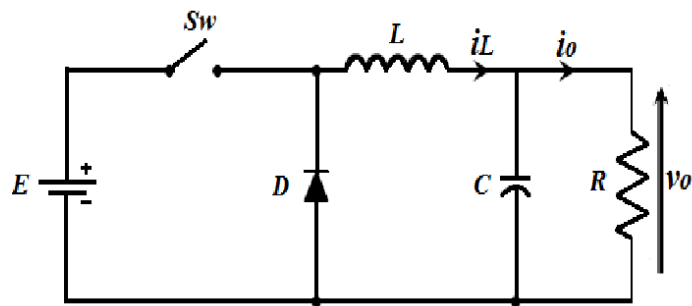
Dalam penggunaannya, elemen Peltier mampu menurunkan suhu secara signifikan dan memberikan respons yang baik terhadap perubahan suhu lingkungan. Kinerja pendinginannya dipengaruhi oleh besar arus listrik yang dialirkan, jenis bahan semikonduktor yang digunakan, serta penanganan panas pada masing-masing sisi elemen [19].



Gambar 2. 14 Struktur Internal *Thermoelectric Cooler*

2.2.17 Buck Converter

Buck converter merupakan salah satu jenis rangkaian konversi DC ke DC yang berfungsi untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan *output* yang lebih rendah, tanpa mengubah sifat arusnya yang searah. Rangkaian ini termasuk dalam kategori *switching regulator*, yaitu rangkaian catu daya yang bekerja dengan prinsip membuka dan menutup jalur arus secara cepat (*switching*) untuk mengatur besar kecilnya tegangan keluaran. Rangkaian *Buck Converter* ditunjukkan pada Gambar 2.15 [20].



Gambar 2. 15 Rangkaian Buck Converter

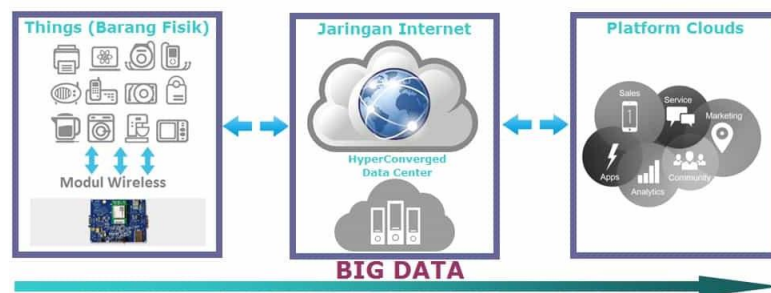
Rangkaian *buck converter* tersusun atas sejumlah komponen utama, yaitu:

1. Saklar Elektronik (Sw) berupa MOSFET, berfungsi sebagai pengendali aliran arus dari sumber ke rangkaian.
2. Dioda (D) berfungsi sebagai jalur alternatif saat saklar dalam kondisi OFF sehingga arus tetap mengalir ke beban melalui induktor.
3. Induktor (L) berfungsi menyimpan energi dalam bentuk medan magnet saat arus mengalir, dan melepaskan energi tersebut secara bertahap ketika saklar *OFF*.
4. Kapasitor (C) berfungsi untuk menyaring tegangan agar tetap stabil dan mengurangi riak (*ripple*) akibat proses *switching* [21].

2.2.18 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) adalah konsep yang mengintegrasikan perangkat fisik dengan sensor dan aktuator agar dapat terhubung ke jaringan internet. Melalui konektivitas ini, perangkat-perangkat tersebut mampu mengumpulkan data, saling berbagi informasi, dan saling mengendalikan. Teknologi komunikasi seperti Bluetooth, Wi-Fi, dan RFID memiliki peran penting dalam proses koneksi antara perangkat dan sistem.

IoT bekerja dengan memanfaatkan algoritma yang mengubah instruksi digital menjadi aksi nyata pada perangkat terkait. Algoritma ini juga memungkinkan perangkat untuk saling berkomunikasi, bertukar data, serta menjalankan fungsi tertentu secara otomatis tanpa intervensi manusia secara terus-menerus. Ilustrasi alur kerja sistem *Internet of Things* dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2. 16 Alur Kerja *Internet of Things*

2.2.19 Blynk

Blynk merupakan *platform Internet of Things* (IoT) yang dirancang untuk memudahkan proses monitoring dan pengendalian perangkat mikrokontroler secara jarak jauh melalui aplikasi berbasis smartphone. Aplikasi ini menyediakan antarmuka grafis (GUI) yang intuitif dan interaktif, yang memungkinkan pengguna untuk memantau data sensor dalam bentuk teks maupun grafik, serta memberikan perintah kontrol secara *real-time*.

Dalam sistem Blynk, aplikasi pada smartphone berfungsi sebagai antarmuka pengguna (user interface), sementara server Blynk bertugas sebagai perantara antara aplikasi dan perangkat fisik, seperti mikrokontroler ESP32. Dengan demikian, komunikasi antara pengguna dan perangkat dapat berlangsung dua arah

secara efisien melalui koneksi internet. Logo resmi dari aplikasi Blynk ditampilkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Logo Aplikasi Blynk

Pada perancangan sistem ini, Blynk digunakan sebagai *platform* utama untuk melakukan pemantauan data suhu, arus, dan tegangan panel surya secara *real-time*. Selain itu, Blynk juga berperan dalam pengendalian sistem pendingin aktif yang terdiri dari pompa air, dan kipas yang bekerja untuk menjaga temperatur panel surya tetap optimal melalui sirkulasi air dalam pipa tembaga.