

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Kajian pustaka terhadap penelitian terdahulu dapat dijadikan sebagai salah satu referensi dalam penyusunan dan pelaksanaan Tugas Akhir ini. Tinjauan pustaka disusun untuk memperkuat penggunaan teoritis serta memahami posisi dan urgensi penelitian yang dilakukan. Selain itu, pembahasan ini juga memberikan gambaran mengenai teknologi yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya, serta potensi inovasi dan pengembangan yang dapat diterapkan pada alat yang dirancang.

Beberapa kajian penelitian terdahulu yang relevan dengan topik sistem pendinginan panel surya yaitu penelitian pertama yang dilakukan oleh Fauzan dkk (2026) yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Pendingin Otomatis Berbasis Sensor Suhu Untuk Optimalisasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya 50 WP” yang diterbitkan oleh Jurnal Listrik Telekomunikasi Elektronika Vol.23 No.1 berisi mengenai perancangan sistem pendingin otomatis dengan menggunakan thermostat digital XH-W3001 yang dikombinasikan dengan sensor NTC Thermistor 3950 10K dan pompa air DC 12V. Sistem ini bekerja secara otomatis dengan mendeteksi suhu panel secara real-time, mengaktifkan pendinginan saat suhu melebihi 35°C, serta menjaga kestabilan di bawah 25°C. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada suhu 35°C, panel menghasilkan tegangan rata-rata 14,40 V, arus 1,50 A, daya 20,95 W, dan efisiensi 10,27%, sedangkan pada suhu 25°C diperoleh tegangan rata-rata 14,52 V, arus 1,66 A, daya 23,82 W, efisiensi 11,25% [4]. Penelitian ini relevan dengan topik penelitian penulis dimana membahas mengenai pengaruh pendinginan pada panel surya untuk mengurangi suhu panel sehingga output pada panel surya meningkat. Namun, pada penelitian ini masih terdapat kekurangan yaitu sistem masih menggunakan metode kontrol ON-OFF sehingga sistem hanya bekerja pada kondisi setting tertentu, selain itu sistem juga belum dilengkapi dengan monitoring jarak jauh.

Selanjutnya, penelitian kedua yang dilakukan oleh Maulana Kamal (2025) yang berjudul “Prototipe Sistem Pendingin Dan Monitoring Panel Surya

Menggunakan Penyiram Air Otomatis Berbasis *Internet Of Things* (IoT)” bertujuan untuk melihat kinerja panel surya dengan sistem pendinginan yang dilengkapi dengan kontrol jarak jauh yang terhubung dengan internet. Pada penelitian ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler, Sensor Termokopel Tipe K+ Maxx6675 sebagai sensor suhu, sensor INA219 sebagai sensor untuk mengukur tegangan dan arus listrik, dan MQTT sebagai kontrol jarak jauh. Cara kerja dari sistem ini yaitu disetting apabila suhu diatas 40°C maka pompa akan menyala hingga suhu berada dibawah 40°C. Selanjutnya data yang diterima ESP32 akan dikirim ke server MQTT. Hasil pengujian panel surya dari pukul 09.00 WIB sampai dengan pukul 15.00 WIB mendapatkan hasil yaitu panel surya dengan menggunakan pendingin memiliki tegangan rata-rata 7,15%, arus rata-rata 4,2% dan daya rata-rata 11,85% lebih besar dibanding tanpa sistem pendingin [5]. Penelitian ini relevan dengan topik penelitian penulis dimana pendinginan panel surya efektif dalam meningkatkan output pada panel surya, selain itu menggunakan monitoring sistem jarak jauh untuk memantau kinerja panel surya. Namun, pada penelitian ini masih terdapat kekurangan yaitu sistem masih menggunakan metode kontrol ON-OFF dan hanya menggunakan satu parameter input saja yaitu suhu sehingga output kontrol sistem kurang presisi dan optimal.

Adapun penelitian ketiga yang dilakukan oleh La Ode Ahmad Barata dkk (2025) yang berjudul “Analisis Pendingin Aktif untuk Meningkatkan Kinerja PV-Panel Surya” membahas pengaruh sistem pendingin aktif berbasis penyiraman air terhadap peningkatan performa panel surya pada kondisi iklim tropis. Sistem pendinginan dirancang menggunakan pompa air yang menyembrotkan air secara periodik setiap 10 menit dari pukul 08.00–16.00 WITA. Penelitian tidak hanya menganalisis temperatur dan daya keluaran panel, tetapi juga mempertimbangkan parameter geometris posisi matahari seperti sudut zenith, altitude, azimuth, dan sudut datang yang mempengaruhi intensitas radiasi matahari pada panel surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pendingin aktif mampu menurunkan temperatur panel hingga 10–17°C, meningkatkan daya keluaran dan efisiensi panel surya sekitar 2–3% dibandingkan panel tanpa pendingin [6]. Penelitian ini relevan dengan topik penelitian penulis bahwa metode pendinginan aktif menggunakan

penyiraman air terbukti efektif meningkatkan kinerja panel surya dan membantu panel bekerja lebih optimal pada kondisi radiasi matahari tinggi. Namun, sistem pendinginan masih menggunakan metode penyiraman periodik tetap, yaitu pompa menyala setiap 10 menit tanpa mempertimbangkan kondisi aktual panel secara adaptif. Akibatnya, penggunaan air dan waktu penyiraman belum tentu optimal karena saat intensitas cahaya rendah atau suhu panel belum terlalu tinggi, pompa tetap bekerja dengan durasi yang sama.

Penelitian keempat yang dilakukan oleh Supriyono dkk (2024) yang berjudul “Optimalisasi Output Photovoltaic Menggunakan Pendingin Air Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung” yang diterbitkan oleh Jurnal Infotekmesin Vol.15 No.01 membahas mengenai menurunnya efisiensi *photovoltaic* akibat suhu permukaan panel yang terlalu tinggi karena paparan sinar matahari, sehingga dikembangkan sistem pendingin aktif menggunakan pompa air untuk mengalirkan air ke permukaan panel surya. Sistem pendingin dibuat dalam dua mode, yaitu mode timer yang bekerja berdasarkan waktu tertentu dan mode sensor yang bekerja otomatis berdasarkan pembacaan suhu menggunakan sensor LM35. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendinginan air mampu meningkatkan output tegangan *photovoltaic*, dimana mode timer memberikan peningkatan rata-rata sebesar 3,79% sedangkan mode sensor meningkatkan tegangan sebesar 1,02% dibandingkan panel tanpa pendingin [7]. Penelitian ini relevan dengan topik penelitian penulis dimana pendinginan panel surya efektif dalam meningkatkan output pada panel surya, selanjutnya pada penelitian sistem pendinginan dengan metode timer lebih unggul sehingga dapat dikatakan bahwa pendinginan dengan penyiraman waktu tertentu dapat menjaga suhu panel surya tetap berada pada kondisi optimal. Namun, pada penelitian tersebut waktu penyiraman masih berdasarkan waktu tetap saja tidak bekerja secara otomatis berdasarkan dari parameter input yang ditetapkan. Selain itu, penelitian tersebut belum mengatur besarnya volume atau debit air pendingin secara dinamis, karena pompa hanya bekerja dalam kondisi ON/OFF biasa.

Berdasarkan kajian jurnal yang telah dibahas, sistem pada penelitian yang sebelumnya, sistem kontrol yang digunakan umumnya masih menerapkan metode

ON-OFF, yaitu sistem hanya beroperasi dalam dua kondisi (menyala atau mati) berdasarkan nilai setpoint suhu yang telah ditentukan. Pendekatan ini memiliki keterbatasan karena tidak mampu mengatur kapasitas kerja aktuator secara bertahap, sehingga aktuator hanya bekerja pada kondisi maksimum atau tidak bekerja sama sekali tanpa adanya kontrol variabel. Dampaknya, respon sistem menjadi kurang halus dan cenderung menimbulkan fluktuasi suhu di sekitar setpoint. Selain itu, sistem pengendalian pendinginan panel surya pada penelitian sebelumnya umumnya hanya menggunakan parameter suhu sebagai variabel input, yang dinilai kurang merepresentasikan kondisi operasional panel secara menyeluruh. Hal ini dikarenakan intensitas cahaya memiliki hubungan langsung dengan energi yang dihasilkan, sementara peningkatan suhu justru menurunkan efisiensi konversi. Oleh sebab itu, penggunaan satu parameter saja belum cukup untuk menggambarkan kondisi kerja panel secara optimal, sehingga diperlukan penambahan parameter intensitas cahaya sebagai variabel input agar sistem pengendalian dapat bekerja lebih adaptif dan optimal.

Berdasarkan analisis kondisi dari penelitian sebelumnya, penelitian ini merancang pendinginan panel surya berbasis logika fuzzy dengan ESP32. Penelitian ini memiliki kesamaan yaitu menggunakan media air sebagai pendinginan karena media ini paling efektif dan cepat dalam proses menurunkan suhu. Air dapat bersentuhan langsung dengan permukaan panel, memungkinkan terjadinya perpindahan panas secara konduksi dan konveksi secara bersamaan, sehingga panas dapat diserap secara lebih optimal dan merata di seluruh permukaan panel [8]. Selain itu, air memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih besar dibandingkan udara, sehingga proses pelepasan panas dari permukaan panel berlangsung lebih cepat dan efisien [8].

Namun, terdapat perbedaan dari penelitian yang sudah ada yaitu pada penelitian ini menggunakan metode fuzzy sebagai kontrol untuk proses pendinginan panel surya. Metode ini dipilih karena mampu menangani sistem yang bersifat *non-linear* dan tidak memiliki model matematis yang pasti. Karakteristik panel surya dipengaruhi oleh banyak variabel yang nilai variabel tersebut berubah secara dinamis dan sulit dimodelkan, sehingga pendekatan konvensional seperti

kontrol ON/OFF menjadi kurang optimal. Dengan menggunakan logika fuzzy, sistem dapat mengambil keputusan berdasarkan aturan linguistik sehingga memungkinkan pengaturan output yang bersifat bertahap (*smooth control*).

Sistem yang dirancang menggunakan parameter input berupa suhu dan intensitas cahaya. Kedua parameter tersebut dipilih karena memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja dan daya keluaran panel surya, di mana peningkatan suhu cenderung menurunkan efisiensi, sedangkan intensitas cahaya berbanding lurus dengan energi yang dihasilkan. Data suhu dan intensitas cahaya yang diperoleh dari sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode logika fuzzy sebagai sistem pengendali. Dalam prosesnya, nilai input yang berupa suhu dan intensitas cahaya akan melalui tahap fuzzifikasi untuk dikategorikan ke dalam himpunan linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi. Selanjutnya, sistem akan menerapkan rule base yang telah dirancang untuk menentukan aksi kontrol yang sesuai. Hasil dari proses inferensi tersebut kemudian didefuzzifikasi untuk menghasilkan output berupa sinyal kontrol yang bersifat kontinu. Output tersebut berupa sinyal kontrol sebagai penentu lama waktu kerja relay. Relay akan mengatur nyala pompa air berdasarkan durasi waktu tertentu, sehingga volume aliran air yang digunakan untuk pendinginan panel surya dapat disesuaikan dengan kondisi aktual suhu dan intensitas cahaya pada panel surya.

Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan monitoring melalui Google *Spreadsheet* yang terintegrasi dengan koneksi internet sehingga memungkinkan pemantauan data secara real-time dan jarak jauh. Data hasil pembacaan akan dikirim dan disimpan secara otomatis ke dalam database berbasis cloud, sehingga pengguna dapat mengakses informasi kapan saja tanpa harus berada di lokasi alat.

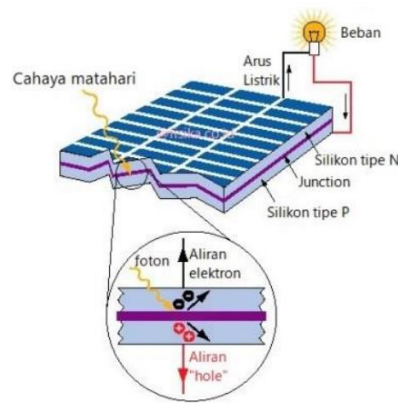
2.2 Dasar Teori

Dasar teori ini memuat uraian teori-teori yang berkaitan dan mendukung topik Tugas Akhir yang dibahas.

2.2.1 Panel Surya (*Photovoltaic*)

Sel surya, unit dasar dari teknologi fotovoltaik, pada dasarnya adalah dioda foto berukuran besar yang mampu menghasilkan energi listrik. Material fotovoltaik

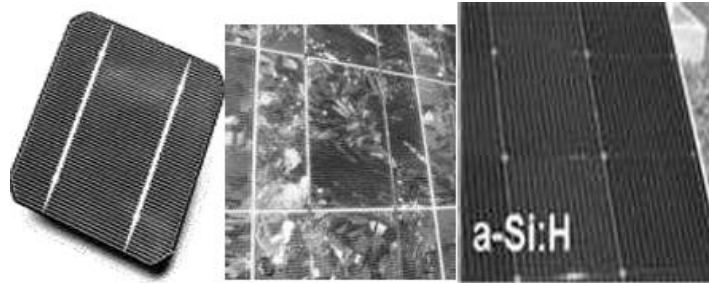
tersusun dari dua jenis bahan yang berbeda, yang terhubung melalui sambungan (*junction*) [9]. Secara sederhana sel surya terdiri dari persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (*p-n junction*) yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran electron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik [10]. Untuk menghasilkan daya yang lebih besar, beberapa sel surya dirangkai bersama dalam sebuah wadah yang disebut modul surya atau panel surya. Proses pengubahan energi matahari menjadi energi listrik ditunjukkan dalam gambar 2.1.



Gambar 2.1 Pengubahan Energi Matahari Menjadi Energi Listrik Panel Surya [10]

Terdapat dua kategori utama modul surya yang umum digunakan, yaitu silikon kristalin dan lapisan tipis (*thin film*). Modul silikon kristalin dibuat dari bahan silikon, sedangkan modul lapisan tipis umumnya menggunakan material kimia. Modul silikon kristalin sendiri terbagi menjadi dua tipe: monokristalin dan polikristalin. Setiap tipe menawarkan tingkat efisiensi yang berbeda; monokristalin berkisar antara 14-16%, sementara polikristalin memiliki efisiensi 13-15%. Modul surya lapisan tipis hadir dalam berbagai varian yang penamaannya didasarkan pada material penyusunnya, seperti A-Si:H, CdTe, dan CIGs (ditampilkan pada Gambar 2.2). Efisiensi rata-rata untuk modul lapisan tipis berada pada rentang 6,5-8%. Akibat perbedaan efisiensi ini, modul dengan kapasitas yang sama akan memiliki ukuran fisik yang berbeda, yang pada akhirnya memengaruhi kebutuhan lahan untuk pemasangan. [9]

Kapasitas modul surya, yang diukur dalam satuan Watt peak (Wp), tersedia dalam berbagai ukuran. Dalam aplikasi pembangkit listrik, ukuran modul yang umum digunakan berkisar antara 80 hingga 300 Wp per modul. Untuk meningkatkan tegangan, modul-modul tersebut dirangkai secara seri, sedangkan untuk meningkatkan arus, modul-modul tersebut disusun secara paralel.



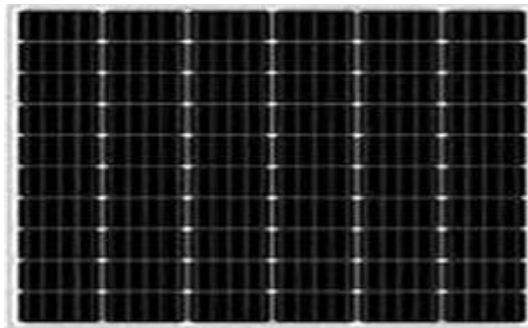
Gambar 2.2 Monokristalin, polikristalin, A-Si:H [9]

Kapasitas panel surya yang dibutuhkan (dinyatakan dalam kWp atau kilowatt peak) ditentukan oleh jumlah energi (kWh atau kilowatt-hour) yang dikonsumsi beban dalam periode waktu tertentu dan intensitas radiasi matahari di lokasi pemasangan. Efisiensi panel surya dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk suhu, kualitas koneksi kabel, efisiensi inverter, kondisi baterai (jika ada), dan lain-lain.

Oleh karena itu, perhitungan kapasitas ideal seringkali disesuaikan dengan faktor derating (penurunan kinerja) yang umumnya bernilai sekitar 0,67 atau 67%. Faktor derating ini mengkompensasi potensi kehilangan daya akibat faktor-faktor yang disebutkan di atas. [9]

Jumlah energi yang ingin diproduksi (E_o , kWh) bergantung pada radiasi matahari di lokasi (H , kWh/m²/hari), iradiasi stPengguna ($I_o = 1$ kW/m²), efisiensi modul (η , %), faktor koreksi suhu (C_f , 1,1 – 1,5), jam puncak matahari (PSH) minimum dan lam periode waktu tertentu, dan efisiensi total sistem (η_{sm} , 0,67 – 0,75) [9]. Modul surya dirangkai secara seri (membentuk string) untuk memperoleh tegangan yang sesuai, dan beberapa string dirangkai paralel untuk meningkatkan daya atau arus. Tegangan string kemudian dicocokkan dengan kebutuhan tegangan input inverter.

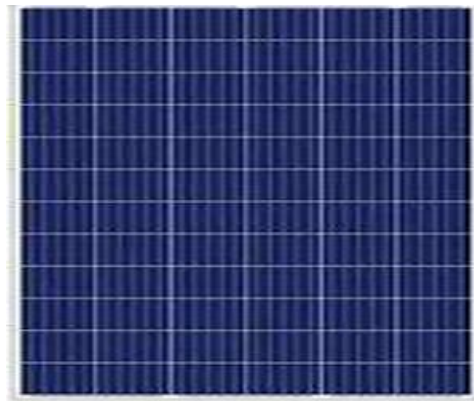
Pemilihan jenis panel surya yang tepat akan sangat berpengaruh terhadap efisiensi, biaya, dan aplikasi penggunaannya, baik untuk kebutuhan rumah tangga, komersial, maupun industri. Panel surya terdiri dari berbagai macam jenis, yang pertama yaitu terdapat tipe monokristalin, tipe panel surya monokristalin merupakan jenis panel paling efisien yang menghasilkan daya listrik persatuan luas yang tinggi. Panel ini memiliki efisiensi sampai dengan 15% [11]. Kelemahan dari panel jenis ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya matahari kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan dan sel surya jenis ini jika disusun membentuk solar modul (panel surya) akan menyisakan banyak ruangan yang kosong karena sel surya seperti ini umumnya berbentuk segi enam atau bulat, tergantung dari bentuk batangan kristal silikonnya [11]. Panel surya monokristalin ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Panel Surya Monokristalin [11]

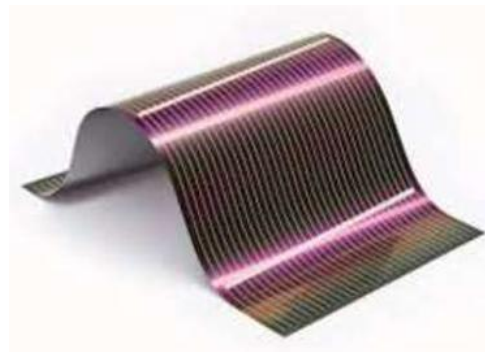
Kemudian tipe kedua terdapat panel polikristalin, panel surya jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur atau dicairkan kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Kemurnian kristal silikonnya tidak sempurna pada sel surya monokristalin, karenanya sel surya yang dihasilkan tidak identik satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, sekitar 10%-12% [11].

Tampilannya nampak seperti ada motif pecahan kaca di dalamnya. Bentuknya yang persegi, jika disusun membentuk panel surya, akan rapat dan tidak akan ada ruangan kosong yang sia-sia seperti susunan pada panel surya monokristalin, karenanya harganya lebih murah. Panel surya polikristalin ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Panel Surya Polikristalin [11]

Selanjutnya terdapat panel surya dengan jenis thin-film, sel surya thin-film (TFPV), sel surya generasi kedua yang ringan dan fleksibel, menggunakan lapisan tipis silikon mikrokristalin dan amorf. Efisiensi modulnya mencapai 8,5%, sehingga membutuhkan area permukaan lebih besar per watt dibandingkan sel kristalin [9]. Konversi energi tetap melalui efek fotovoltaiik.



Gambar 2.5 Panel Surya Thin-Film (TFPV) [9]

Gambar 2.5 merupakan Panel Surya thin-film, Ada beberapa jenis sel surya thin-film yang masing-masing terbuat dari bahan yang berbeda dan mempengaruhi keseluruhan biaya dan efisiensi panel. Namun, semua sel surya thin-film mengandung bahan fotovoltaiik, lembaran konduktif, dan lapisan pelindung.

2.2.2 Teknik Pendinginan Panel Surya

Sistem pendingin adalah suatu sistem yang bekerja menjaga atau menurunkan suhu pada kondisi ideal dengan cara memindahkan panas dari suatu bidang ke air atau udara. Perpindahan panas dasarnya merupakan perpindahan energi dari suatu

tempat yang lain dan ada perbedaan suhu diantara dua bagian benda. Panas akan pindah dari suhu tinggi ke suhu rendah.

Ada berbagai bentuk sistem pendingin mulai dari hembusan udara, media perpindahan (*heatsink*), aliran air, dan pendinginan dengan gabungan dari semua sistem tersebut. Untuk menjaga efisiensi tetap stabil maka panel surya harus didinginkan dengan menjaga suhu panel surya pada kisaran 25°C sampai 35°C , dapat dilakukan berbagai cara yaitu pertama pendinginan berdasarkan permukaan yang didinginkan, terbagi atas posisi depan (*front*) atau posisi belakang (*back*). Untuk posisi depan, dapat dilakukan dengan cara menyemprotkan air setiap waktu tertentu atau air mengalir di bagian permukaan secara terus menerus. Sementara untuk posisi belakang dapat dilakukan dengan cara menyemprotkan kipas bantu atau air dan udara. Selanjutnya, berdasarkan media pendingin dapat dibagi atas media air atau udara. Yang terakhir, berdasarkan sistem pengontrolannya terbagi atas pendinginan aktif dan pasif. Pendinginan pasif dapat terjadi dengan memanfaatkan kondisi alami suatu bahan seperti udara, air atau aluminium tanpa ada pengaturan otomatis dan tidak membutuhkan energi tambahan. Sementara untuk pendinginan aktif dilakukan dengan menambahkan energi lain untuk memaksa terjadinya pendinginan yang lebih cepat seperti menggunakan pompa, kipas angin dan pengontrol lainnya. [11]

Teknik pendinginan pasif pada panel surya dapat dilakukan dengan beberapa metode. Salah satunya yaitu mendinginkan bagian bawah panel menggunakan plat, sirip, atau heatsink aluminium seperti yang dilakukan pada penelitian Widodo dkk. (2015) [11]. Metode ini memanfaatkan aluminium sebagai penghantar panas untuk membantu melepaskan panas dari panel surya ke lingkungan sekitar. Selain itu, pendinginan pasif juga dapat dilakukan dengan mencelupkan bagian bawah panel ke dalam air sebagaimana dilakukan pada penelitian Almanda dkk. (2020) [11]. Air digunakan sebagai media penyerap panas sehingga suhu panel dapat menurun.

Sementara itu, teknik pendinginan aktif pada panel surya dilakukan dengan bantuan sistem tambahan seperti pompa dan kontrol. Salah satu metode yang digunakan adalah mengalirkan lapisan air tipis ke permukaan panel surya. Penyemprotan air dilakukan menggunakan pompa dan sistem kontrol seperti pada

penelitian Loegimin dkk. (2020) [11]. Metode lainnya yaitu mendinginkan bagian bawah panel dengan menambahkan inlet dan outlet air. Air yang berasal dari tangki akan dialirkan secara terus-menerus menggunakan pompa dan sistem kontrol. Namun, metode ini membutuhkan jumlah air yang cukup banyak atau kapasitas tangki yang besar [11].

2.2.3 Pengaruh Volume Air terhadap Kapasitas Pendinginan Panel Surya

Suhu permukaan panel surya merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kinerja dan efisiensi pembangkitan energi listrik. Ketika panel surya menerima radiasi matahari secara terus-menerus, sebagian energi cahaya akan dikonversi menjadi energi listrik, sedangkan sisanya berubah menjadi energi panas yang menyebabkan peningkatan suhu panel [2]. Kenaikan suhu ini dapat menurunkan efisiensi konversi energi listrik sehingga diperlukan metode pendinginan untuk menjaga suhu panel tetap berada pada rentang operasi yang diinginkan.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengurangi suhu panel surya adalah pendinginan menggunakan air. Metode ini bekerja dengan cara mengalirkan atau menyemprotkan air pada permukaan panel sehingga panas yang tersimpan pada panel dapat berpindah ke air melalui proses perpindahan kalor. Besarnya kalor yang dapat diserap oleh air dinyatakan dengan persamaan:

$$Q = mc\Delta T \quad (2.1)$$

Dengan:

- Q = kalor yang diserap air (J)
- m = masa jenis air (kg)
- c = kalor jenis air (4186 J/kg°C)
- ΔT = perubahan suhu air (°C)

Karena massa air berhubungan dengan volume air, maka massa dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$m = \rho V \quad (2.2)$$

Dengan:

- m = masa jenis air (kg)

ρ = massa jenis air (kg/m^3)

V = volume air (m^3)

Jika persamaan massa disubstitusikan ke dalam persamaan kalor, diperoleh:

$$Q = \rho V c \Delta T \quad (2.3)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa jumlah kalor yang dapat diserap air berbanding lurus dengan volume air. Artinya, semakin besar volume air yang digunakan, semakin besar pula kalor yang dapat diserap dari permukaan panel surya. [12]

Namun demikian, peningkatan volume air tidak selalu menghasilkan penurunan suhu yang berbanding lurus. Pada volume tertentu, sebagian besar panas pada permukaan panel telah berhasil diserap sehingga penambahan volume air berikutnya hanya memberikan penurunan suhu yang relatif kecil. Kondisi ini dikenal sebagai titik kejenuhan pendinginan (*cooling saturation point*), yaitu keadaan ketika tambahan air yang diberikan tidak lagi menghasilkan penurunan suhu yang signifikan dibandingkan konsumsi air yang digunakan [12].

Dalam penerapan sistem pendingin berbasis logika fuzzy, volume air dapat diatur sesuai kondisi suhu panel dan intensitas cahaya yang diterima panel. Saat suhu panel meningkat dan intensitas cahaya tinggi, sistem dapat memberikan volume air yang lebih besar untuk meningkatkan laju pelepasan panas. Sebaliknya, ketika suhu panel masih berada pada rentang normal, volume air yang dikeluarkan dapat dikurangi guna menghemat penggunaan air tanpa mengurangi efektivitas pendinginan.

2.2.4 Metode Logika Fuzzy

Logika fuzzy merupakan suatu metode pengambilan keputusan yang dikembangkan untuk menangani ketidakpastian dan ketidakjelasan dalam suatu sistem. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 sebagai pengembangan dari logika klasik (*crisp logic*) yang hanya mengenal dua kondisi tegas, yaitu benar (1) dan salah (0) [13]. Logika fuzzy memungkinkan suatu variabel memiliki derajat keanggotaan tertentu pada beberapa himpunan sekaligus sehingga berbeda dengan logika tegas yang hanya mengenal kondisi benar atau

salah [13]. Logika Fuzzy memungkinkan suatu nilai memiliki derajat keanggotaan dalam rentang 0 hingga 1, sehingga mampu merepresentasikan kondisi yang bersifat samar atau tidak pasti seperti “dingin”, “hangat”, atau “panas”.

Dalam implementasinya, sistem logika fuzzy terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Fuzzifikasi merupakan proses mengubah input himpunan tegas (*crisp*) menjadi nilai linguistik berdasarkan derajat keanggotaan tertentu. Selanjutnya, proses inferensi dilakukan dengan menggunakan aturan berbasis aturan linguistik IF-THEN (*rule base*) untuk menentukan aksi yang sesuai terhadap kondisi input. Tahap terakhir adalah defuzzifikasi, yaitu proses mengubah hasil inferensi yang masih berbentuk nilai fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang dapat digunakan sebagai sinyal kontrol pada sistem. Metode ini banyak digunakan pada sistem kendali karena mampu memberikan respon yang lebih fleksibel, adaptif, dan mendekati cara berpikir manusia dibandingkan metode kontrol konvensional. [13][14]

Penggunaan logika fuzzy dalam sistem kontrol memiliki beberapa keunggulan, antara lain tidak memerlukan model matematis yang kompleks, mampu menangani sistem *non-linear*, serta dapat bekerja dengan baik pada kondisi yang berubah-ubah. Oleh karena itu, logika fuzzy banyak diterapkan dalam berbagai bidang teknik, termasuk pada sistem kontrol suhu, otomasi industri, serta sistem energi terbarukan seperti panel surya.

2.2.3.1 Fuzzy Inference System Metode Mamdani

Metode Fuzzy Mamdani merupakan salah satu bagian dari *Fuzzy Inference System* yang berguna untuk penarikan kesimpulan atau suatu keputusan terbaik dalam permasalahan yang tidak pasti. Metode Fuzzy Mamdani diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975 [15]. Perbedaan metode fuzzy Mamdani dengan metode lainnya yaitu pada output yang dihasilkan, presisi komposisi aturan, serta proses defuzzifikasinya. Metode fuzzy Mamdani menghasilkan output berupa suatu nilai pada domain himpunan fuzzy yang dikategorikan ke dalam komponen linguistik. Selain itu pada proses defuzzifikasi, metode fuzzy Mamdani menggunakan metode *Centroid* dimana proses tersebut berguna untuk mengetahui

nilai output dari pusat daerah fuzzy [15]. Selain itu, Metode Fuzzy Mamdani lebih memperhatikan kondisi setiap daerah fuzzynya, sehingga menghasilkan hasil yang lebih akurat.

Pada sistem ini, metode *Fuzzy Inference System* (FIS) Mamdani digunakan sebagai metode pengambilan keputusan pada sistem pendinginan panel surya. Metode ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu fuzzifikasi, aplikasi fungsi implikasi, komposisi aturan, dan defuzzifikasi. Pada tahap fuzzifikasi, variabel input pada sistem diperoleh dari pembacaan sensor suhu DS18B20 dan sensor intensitas cahaya BH1750 yang berfungsi untuk memantau kondisi panel surya secara real-time. Nilai suhu yang diperoleh dari sensor DS18B20 kemudian dipetakan ke dalam 4 himpunan fuzzy dimana merepresentasikan tingkat temperatur panel surya. Sementara itu, nilai intensitas cahaya yang diperoleh dari sensor BH1750 dipetakan ke dalam 2 himpunan fuzzy yang menggambarkan tingkat penyinaran matahari yang diterima oleh permukaan panel surya. Adapun variabel keluaran berupa volume air pendinginan yang dibagi menjadi 4 himpunan fuzzy. Masing-masing himpunan fuzzy memiliki nilai derajat keanggotaan (*membership function*) yang dirancang sesuai dengan karakteristik dan rentang kerja sistem. Dengan pendekatan ini, metode Fuzzy Mamdani mampu merepresentasikan hubungan antara suhu panel surya dan intensitas cahaya dalam bentuk aturan linguistik.

Selanjutnya, nilai derajat keanggotaan dari masing-masing variabel input masuk ke dalam proses inferensi dimana pada proses ini terbagi menjadi 2 bagian. Pertama, fungsi implikasi dimana fungsi ini berguna untuk mengetahui hubungan antara premis-premis dan konklusinya. Bentuk dari fungsi implikasi ini adalah dengan pernyataan IF x is A THEN y is B , dengan x dan y adalah skalar, serta A dan B adalah himpunan fuzzy [15]. Proposisi atau aturan fuzzy ini dapat diperluas dengan menggunakan penghubung fuzzy AND (interseksi). Suatu proposisi ini digunakan untuk pembentukan keputusan atau menghasilkan output dari proposisi yang telah ditentukan. Setelah terbentuknya proposisi, selanjutnya adalah menentukan nilai keanggotaan berdasarkan aturan fuzzy yang telah dibentuk menggunakan fungsi implikasi Min. Pada fungsi implikasi Min, digunakan operator AND (interseksi) untuk menentukan nilai *firing strength* dari setiap aturan yang

aktif. Nilai keanggotaan sebagai hasil dari operasi dua himpunan atau lebih pada fungsi implikasi Min didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\alpha - predikat_i &= \mu_{A_1[x_1] \cap \dots \cap A_n[x_n]} \\ &= \min(\mu_{A_1}[x_1], \dots, \mu_{A_n}[x_n])\end{aligned}\quad (2.4)$$

dimana, i adalah aturan fuzzy ke- i .

Selanjutnya, tahap kedua pada bagian inferensi yaitu komposisi aturan. Tahap ini yaitu suatu prosedur dengan tujuan untuk menentukan inferensi dari kumpulan dan korelasi antar aturan menggunakan Metode Max dengan kata lain hasil dari seluruh aturan digabungkan melalui proses komposisi aturan menggunakan operator Max untuk membentuk himpunan fuzzy keluaran. Solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah fuzzy dan mengaplikasikannya ke dalam output (keputusan akhir) dengan menggunakan operator OR (union) [15]. Apabila semua proposisi telah dievaluasi, maka output akan berisi suatu himpunan fuzzy yang merefleksikan kontribusi dari setiap proposisi. Proses penggabungan fungsi keanggotaan dengan menggunakan Metode Max dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$\mu_{sf}(x_i) = \max(\mu_{sf}(x_i), \mu_{kf}(x_i)) \quad (2.5)$$

dengan $\mu_{sf}(x_i)$ menyatakan nilai keanggotaan solusi fuzzy sampai aturan ke- i , $\mu_{kf}(x_i)$ menyatakan nilai keanggotaan konsekuensi fuzzy aturan ke- i .

Tahap terakhir adalah proses defuzzifikasi menggunakan metode *centroid* untuk mengubah keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp output*) berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan. Proses defuzzifikasi ini perlu dilakukan, karena keputusan fuzzy atau output adalah tetap variabel linguistik dan variabel linguistik ini membutuhkan untuk dikonversi ke dalam variabel crisp. Prosedur defuzzifikasi dengan menggunakan Metode *Centroid* (titik pusat), yaitu menentukan *moment* (integral dari masing-masing fungsi keanggotaan dari komposisi aturan), menentukan luas, dan menentukan titik pusat [15]. Proses dalam menentukan titik pusat daerah fuzzy dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$Z^* = \frac{\int_z \mu(z)z dz}{\int_z \mu(z) dz} \quad (2.6)$$

dengan menyatakan nilai hasil defuzzifikasi/titik pusat daerah fuzzy, $\mu(z)$ menyatakan nilai keanggotaan, dan $\int_z \mu(z) dz$ menyatakan momen untuk semua daerah hasil komposisi aturan. Luas untuk setiap daerah hasil komposisi aturan dapat diperoleh dengan cara mencari luas berdasarkan bentuk dari masing-masing daerah hasil komposisi aturannya.

2.2.5 Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems sebagai penerus dari mikrokontroler ESP8266. Mikrokontroler ini tidak hanya memiliki kemampuan pemrosesan yang baik, tetapi juga dilengkapi fitur konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth sehingga sangat mendukung pembuatan aplikasi Internet of Things (IoT).

Modul ESP32-WROOM-32 dilengkapi dengan mikroprosesor Xtensa dual-core 32-bit LX6 yang mampu beroperasi hingga frekuensi 240 MHz. Modul ini memiliki memori SRAM sebesar 520 kB dan flash memori berkapasitas 4 MB. Untuk konektivitas nirkabel, modul ini mendukung WiFi 802.11 serta Bluetooth versi 4.2 dengan kemampuan Bluetooth Low Energy (BLE). Modul ini menyediakan 48 pin GPIO yang dapat digunakan sebagai input atau output, termasuk 15 kanal ADC (Analog to Digital Converter), 25 kanal PWM (Pulse Width Modulation), dan 2 kanal DAC (Digital to Analog Converter) untuk berbagai aplikasi pengendalian perangkat elektronik. [9]



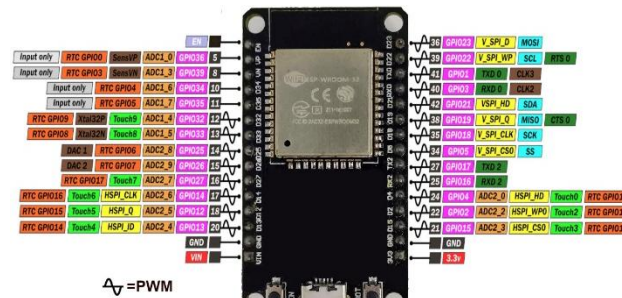
Gambar 2.6 ESP32 [9]

Pada gambar 2.6 merupakan ESP32, ESP32 merupakan papan pengembangan yang mengintegrasikan modul ESP32 WROOM-32 dengan komponen pendukung seperti regulator tegangan, konektor USB, dan pin header yang memudahkan akses ke berbagai fungsi mikrokontroler. Pada tabel 2.1 merupakan spesifikasi utama ESP32 yang merangkum fitur-fitur penting dari board ini.

Tabel 2.1 Spesifikasi ESP32 [9]

Spesifikasi ESP32	
Mikrokontroler	Tensilica 32-bit Single /Dual-core CPU Xtensa LX6
Memory	520 KiB SRAM
Digital input-output (DIO) pins	25
Analog Input (ADC) pins	6
Analog Output (DAC) Pins	2
UARTs	3
SPIs	2
I2Cs: 3	3
Flash Memory	4 MB
Clock Speed	240 Mhz
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n/e/
Dimensions	51.5x29x5mm

Setelah memahami spesifikasi ESP32 yang menjelaskan fitur utama dan kemampuan hardware, perlu dilakukan pembahasan mengenai pinout board tersebut. Pinout memberikan informasi detail tentang fungsi dan posisi setiap pin pada board, sehingga memudahkan dalam pengkabelan dan pemrograman perangkat eksternal. Dengan demikian, pemahaman pinout menjadi langkah penting untuk mengoptimalkan penggunaan ESP32 sesuai dengan spesifikasi yang telah dijelaskan.



Gambar 2.7 Pinout ESP32 [9]

Gambar 2.7 merupakan pinout ESP32 yang memperlihatkan tata letak fisik dan posisi pin pada board, langkah berikutnya adalah menguraikan tabel pinout secara rinci. Tabel ini memuat informasi fungsi setiap pin, seperti GPIO, power, ground, dan antarmuka komunikasi, sehingga memudahkan dalam identifikasi dan pemanfaatan pin sesuai kebutuhan aplikasi. Dengan adanya tabel pinout, pemahaman terhadap konfigurasi pin menjadi lebih sistematis dan terstruktur, table pin out dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Pinout ESP32 [9]

Jenis Pin	Fungsi Utama	Kegunaan	Keterangan
GPIO (<i>General Purpose Input Output</i>)	Input/Output Digital	Membaca sinyal digital dari sensor, mengendalikan aktuator seperti LED, relay, dll.	Dapat dikonfigurasi sebagai input atau output
ADC (<i>Analog to Digital Converter</i>)	Konversi sinyal analog ke digital	Membaca nilai sensor analog seperti sensor suhu, cahaya, potensiometer	ESP32 memiliki 12-bit ADC, beberapa pin mendukung ADC
DAC (<i>Digital to Analog Converter</i>)	Konversi sinyal digital ke analog	Menghasilkan sinyal analog seperti output	Tersedia pada beberapa pin tertentu

Jenis Pin	Fungsi Utama	Kegunaan	Keterangan
		audio atau kontrol motor	
PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	Menghasilkan sinyal PWM	Mengontrol kecepatan motor, intensitas LED, dan perangkat yang memerlukan sinyal PWM	Pin GPIO dapat digunakan untuk PWM
UART (<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>)	Komunikasi serial	Menghubungkan ESP32 dengan perangkat serial seperti modul GPS, Bluetooth, atau komputer	Biasanya menggunakan pin khusus RX dan TX
I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)	Komunikasi data dua arah dengan beberapa perangkat	Menghubungkan sensor, display, dan modul lain secara bersamaan menggunakan dua kabel SDA, SCL	Pin khusus SDA dan SCL
SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)	Komunikasi serial cepat	Menghubungkan perangkat dengan kecepatan tinggi seperti memori eksternal, display TFT	Pin khusus MOSI, MISO, SCK
Strapping Pins	Menentukan mode booting ESP32	Mengatur mode booting seperti	Harus diperhatikan saat desain hardware

Jenis Pin	Fungsi Utama	Kegunaan	Keterangan
		flash mode atau download mode	

Pada penelitian ini, ESP32 berperan sebagai pusat kendali utama yang mengatur seluruh kerja sistem pendinginan panel surya. ESP32 digunakan untuk menerima data hasil pembacaan sensor, mengolah data menggunakan metode logika fuzzy, menentukan aksi output sistem, serta mengendalikan aktuator secara otomatis sesuai kondisi panel surya. Selain itu, ESP32 juga berfungsi sebagai modul Internet of Things (IoT) yang mengirimkan data monitoring ke google *Spreadsheet* secara real-time melalui koneksi Wi-Fi. Dengan kemampuan tersebut, ESP32 mampu mengintegrasikan fungsi kontrol dan monitoring dalam satu perangkat sehingga sistem menjadi lebih sederhana, responsif, dan efisien.

2.2.4.1 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan perangkat lunak open-source yang digunakan untuk menulis, mengedit, mengunggah, dan memantau kode program (sketch) yang akan dijalankan oleh mikrokontroler berbasis Arduino. Lingkungan pengembangan ini dirancang untuk memudahkan pengguna dari berbagai latar belakang, baik pemula maupun profesional, dalam membangun berbagai proyek elektronika dan IoT (*Internet of Things*). [9]



Gambar 2.8 Tampilan Arduino IDE [9]

Gambar 2.8 merupakan tampilan dari software Arduino IDE, Tampilan Arduino IDE terdiri dari menu bar untuk pengelolaan file dan pengaturan, toolbar

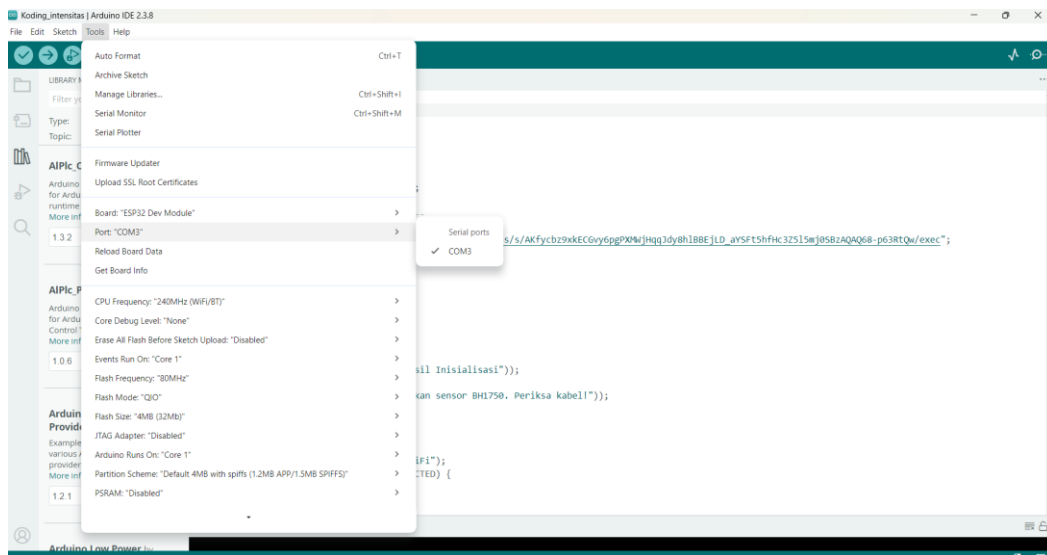
dengan tombol kompilasi dan upload, serta editor kode untuk penulisan program. Konsol log menampilkan hasil kompilasi dan pesan *error*, sementara serial monitor berfungsi sebagai antarmuka komunikasi data antara komputer dan board. Status bar memberikan informasi tentang board dan port yang digunakan. Keseluruhan fitur ini memudahkan proses pengembangan dan debugging program secara efektif. Arduino IDE mendukung berbagai jenis papan (board) Arduino, seperti Arduino Uno, Mega, Nano, dan lainnya. IDE ini menggunakan bahasa pemrograman yang berdasarkan bahasa C/C++, namun telah disederhanakan agar lebih mudah dipahami.

Setelah memahami antarmuka dan fitur utama pada Arduino IDE, tahap berikutnya adalah mempelajari prosedur penggunaan perangkat lunak ini secara praktis. Proses penggunaan dimulai dengan menghubungkan board mikrokontroler ke komputer menggunakan kabel USB, seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Mikrokontroler ke port USB

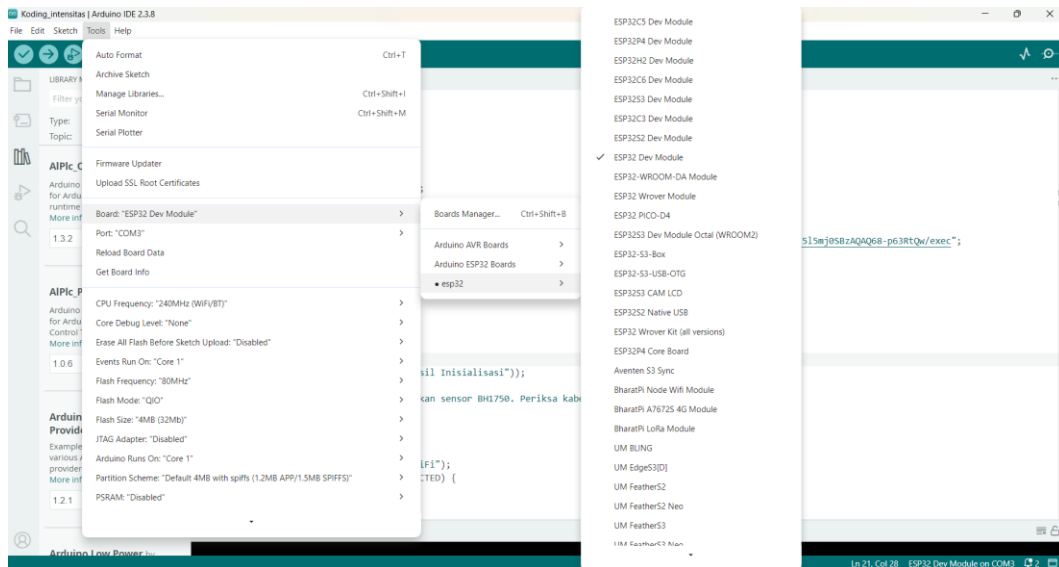
Untuk memastikan mikrokontroler sudah terdeteksi komputer, buka menu **Tools > Port** di Arduino IDE. Jika terhubung dengan benar, akan muncul port seperti **COM3** pada gambar 2.10. (nomor port bisa berbeda tiap komputer). Biasanya, driver sudah terinstal otomatis saat memasang Arduino IDE. Jika port tidak muncul, cek kabel USB atau instalasi driver.



Gambar 2.10 Port Mikrokontroler

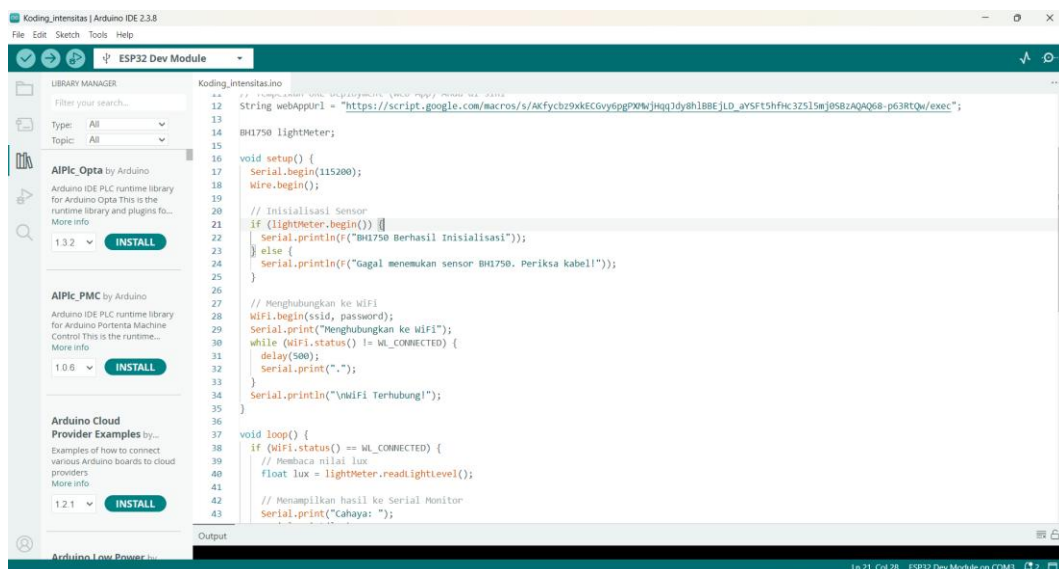
Langkah selanjutnya adalah memilih jenis board atau mikrokontroler yang akan digunakan pada Arduino IDE. Hal ini penting karena Arduino IDE mendukung berbagai jenis mikrokontroler, sehingga pemilihan board yang sesuai dengan perangkat yang akan diprogram diperlukan agar proses kompilasi dan pengunggahan berjalan dengan benar. Untuk mikrokontroler ESP32, pengguna dapat memilihnya melalui menu Tools > Board > ESP32 Arduino Boards. Dengan melakukan pengaturan ini, Arduino IDE akan menyesuaikan konfigurasi dan pustaka yang diperlukan untuk pemrograman ESP32 secara optimal, Seperti gambar 2.11.

Setelah melakukan pengaturan board dan port, langkah berikutnya adalah menulis kode program pada editor di Arduino IDE. Sebelum mulai menulis kode di Arduino IDE, pastikan library yang dibutuhkan sudah terpasang. Library ini berisi fungsi-fungsi tambahan yang memudahkan pemrograman perangkat seperti ESP32. Kamu bisa menambahkan library melalui menu Sketch > Include Library > Manage Libraries, lalu cari dan pasang library yang sesuai dengan kebutuhan proyek.



Gambar 2.11 Pemilihan Mikrokontroler

Selanjutnya pada tahap ini, pengguna membuat instruksi sesuai dengan fungsi yang diinginkan, mulai dari pengaturan awal di fungsi Setup() hingga logika utama di fungsi loop(). Penulisan kode harus dilakukan dengan cermat agar tidak terjadi kesalahan saat kompilasi dan pengunggahan. Dengan menulis kode secara terstruktur, mikrokontroler ESP32 dapat menjalankan berbagai aplikasi sesuai kebutuhan proyek, penulisan kode di Arduino IDE seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Proses Kode di Arduino IDE

Setelah menulis program selesai, langkah berikutnya adalah mengunggah kode ke board ESP32 dengan cara mengklik tombol Upload pada toolbar Arduino IDE, yang ditPenggunai dengan ikon panah ke kanan (posisi kedua dari kiri) seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Upload Program di Arduino IDE

Setelah tombol ditekan, tunggu hingga proses upload selesai. Pada beberapa board ESP32, saat muncul pesan "Connecting..." di bagian bawah, pengguna perlu menekan dan menahan tombol BOOT pada board hingga proses upload berjalan dan muncul pesan "Done uploading". Proses ini memastikan program berhasil ditransfer dan siap dijalankan pada mikrokontroler, seperti pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Program Berhasil di Upload Arduine IDE

2.2.6 Sensor Suhu DS18B20

Sensor suhu DS18B20 adalah sebuah sensor suhu digital *one wire* atau hanya membutuhkan 1 pin jalur data komunikasi. Setiap sensor DS18B20 memiliki nomor seri 64-bit yang unik yang berarti kita dapat menggunakan banyak sensor pada bus daya yang sama (banyak sensor terhubung ke GPIO yang sama). Sensor ini memiliki keluaran digital sehingga tidak membutuhkan rangkaian ADC, tingkat keakurasian serta kecepatan dalam mengukur suhu memiliki kestabilan yang lebih baik dari sensor suhu lainnya. DS18B20 menyediakan 9 hingga 12-bit hasil pembacaan. Jumlah bit tersebut dapat di konfigurasi. Hasil pembacaan dikirim ke atau dari DS18B20 melalui antar muka *one wire*. Tegangan ideal yang keluar dari sensor DS18B20 mempunyai perbandingan 100°C setara dengan 1 volt. [11][9]

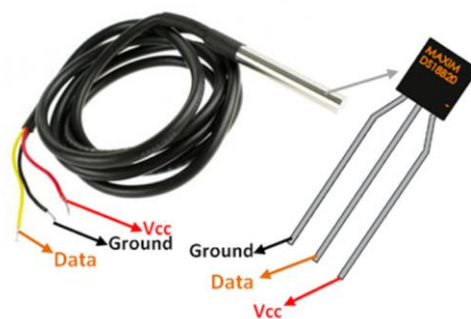
Spesifikasi lengkap dari sensor DS18B20 dapat dilihat pada tabel 2.3 dimana pada tabel tersebut memuat detail teknis sensor seperti jenis sensor, tegangan

operasi, rentang suhu, dan fitur lainnya. Dengan merujuk pada tabel ini, pembaca dapat memahami karakteristik sensor secara lengkap sebagai dasar untuk implementasi dalam rangkaian yang telah dijelaskan pada blok diagram.

Tabel 2.3 Spesifikasi Sensor DS18B20[16]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Nama Chip	DS18B20
2.	Protokol Komunikasi	<i>One wire communication</i>
3.	Tegangan Operasi	3.0 V – 5.5 V
4.	Rentang Pengukuran Suhu	-55°C hingga +125°C
5.	Akurasi Sensor	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
6.	Resolusi Output	9-bit hingga 12-bit
7.	Waktu Konversi Data	Konversi suhu 12-bit dalam waktu kurang dari 750 ms

Setelah menjelaskan spesifikasi sensor DS18B20 pada tabel sebelumnya, selanjutnya perlu dipahami pinout sensor DS18B20.



Gambar 2.15 Pinout Sensor DS18B20 [11]

Gambar 2.8 merupakan pinout sensor suhu DS18B20 yang memperlihatkan tata letak fisik dan posisi pin pada board, langkah berikutnya adalah menguraikan tabel pinout secara rinci. Tabel ini memuat informasi fungsi setiap pin, seperti GND, Data, dan VCC, sehingga memudahkan dalam identifikasi dan pemanfaatan

pin sesuai kebutuhan aplikasi. Dengan adanya tabel pinout, pemahaman terhadap konfigurasi pin menjadi lebih sistematis dan terstruktur, tabel pin out dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Pinout Sensor DS18B20[16]

Nama Pin	Fungsi Utama
GND	Ground, terhubung ke ground sistem
Data	Jalur yang digunakan untuk mengirim data dari sensor ke mikrokontroller. Memerlukan resistor pull-up 4,7k Ω ke VDD.
VCC	Pin untuk supply sensor. Tegangan yang diterima oleh sensor harus berada pada rentang 3.3v – 5v.

Pada penelitian ini, sensor suhu DS18B20 digunakan untuk mendeteksi dan mengukur suhu pada panel surya secara real-time. Data suhu yang diperoleh sensor kemudian dikirimkan ke ESP32 untuk diproses sebagai parameter input dalam sistem kontrol pendinginan berbasis logika fuzzy. Selain itu, nilai data yang didapat dari pengukuran akan ditampilkan pada LCD serta dikirim google *Spreadsheet* untuk monitoring secara real-time. Suhu dipilih sebagai parameter input karena temperatur panel surya memiliki pengaruh langsung terhadap kinerja dan efisiensi panel surya, dimana peningkatan suhu dapat menyebabkan penurunan efisiensi dan daya keluaran panel surya [2]. Oleh karena itu, pengukuran suhu diperlukan untuk mengetahui kondisi kerja panel surya secara aktual sehingga sistem pendinginan dapat bekerja secara otomatis dan lebih optimal dalam menjaga temperatur panel tetap berada pada kondisi kerja yang baik.

2.2.7 Sensor Intensitas Cahaya BH1750

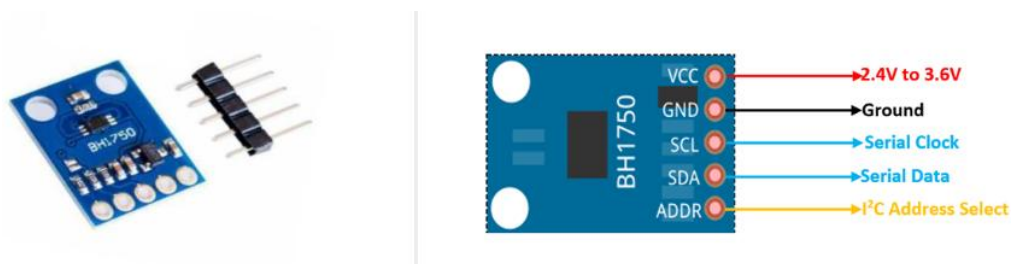
Sensor BH1750 adalah sensor cahaya digital dengan antarmuka bus I2C sehingga dapat dengan mudah dihubungkan dengan mikrokontroler. Dibandingkan dengan sensor cahaya lain seperti LDR (Light Dependent Resistor), BH1750 memiliki keunggulan dalam hal akurasi, linearitas, dan respons yang lebih stabil terhadap perubahan cahaya. IC ini paling cocok untuk mendapatkan data cahaya ambien. Sensor ini dapat mendeteksi dengan rentang lebar pada resolusi tinggi sekitar 16-bit [17]. BH1750 ini menghasilkan pengukuran luminositas dalam lux.

Lux adalah satuan yang tingkat kecerahan yang diterima (terpapar) akibat adanya sumber cahaya. Untuk spesifikasi lengkap dari sensor BH1750 ditunjukkan pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Spesifikasi Sensor BH1750 [17]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Nama Chip	BH1750
2.	Protokol Komunikasi	I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
3.	Tegangan Operasi	2.4V - 3.6V
4.	Rentang Pengukuran Lux	1 lux hingga 65535 lux
5.	Akurasi Sensor	$\pm 20\%$
6.	Resolusi Output	9-bit hingga 12-bit
7.	Konverter Data	Built-in A/D converter untuk mengubah data analog menjadi digital
8.	Pengaruh Radiasi IR	Memiliki pengaruh kecil terhadap radiasi inframerah (IR)
9.	Suhu Operasional	-40 ° C hingga 85 ° C

Setelah menjelaskan spesifikasi sensor BH1750 pada tabel sebelumnya, selanjutnya perlu dipahami pinout sensor BH1750.



Gambar 2.16 Pinout sensor BH1750 [18]

Pinout sensor BH1750 ditunjukkan pada gambar 2.9 yang memperlihatkan tata letak fisik serta posisi pin pada modul sensor. Selanjutnya menguraikan tabel

pinout secara rinci untuk menjelaskan fungsi dari masing-masing pin, seperti VCC, GND, SDA, SCL, dan ADDR yang digunakan dalam komunikasi I2C. Informasi tersebut bertujuan untuk memudahkan proses identifikasi dan koneksi sensor dengan mikrokontroler sesuai kebutuhan sistem. Dengan adanya tabel pinout, pemahaman mengenai konfigurasi dan fungsi setiap pin menjadi lebih sistematis dan terstruktur, sehingga mempermudah dalam perancangan maupun implementasi rangkaian. Tabel pinout sensor BH1750 dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Pinout Sensor BH1750 [17]

Nama Pin	Fungsi Utama
VCC	Pin untuk catu daya modul dengan tegangan kerja 2,4V hingga 3,6V. Umumnya menggunakan 3,3V.
GND	Pin ground modul yang dihubungkan ke ground pada rangkaian.
SCL	<i>Serial Clock Line</i> , digunakan sebagai jalur sinyal clock pada komunikasi I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>).
SDA	<i>Serial Data Line</i> , digunakan sebagai jalur transfer data pada komunikasi I2C.
ADDR	Pin alamat perangkat (<i>device address</i>) yang digunakan untuk memilih alamat sensor ketika lebih dari satu modul digunakan dalam satu jalur I2C.

Sensor BH1750 pada penelitian ini untuk mengukur besar intensitas cahaya yang diterima oleh permukaan panel surya dalam satuan lux. Data intensitas cahaya yang diperoleh sensor digunakan sebagai salah satu parameter input pada sistem kontrol pendinginan berbasis logika fuzzy. Penggunaan parameter intensitas cahaya didasarkan pada karakteristik kerja panel surya, dimana peningkatan intensitas cahaya akan meningkatkan daya keluaran panel surya karena energi radiasi matahari yang diterima semakin besar. Namun, kondisi tersebut juga menyebabkan kenaikan temperatur pada permukaan panel surya akibat penyerapan panas yang lebih tinggi. Kenaikan suhu panel surya dapat menurunkan efisiensi konversi energi listrik karena tegangan output panel cenderung mengalami penurunan pada temperatur yang tinggi. Oleh karena itu, penambahan parameter intensitas cahaya

pada sistem bertujuan agar kontroler mampu memprediksi potensi kenaikan suhu panel surya sebelum temperatur meningkat terlalu tinggi. Dengan adanya parameter tersebut, sistem pendinginan dapat bekerja lebih prediktif dan responsif sehingga proses pendinginan dapat dilakukan lebih cepat sebelum suhu panel surya meningkat terlalu tinggi.

2.2.8 Sensor *Water Flow*

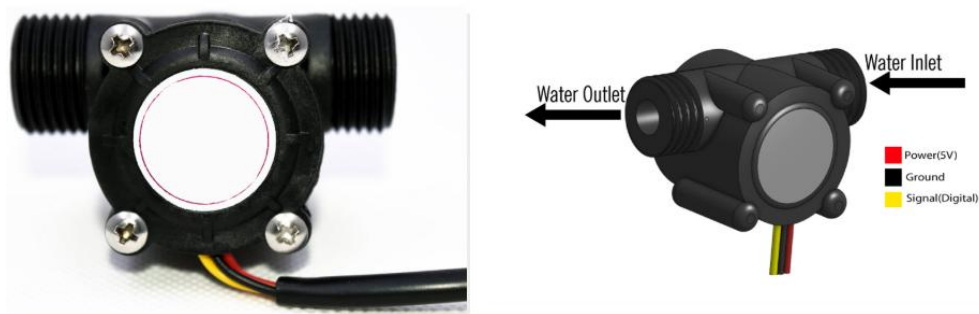
Sensor *water flow* adalah sensor yang mendeteksi aliran air pada saat melewati sensor tersebut. Sensor ini terdiri dari body katup plastik, rotor air, dan sensor *hall-effect*. Ketika air mengalir melewati rotor, rotor akan berputar. Kecepatan putaran ini akan tergantung dengan kecepatan atau besarnya aliran air yang melewati sensor tersebut. Sensor ini tidak akan menghasilkan tegangan apabila sensor belum dialiri air atau belum bekerja dan baru akan menghasilkan tegangan ketika sensor telah dialiri air. Sensor *hall-effect* yang terdapat dalam sensor *water flow* tersebut akan mengeluarkan output pulsa digital sesuai dengan besarnya aliran air [19]. Adapun spesifikasi lengkap dari sensor *water flow* ditunjukkan pada tabel 2.7.

Tabel 2.7 Spesifikasi Sensor *Water Flow* [20]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Nama Chip	YF-S201
2.	Tegangan Operasi	5V - 18V
3.	Tipe Keluaran	5V Digital TTL
4.	Working Flow Rate	1 hingga 30 Liter/Menit
5.	Akurasi Sensor	$\pm 10\%$
6.	Tekanan Air Maksimum	2.0 MPa
7.	Output Duty Cycle	50% kurang lebih 10%
8.	Pulses per Liter	450
9.	Suhu Operasional	-25 ° C hingga 80 ° C

No.	Spesifikasi	Keterangan
10.	Rentang Kelembaban	35% sampai dengan 80% RH

Setelah menjelaskan spesifikasi sensor *water flow* pada tabel sebelumnya, selanjutnya perlu dipahami pinout sensor *water flow*.



Gambar 2.17 Sensor *Water Flow* [19]

Pinout sensor YF-S201 ditunjukkan pada gambar 2.10 yang memperlihatkan tata letak fisik serta posisi pin pada modul sensor. Tabel pinout secara rinci untuk menjelaskan fungsi dari masing-masing pin, seperti VCC, GND, dan pin output sinyal (*signal output*) yang digunakan untuk menghasilkan pulsa digital sebagai pembacaan debit aliran air. Informasi tersebut bertujuan untuk memudahkan proses identifikasi dan koneksi sensor dengan mikrokontroler sesuai kebutuhan sistem. Tabel pinout sensor YF-S201 dapat dilihat pada tabel 2.8.

Tabel 2.8 Pinout Sensor YF-S201 [20]

Warna	Nama Pin	Fungsi Utama
Merah	Power	Kabel untuk input tegangan pada sensor dengan input tegangan sebesar 5V.
Hitam	Ground	kabel ground modul yang dihubungkan ke ground pada rangkaian.
Kuning	Signal	Kabel untuk sinyal keluaran dari sensor.

Pada penelitian ini, Sensor YF-S201 digunakan untuk mengukur debit aliran air yang dialirkan oleh pompa menuju sistem pendinginan panel surya. Sensor ini dipasang pada saluran keluaran pompa sebelum air dialirkan ke nozzle penyemprot,

sehingga jumlah air yang digunakan dalam proses pendinginan dapat terukur. Data yang dihasilkan sensor berupa pulsa yang kemudian diolah oleh ESP32 untuk memperoleh nilai debit aliran dan volume air yang digunakan selama proses penyemprotan panel surya. Berdasarkan karakteristik sensor YF-S201, debit aliran air dapat dihitung menggunakan rumus:

$$Q = \frac{f}{7.5} \quad (2.7)$$

Nilai 7.5 adalah konstanta kalibrasi yang ditentukan pabrik. Nilai ini dapat ditentukan sendiri melalui kalibrasi agar mendapatkan nilai yang presisi. Selanjutnya nilai f merupakan frekuensi pulsa dengan satuan Hz. Nilai debit aliran air memiliki satuan L/menit. Selanjutnya untuk mencari volume air selama 1 detik dengan menggunakan rumus:

$$V = \frac{Q}{60} \quad (2.8)$$

Dimana nilai V merupakan volume air total (L). Q merupakan debit pada (L/menit). Kemudian nilai dibagi dengan 60 karena debit yang dihasilkan masih dalam satuan menit sehingga perlu dikonversi agar menghasilkan per detik.

Pada penelitian ini, sensor YF-S201 tidak digunakan sebagai parameter masukan dalam logika fuzzy, melainkan hanya berfungsi sebagai sensor monitoring. Proses pengambilan keputusan pada logika fuzzy tetap didasarkan pada data suhu panel surya dan intensitas cahaya, sedangkan data dari sensor YF-S201 digunakan untuk mengetahui konsumsi air yang dibutuhkan oleh sistem pendinginan. Seluruh data hasil pengukuran kemudian dikirim dan disimpan ke dalam *Spreadsheet* sehingga dapat digunakan sebagai dokumentasi pengujian serta memudahkan proses analisis dan evaluasi efisiensi penggunaan air pada sistem yang dirancang.

2.2.9 Pompa Air DC 12V

Pompa adalah perangkat yang berfungsi mengubah energi mekanis menjadi energi hidrolik. Secara umum, pompa digunakan untuk memindahkan cairan dari satu lokasi ke lokasi lain dengan cara meningkatkan tekanan cairan tersebut serta memberikan energi kepada fluida yang dipompa [21]. Adapun tegangan kerja pada

pompa ini sebesar 12 VDC. Pompa yang digunakan ini menghasilkan tekanan air hingga 100 PSI sehingga dapat digunakan untuk mengalirkan air dengan debit dan tekanan yang cukup stabil. Prinsip kerja pompa DC ini adalah mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui putaran motor DC yang kemudian menggerakkan diafragma atau impeller untuk mendorong aliran air keluar melalui saluran output [21]. Pada sistem pendinginan panel surya, pompa air DC berfungsi sebagai aktuator yang mengalirkan air ke permukaan panel surya untuk menurunkan temperatur panel. Dengan aliran yang stabil, pompa ini mampu membantu distribusi air secara merata. Adapun pompa air 12 VDC 100 PSI ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.18 Pompa Air DC [22]

Pompa air DC yang digunakan pada penelitian ini memiliki beberapa karakteristik teknis yang mendukung proses pendinginan panel surya, seperti tegangan kerja, tekanan pompa, debit aliran air, serta konsumsi daya. Spesifikasi tersebut penting untuk diketahui agar pompa dapat bekerja sesuai kebutuhan sistem yang dirancang. Untuk spesifikasi lengkap dari pompa air dapat dilihat pada tabel 2.9.

Tabel 2.9 Spesifikasi Pompa Air 12 VDC 100 PSI [22]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Tegangan Kerja	12 VDC
2.	Arus Operasi	3 A
3.	Daya Listrik	36 W

No.	Spesifikasi	Keterangan
4.	Tekanan	100 PSI
5.	Debit Air	4 L/m
6.	Material	Plastik ABS dengan komponen dinamo tembaga.

Pompa air 12 VDC dengan tekanan 100 PSI pada penelitian ini digunakan sebagai aktuator utama pada sistem pendinginan panel surya untuk mengalirkan air menuju *nozzle* penyemprot. Pompa bekerja dengan cara memompa air dari penampungan menuju permukaan panel surya sehingga proses pendinginan dapat dilakukan secara otomatis sesuai perintah dari sistem kontrol berbasis logika fuzzy. Penggunaan pompa 12VDC dipilih karena memiliki tegangan kerja yang sesuai dengan sistem kontrol berbasis ESP32 serta lebih mudah diintegrasikan dengan relay dan catu daya DC. Selain itu, tekanan pompa sebesar 100 PSI memungkinkan air dapat disemprotkan dengan tekanan yang cukup sehingga distribusi air pada permukaan panel surya menjadi lebih merata dan efektif dalam menurunkan suhu panel.

2.2.10 Relay Optocoupler

Relay module optocoupler merupakan modul saklar elektronik yang digunakan untuk mengendalikan perangkat listrik bertegangan dan berarus lebih tinggi yang tidak bisa di drive secara langsung oleh mikrokontroler [23]. Modul relay ini terdiri dari satu kanal (*1 channel*) yang berfungsi untuk menghubungkan maupun memutus aliran listrik secara otomatis. Modul ini dioperasikan dengan memberikan trigger (signal *HIGH* atau *LOW*) pada pin yang di inginkan (*trigger High/Low* bergantung pada jenis relay). Modul ini dilengkapi dengan optocoupler yang berfungsi sebagai isolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian beban sehingga dapat meningkatkan keamanan serta melindungi mikrokontroler [23]. Adapun spesifikasi lengkap dari relay ini ditunjukkan pada gambar tabel 2.10.

Tabel 2.10 Spesifikasi Relay Optocoupler [24]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Tegangan Kerja	5 VDC

No.	Spesifikasi	Keterangan
2.	Mode Aktif	Aktif HIGH / Aktif LOW (tergantung versi)
3.	Arus Trigger	5 mA
4.	Arus Maksimum	10 A
5.	Tegangan Maksimum Kontak	250V AC / 30V DC
6.	Jenis Relay	SPDT (<i>Single Pole Double Throw</i>)
7.	Tipe Kontak	Normally Open (NO) dan Normally Closed (NC)
8.	Modul Relay	Songle SRD-05VDC-SL-C

Setelah menjelaskan spesifikasi relay optocoupler pada tabel sebelumnya, selanjutnya perlu dipahami pinout optocoupler.



Gambar 2.19 Pinout Relay Optocoupler [24]

Pinout relay optocoupler ditunjukkan pada gambar 2.12 yang memperlihatkan tata letak fisik serta posisi pin pada modul relay. Selanjutnya dilakukan penguraian tabel pinout secara rinci untuk menjelaskan fungsi dari masing-masing pin, yang digunakan dalam proses pengendalian beban listrik. Informasi tersebut bertujuan untuk memudahkan proses identifikasi dan koneksi modul relay dengan mikrokontroler maupun perangkat elektronik lainnya sesuai kebutuhan sistem. Adapun fungsi dari masing-masing pin dapat dilihat pada tabel 2.11.

Tabel 2.11 Pinout Relay Optocoupler[24]

Nama Pin	Fungsi Utama
NO (<i>Normally Open</i>)	Terminal kontak relay yang dalam kondisi normal terbuka dan akan terhubung ke COM ketika relay aktif.
COM (<i>Common</i>)	Terminal utama sebagai penghubung antara NO atau NC sesuai kondisi relay.
NC (<i>Normally Closed</i>)	Terminal kontak relay yang dalam kondisi normal terhubung ke COM dan akan terputus ketika relay aktif.
IN (<i>Signal Trigger</i>)	Pin input sinyal kontrol dari mikrokontroler untuk mengaktifkan relay.
DC–	Pin ground atau terminal negatif.
DC+	Pin catu daya positif modul relay, umumnya menggunakan tegangan 5VDC.
High/Low Level Trigger Selection	Jumper untuk memilih mode trigger relay, yaitu aktif pada logika HIGH atau logika LOW.

Relay optocoupler pada penelitian ini digunakan sebagai saklar elektronik untuk mengendalikan kerja pompa air 12 VDC berdasarkan sinyal output dari ESP32. Relay bekerja dengan cara menghubungkan dan memutuskan aliran tegangan menuju pompa sesuai perintah sistem kontrol berbasis logika fuzzy. Penggunaan relay optocoupler dipilih karena memiliki isolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya melalui optocoupler, sehingga dapat melindungi ESP32 dari gangguan tegangan, lonjakan arus, maupun noise yang berasal dari beban induktif seperti pompa air.

2.2.11 SMPS (*Switching Mode Power Supply*)

Switching Mode Power Supply (SMPS) merupakan perangkat catu daya elektronik yang langsung menyearahkan (*rectify*) dan menyaring (*filter*) tegangan

Input AC untuk mendapatkan tegangan DC. Tegangan DC tersebut kemudian di-switch ON dan OFF pada frekuensi tinggi dengan sirkuit frekuensi tinggi sehingga menghasilkan arus AC yang dapat melewati Transformator Frekuensi Tinggi [25]. Cara kerja SMPS dimulai dari proses penyearahan tegangan, kemudian dilanjutkan dengan proses switching berfrekuensi tinggi menggunakan komponen semikonduktor daya, dan diakhiri dengan proses penyaringan menggunakan filter untuk menghasilkan tegangan keluaran yang konstan [25]. Dibandingkan dengan catu daya linear, SMPS memiliki beberapa keunggulan seperti efisiensi yang lebih tinggi, dimensi yang lebih kecil dan ringan, serta kemampuan menjaga kestabilan tegangan keluaran pada berbagai kondisi pembebanan.



Gambar 2.20 *Switching Mode Power Supply (SMPS) [25]*

Berdasarkan gambar 2.13, *Switching Mode Power Supply (SMPS)* yang digunakan pada penelitian ini memiliki tegangan output sebesar 12 VDC dengan kapasitas daya maksimum sebesar 100 watt. SMPS tersebut berfungsi sebagai catu daya utama yang menyuplai kebutuhan tegangan DC pada seluruh sistem. Adapun tegangan input yang dapat digunakan berada pada rentang 185–265 VAC sehingga SMPS mampu bekerja pada variasi tegangan sumber PLN yang cukup lebar. Untuk spesifikasi secara lengkap ditunjukkan pada tabel 2.12.

Tabel 2.12 Spesifikasi SMPS [25]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Nama Produk	Transformer LED

No.	Spesifikasi	Keterangan
2.	Tegangan Input	100 hingga 265 VAC
3.	Tegangan Output	12 VDC
4.	Daya Output Max	10 A
5.	Output	100 W

Pada penelitian ini, *Switching Mode Power Supply* (SMPS) digunakan sebagai catu daya utama untuk menyuplai kebutuhan daya pada seluruh sistem. SMPS berfungsi mengubah tegangan PLN 220 VAC menjadi tegangan 12 VDC. Tegangan keluaran dari SMPS digunakan untuk menyuplai berbagai komponen seperti ESP32, relay, sensor, dan pompa air sesuai kebutuhan tegangan kerja masing-masing komponen. Penggunaan SMPS pada sistem ini mempertimbangkan kestabilan suplai daya agar seluruh perangkat dapat bekerja secara optimal dan andal. Kestabilan tegangan sangat penting karena fluktuasi daya dapat mempengaruhi kinerja sistem, terutama pada proses komunikasi dan pengiriman data monitoring ke google *Spreadsheet* secara real-time.

2.2.12 IC LM7805

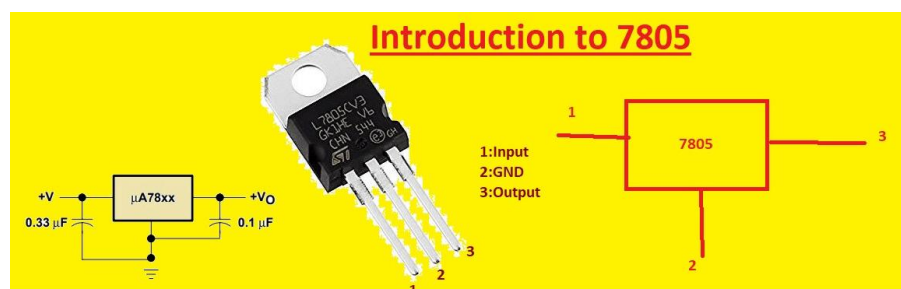
IC LM7805 merupakan salah satu jenis regulator tegangan linear yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan keluaran tetap sebesar 5VDC. Komponen ini termasuk dalam seri regulator 78xx, dimana angka “05” menunjukkan besar tegangan output yang dihasilkan yaitu 5V. LM7805 bekerja dengan cara menurunkan tegangan input DC yang lebih tinggi menjadi tegangan output 5V yang stabil meskipun terjadi perubahan pada tegangan input maupun beban keluaran. Adapun spesifikasi secara lengkap ditunjukkan pada tabel 2.13.

Tabel 2.13 Spesifikasi IC LM7805 [26]

No.	Spesifikasi	Nilai	Keterangan
1.	Nama	-	LM7805
2.	Output Voltage (Vo)	5VDC	Toleransi minimal 4.8VDC dan maksimal 5.2VDC

No.	Spesifikasi	Nilai	Keterangan
3.	Input Voltage (VI)	7V hingga 20V	-
4.	Arus Output Maksimum (Io)	1A	Mampu menyuplai arus beban hingga 1 ampere.
5.	Peak Current (IPK)	2.4A	Arus puncak maksimum yang dapat dilewatkan regulator.
6.	Short Circuit Current (ISC)	2.1A	Arus proteksi saat terjadi hubung singkat pada output.

Berdasarkan tabel 2.13 nilai yang didapat merupakan hasil dari pengujian pada *Junction Temperature* (TJ) sebesar 25°C. Selanjutnya, pinout IC LM7805 ditunjukkan pada gambar 2.21 dimana memperlihatkan letak dan fungsi masing-masing pin. Pemahaman mengenai konfigurasi pin ini penting untuk memudahkan proses perancangan rangkaian serta memastikan IC dapat dihubungkan dan digunakan dengan benar sesuai fungsinya.



Gambar 2.21 Pinout IC LM7805 [26]

Pada gambar 2.21 ditunjukkan pinout dari IC LM7805 yang memperlihatkan susunan serta letak masing-masing pin pada IC. Selanjutnya, fungsi dan deskripsi dari setiap pin pada IC LM7805 akan dijelaskan secara rinci pada tabel 2.14.

Tabel 2.14 Pinout IC LM7805 [26]

No Pin	Fungsi	Deskripsi
Pin 1	Pin Input	Pin ini digunakan sebagai input tegangan DC yang akan diregulasi oleh IC. Tegangan input yang diberikan umumnya berada pada rentang 7V hingga 20V.
Pin 2	Pin Ground (GND)	Pin ground berfungsi sebagai titik referensi tegangan 0V pada rangkaian dan digunakan sebagai jalur negatif antara input dan output.
Pin 3	Pin Output	Pin ini menghasilkan tegangan keluaran yang telah diregulasi sebesar 5VDC dengan rentang sekitar 4.8V hingga 5.2V.

IC LM7805 pada penelitian ini berfungsi sebagai regulator tegangan untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan keluaran dari SMPS sebesar 12 VDC menjadi 5 VDC sesuai kebutuhan sistem. Tegangan output dari IC LM7805 digunakan untuk menyuplai beberapa komponen pada sistem seperti ESP32, sensor DS18B20, LCD 16x2, sensor YF-S201, dan relay optocoupler. Penggunaan IC LM7805 ini dipilih karena memiliki rangkaian yang lebih sederhana dan memiliki tingkat noise dan ripple output yang lebih rendah.

2.2.13 Lampu Indikator (*Pilot Lamp*)

Pilot lamp atau lampu indikator panel listrik merupakan komponen elektrik yang digunakan sebagai penanda visual untuk menunjukkan kondisi atau status suatu peralatan maupun sistem kelistrikan. Lampu indikator umumnya dipasang pada panel listrik atau control panel untuk memberikan informasi kepada operator mengenai keadaan sistem. Fungsi utama *pilot lamp* adalah memberikan sinyal visual yang mudah dipahami, seperti menunjukkan kondisi peralatan dalam keadaan aktif atau tidak aktif, serta memberikan indikasi apabila terjadi gangguan atau kerusakan pada sistem kelistrikan [27].



Gambar 2.22 Lampu Indikator

Gambar 2.22 merupakan lampu indikator yang digunakan pada sistem dimana lampu tersebut diletakkan pada panel box kontrol. Spesifikasi dari lampu indikator yang digunakan yaitu menggunakan tegangan input sebesar 12 VDC dan diameter dari lampu yang digunakan yaitu 12 mm. Pada penelitian ini, digunakan 3 jenis lampu indikator dengan warna yang berbeda, dimana masing-masing lampu berfungsi untuk menunjukkan kondisi kerja sistem. Lampu hijau menunjukkan bahwa sistem dalam kondisi menyala (ON) dan telah mendapatkan suplai daya. Selanjutnya, lampu merah akan menyala ketika proses kontrol logika fuzzy aktif dan sistem pendinginan bekerja. Adapun lampu kuning digunakan sebagai indikator bahwa sistem berada dalam kondisi normal atau *standby*. Dengan adanya lampu indikator tersebut, kondisi operasional sistem dapat dimonitor dengan lebih mudah melalui tampilan visual secara langsung.

2.2.14 Nozzle

Nozzle merupakan alat yang memiliki fungsi sebagai pengatur laju aliran air dan untuk meningkatkan kecepatan air sesuai tekanan yang diberikan [28]. Cara kerja *nozzle* yaitu mengubah aliran fluida yang masuk menjadi semprotan dengan kecepatan, arah, dan pola tertentu melalui penyempitan saluran dan kontrol tekanan di dalamnya [29]. *Nozzle* terdiri dari 3 jenis yaitu pertama *convergent nozzle*, dimana memiliki luas penampang yang semakin kecil sehingga kecepatan fluida meningkat dan tekanan menurun, umumnya digunakan pada aliran subsonik. Kedua, *divergent nozzle*, yaitu *nozzle* dengan luas penampang yang semakin besar sehingga kecepatan fluida menurun dan tekanan meningkat. Ketiga, *convergent-divergent nozzle*, yaitu kombinasi keduanya dimana fluida dipercepat pada bagian

convergent hingga mencapai kecepatan maksimum di *throat*, kemudian terus berakselerasi pada bagian *divergent* hingga dapat mencapai kecepatan supersonik dengan tekanan yang semakin menurun [29]. Adapun spesifikasi lengkap untuk *nozzle* yang digunakan ditunjukkan pada tabel 2.15.

Tabel 2.15 Spesifikasi Nozzle Sprinkler [30]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Nama	<i>Mist Nozzle Sprinkler</i>
2.	Sudut Semprotan	180°
3.	Tekanan	1-3 Bar
4.	Debit Air	70-120L/h
5.	Radius	0.5-1.5m
6.	Ukuran Koneksi	1/2 Inch

Setelah mengetahui spesifikasi lengkap *nozzle sprinkler*, selanjutnya cara kerja secara spesifik dan fungsi *nozzle* tersebut. Berdasarkan gambar 2.23 *nozzle* memiliki pola penyemprotan setengah lingkaran atau membentuk sudut 180°. *Nozzle* ini bekerja dengan mengubah aliran air bertekanan dari pompa menjadi butiran air yang menyebar ke arah depan hingga sudut 180°. Saat air melewati lubang *nozzle* yang kecil, tekanan air akan meningkat sehingga air keluar dalam bentuk kabut atau percikan halus yang merata.



Gambar 2.23 Nozzle Sprinkler [30]

Pada penelitian ini, *nozzle* digunakan sebagai media penyemprot air pada sistem pendinginan panel surya. *Nozzle* berfungsi mengubah aliran air yang berasal dari pompa menjadi butiran-butiran air halus yang kemudian disemprotkan ke permukaan panel surya dengan pola penyemprotan setengah lingkaran (180°). Pola semprotan tersebut memungkinkan distribusi air menjadi lebih merata pada permukaan panel surya sehingga proses perpindahan panas dapat berlangsung lebih efektif sehingga suhu permukaan panel surya dapat diturunkan secara optimal. Selain itu, penggunaan *nozzle sprayer* 180° juga dapat mengoptimalkan penggunaan air karena area penyemprotan dapat dijangkau dengan baik tanpa memerlukan debit air yang terlalu besar.

2.2.15 LCD (*Liquid Crystal Display*)

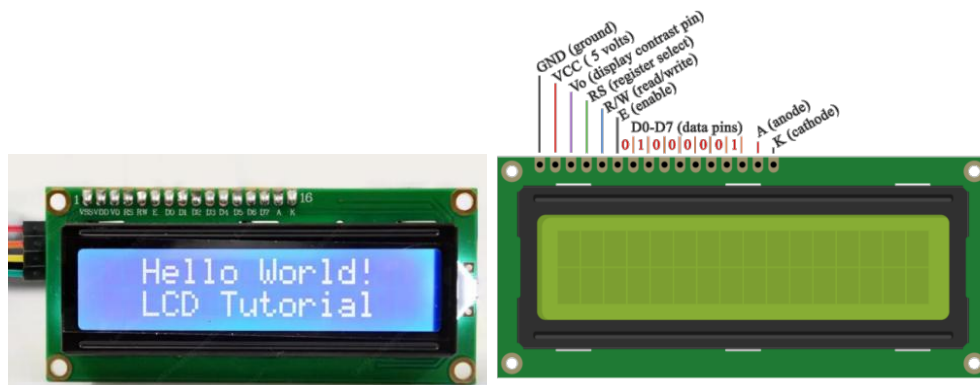
LCD (*Liquid Crystal Display*) merupakan perangkat tampilan elektronik yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk karakter, angka, maupun simbol dengan memanfaatkan sifat optik dari kristal cair. Prinsip kerja LCD didasarkan pada kemampuan kristal cair dalam mengatur intensitas cahaya yang melewatinya ketika diberikan tegangan listrik, sehingga dapat membentuk tampilan tertentu pada layar [31]. LCD dihubungkan ke ESP32 menggunakan antarmuka I2C melalui modul PCF8574 untuk meminimalkan penggunaan pin GPIO. Salah satu jenis yang umum digunakan adalah LCD 16x2 yang mampu menampilkan 16 karakter dalam 2 baris [31]. Dalam implementasinya, LCD berfungsi sebagai media antarmuka untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor maupun status sistem secara langsung kepada pengguna. Spesifikasi lengkap dari LCD 16x2 ditunjukkan pada tabel 2.17.

Tabel 2.16 Spesifikasi LCD 16x2 [32]

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Nama Chip	LCD 16x2
2.	Tegangan Operasi	4.7V – 5.3V
3.	Ukuran Bezel Display	72 × 25 mm
4.	Tipe Kontroler	HD44780

No.	Spesifikasi	Keterangan
5.	Jumlah Kolom	16
6.	Jumlah Baris	2
7.	Jumlah Pin LCD	16
8.	Jumlah Karakter Yang Dapat Ditampilkan	32
9.	Mode Komunikasi	4-bit dan 8-bit
10.	Ukuran font karakter	0,125 lebar × 0,200 tinggi

Setelah mengetahui spesifikasi lengkap LCD, selanjutnya mengetahui pinout yang ada pada komponen sehingga dapat memahami setiap fungsi dari pin-pin yang ada pada LCD. Adapun pinout LCD ditunjukkan pada gambar 2.24.



Gambar 2.24 Pinout LCD (Liquid Crystal Display) [33]

Pinout LCD 16x2 ditunjukkan pada gambar 2.24 yang memperlihatkan tata letak fisik serta posisi pin pada modul LCD. Adapun tabel pinout secara rinci untuk menjelaskan fungsi dari masing-masing pin, seperti VCC, GND, RS, EN, serta pin data yang digunakan dalam proses komunikasi antara LCD dan mikrokontroler ditunjukkan pada tabel 2.18.

Tabel 2.17 Pinout LCD 16x2 [32]

No Pin	Nama Pin	Fungsi Utama
Pin 1	VSS	Pin ground yang dihubungkan ke terminal ground rangkaian.
Pin 2	VCC	Pin catu daya (+5V untuk LCD).
Pin 3	V0	Pengatur kontras tampilan menggunakan potensiometer (0 hingga 5V).
Pin 4	RS	Pin pemilih register untuk mengatur komunikasi antara mikrokontroler dan LCD (0 = mode instruksi, 1 = mode data).
Pin 5	RW atau R/W	Pin yang digunakan untuk proses pembacaan dan penulisan data (0 = Write/Tulis, 1 = Read/Baca).
Pin 6	E	Pin enable yang aktif pada logika HIGH untuk mengaktifkan operasi LCD.
Pin 7 - 14	D0-D7	Pin data yang digunakan untuk mengirim data atau instruksi ke LCD.
Pin 15	A	Terminal positif LED backlight LCD yang dihubungkan ke +5V.
Pin 16	K	Terminal negatif LED backlight LCD yang dihubungkan ke ground.

LCD pada penelitian ini digunakan sebagai media antarmuka (*interface*) untuk menampilkan informasi hasil monitoring sistem secara real-time. Informasi yang ditampilkan pada LCD meliputi nilai suhu panel surya, intensitas cahaya, dan volume air yang terukur pada sensor *water flow*. Penggunaan LCD bertujuan untuk memudahkan pengguna dalam memantau kondisi sistem secara langsung tanpa memerlukan perangkat tambahan seperti komputer atau smartphone.

2.2.16 Google Spreadsheet

Google *Spreadsheet* yang ditunjukkan pada gambar 2.25 merupakan aplikasi pengolah data berbasis cloud yang dikembangkan oleh google dan digunakan untuk menyimpan, mengelola, serta menganalisis data secara online.

Aplikasi ini memungkinkan pengguna untuk melakukan pencatatan data secara real-time dan dapat diakses dari berbagai perangkat selama terhubung dengan internet. Dalam sistem berbasis mikrokontroler, google *Spreadsheet* sering dimanfaatkan sebagai media data logging dan monitoring jarak jauh dengan cara mengirimkan data dari perangkat seperti ESP32 melalui protokol HTTP ke server yang terhubung dengan *Spreadsheet*. Keunggulan utama dari google *Spreadsheet* adalah kemampuannya dalam menyimpan data secara otomatis, menampilkan data dalam bentuk tabel maupun grafik, serta mendukung kolaborasi secara langsung. [34]

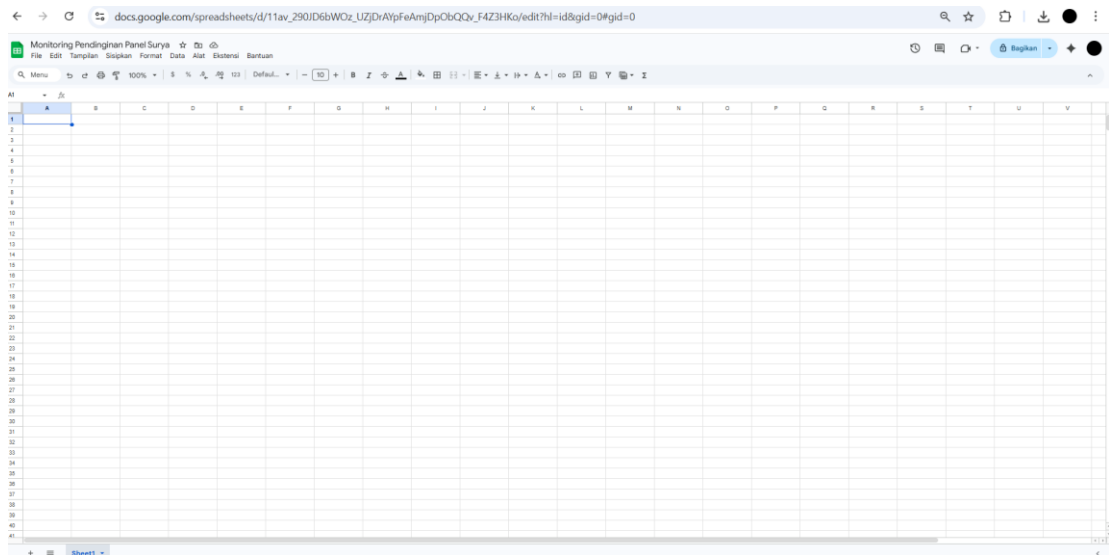


Gambar 2.25 Google *Spreadsheet* [34]

Google *Spreadsheet* pada penelitian ini digunakan sebagai media monitoring dan penyimpanan data secara real-time yang terintegrasi dengan ESP32 melalui jaringan internet. Data yang diperoleh dari sensor, seperti suhu panel surya, intensitas cahaya, debit aliran air, serta hasil keluaran sistem kontrol logika fuzzy akan dikirim dan disimpan secara otomatis ke dalam google *Spreadsheet*. Penggunaan google *Spreadsheet* memungkinkan data hasil pengukuran terdokumentasi dengan baik sehingga memudahkan proses pengamatan, analisis, dan evaluasi kinerja sistem pendinginan panel surya. Selain itu, platform ini dapat diakses dari berbagai perangkat yang terhubung ke internet, sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem secara jarak jauh tanpa harus berada di lokasi pengujian.

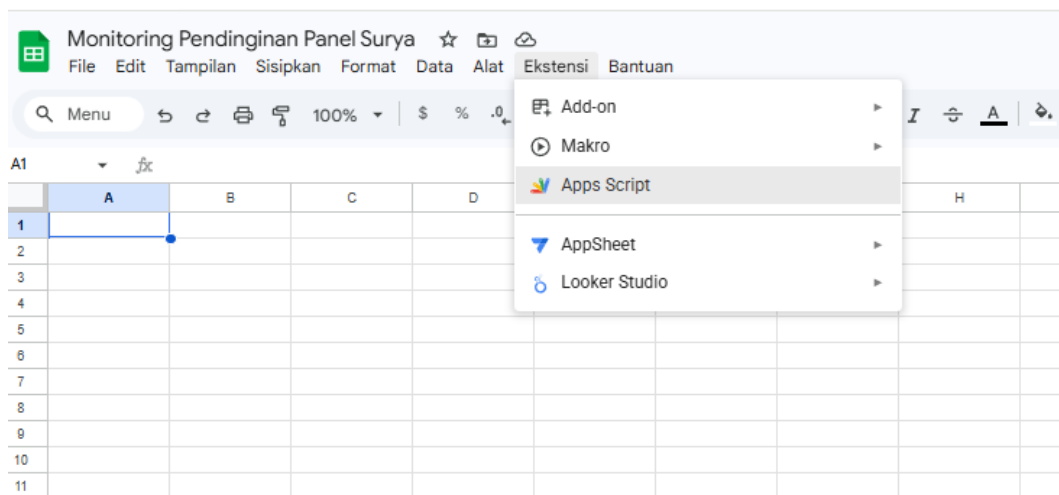
Untuk menggunakan google *Spreadsheet* diawali dengan membuka aplikasi google *Spreadsheet* melalui browser pada perangkat komputer maupun laptop yang terhubung dengan jaringan internet. Setelah halaman utama terbuka, pengguna

dapat membuat lembar kerja baru dengan memilih opsi *blank Spreadsheet* atau menggunakan template yang telah tersedia. Lembar kerja ditunjukkan pada gambar 2.26, pengguna dapat memasukkan data dalam bentuk teks, angka, maupun rumus perhitungan sesuai kebutuhan.



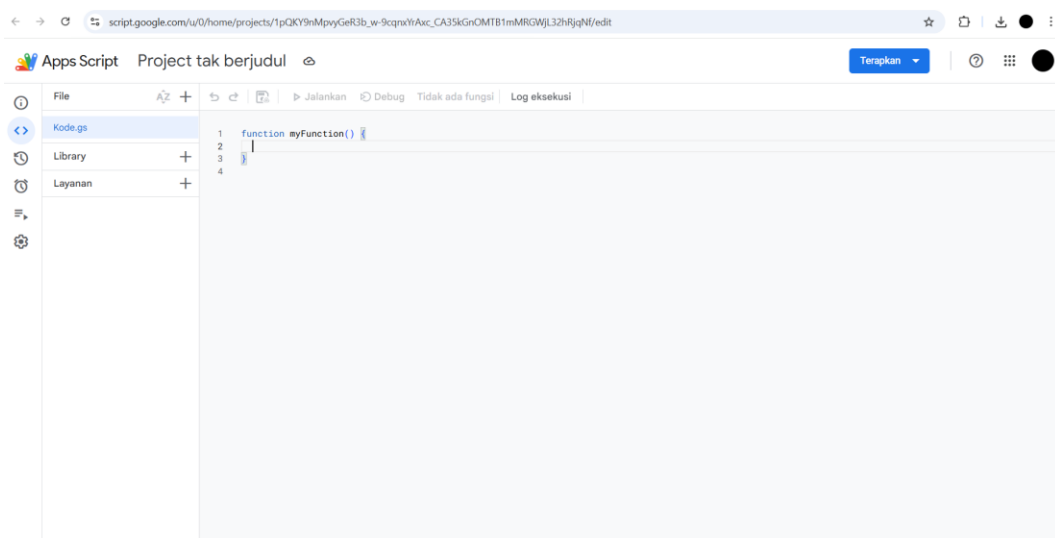
Gambar 2.26 Lembar Kerja Pada Google *Spreadsheet*

Selanjutnya agar google *Spreadsheet* dapat terhubung dan menerima data dari mikrokontroler esp32 dihubungkan melalui google script. Dengan cara buka bagian Ekstensi > Apps Script seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.27.



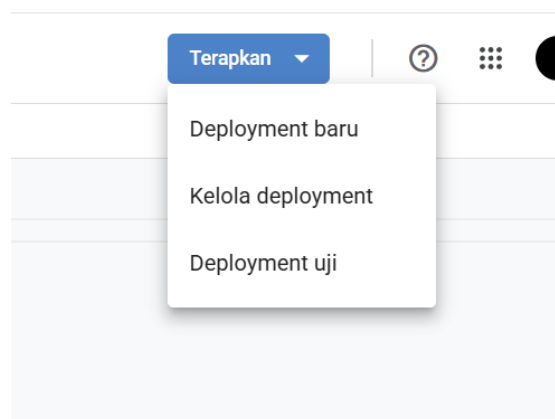
Gambar 2.27 Apps Script

Langkah selanjutnya adalah memasukkan program atau *coding* pada lembar apps script untuk menghubungkan mikrokontroler dengan google *Spreadsheet*. Koding tersebut berfungsi untuk menerima data yang dikirim oleh mikrokontroler, kemudian menyimpan data secara otomatis ke dalam *Spreadsheet* sebagai media monitoring dan penyimpanan data. Pada tahap ini, pengguna dapat menuliskan script menggunakan bahasa JavaScript sesuai kebutuhan sistem. Gambar 2.28 menunjukkan lembar kerja apps script yang digunakan untuk menuliskan dan mengedit program penghubung antara sistem mikrokontroler google *Spreadsheet*.



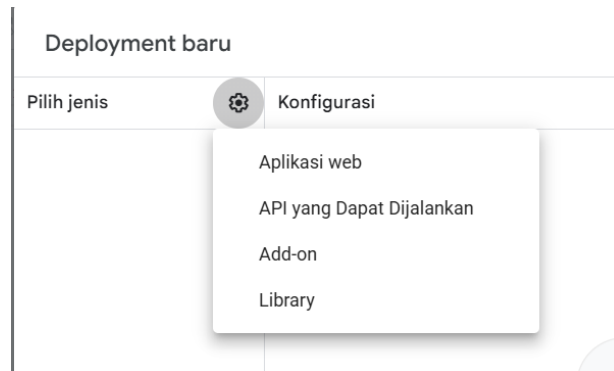
Gambar 2.28 Lembar Kerja Apps Script

Kemudian pilih terapkan > deployment baru untuk menyimpan kode yang telah dibuat seperti pada gambar 2.29.



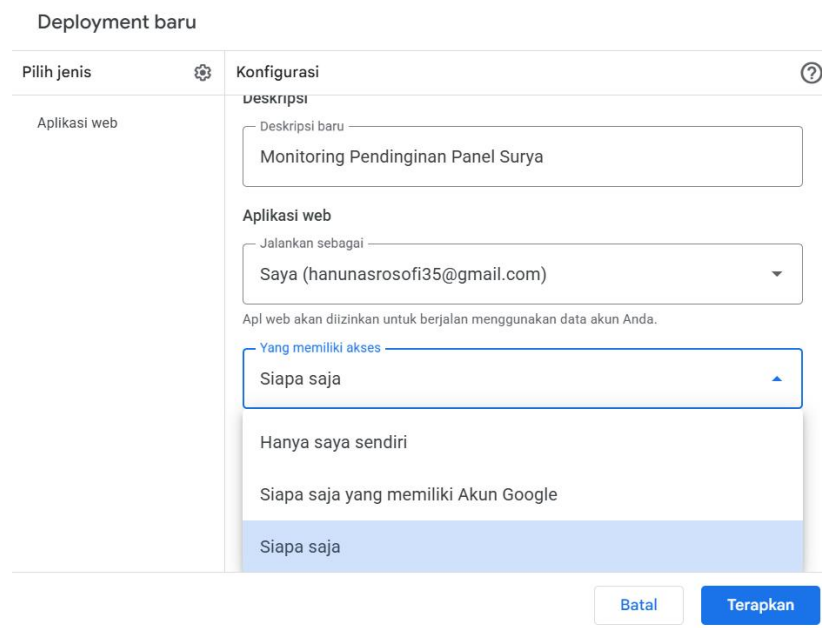
Gambar 2.29 Penyimpanan Kode Pada Apps Script

Setelah memilih deployment baru kemudian pilih jenis deployment yang digunakan untuk menentukan jenis deployment atau publikasi script yang akan dijalankan. Untuk menghubungkan ESP32 dengan google *Spreadsheet*, pilih aplikasi web seperti pada gambar 2.30 karena script akan dijalankan melalui URL web agar dapat menerima dan mengirim data secara online.



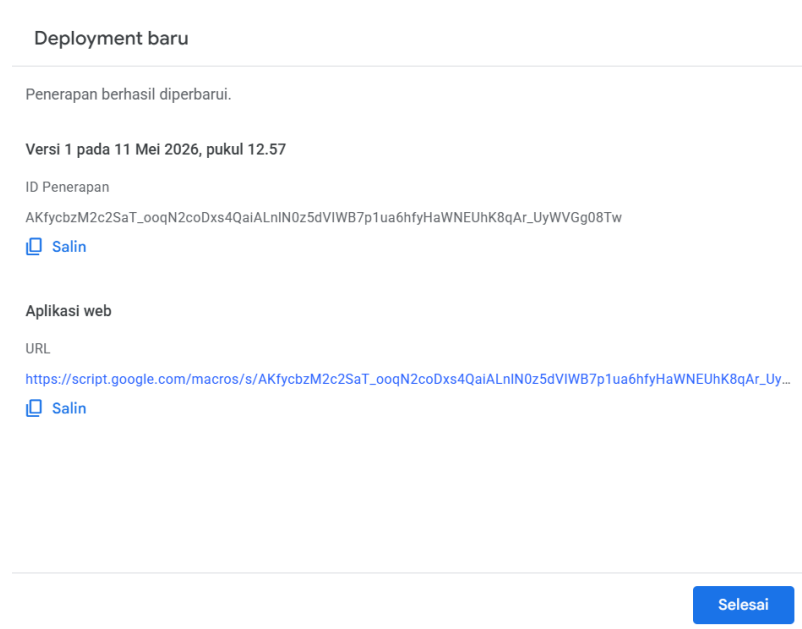
Gambar 2.30 Konfigurasi Pada Apps Script

Kemudian isi pada bagian deskripsi mengenai file yang sedang dibuat serta pada bagian akses buat akses untuk siapa saja agar mikrokontroler dapat mengirim data ke google *Spreadsheet*. Kemudian klik terapkan seperti pada gambar 2.31.



Gambar 2.31 Konfigurasi Akses Pada Apps Script

Setelah menerapkan pada bagian deployment, hasil deployment aplikasi web pada google apps script setelah proses deployment berhasil dilakukan seperti pada gambar 2.32. Pada bagian URL Aplikasi Web (Web App URL) yaitu alamat URL yang digunakan untuk mengakses atau menghubungkan aplikasi web dengan perangkat lain seperti ESP32.



Gambar 2.32 Pembuatan Google *Spreadsheet* Berhasil