

SISTEM KENDALI POMPA AIR TENAGA SURYA BERBASIS IoT

Dzaky Fadli Atha Hilmy; Aris Budiman S.T., M.T.

Teknik Elektro; Fakultas Teknik; Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Indonesia dianugerahi potensi radiasi matahari yang melimpah, tetapi utilisasi di sektor pertanian skala kecil dan rumah tangga belum optimal. Sistem irigasi konvensional yang tergantung penuh pada pasokan listrik PLN dan pengoperasiannya yang manual kerap memicu pemborosan debit air, inefisiensi energi, serta ancaman gagal panen karena petani tidak dapat memantau kondisi lahan secara langsung dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan membangun dan menguji purwarupa Sistem Pengendali Pompa Air Bertenaga Surya terintegrasi IoT, yang dirancang untuk menjalankan dua fungsi sekaligus, yaitu pengaturan pasokan air ke media tanam (irigasi presisi) serta pengendalian suhu lingkungan sekitar tanaman melalui mode pendinginan kabut, khususnya pada budidaya tanaman hortikultura unggulan seperti anggur di dalam *greenhouse*. Sistem mengintegrasikan panel surya 50 Wp, Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM, baterai aki 12 V, mikrokontroler ESP32 berdaya rendah, sensor kelembapan tanah kapasitif, sensor suhu dan kelembapan udara DHT22, modul relay, pompa air DC 12 V, serta platform IoT Blynk sebagai antarmuka kendali jarak jauh. Kendali penyiraman diterapkan secara adaptif dengan memanfaatkan acuan waktu dari protokol NTP guna membedakan periode siang dan malam, yang kemudian diverifikasi melalui data *Capacitive Soil Moisture* Sensor sebelum relai pompa diaktifkan dalam siklus pulsa. Di sisi lain, sensor DHT22 berperan ganda, yaitu sebagai pemicu pompa *misting* (unit pendingin) ketika suhu melewati batas optimal serta sebagai pemicu sinyal peringatan dini yang mengaktifkan *buzzer* dan notifikasi *push* ke aplikasi Blynk. Berdasarkan hasil uji coba, purwarupa menunjukkan tingkat akurasi respons yang tinggi terhadap kondisi kritis, terbukti mampu menekan konsumsi air dengan membatalkan siklus irigasi pada media tanam yang masih basah, serta menyampaikan notifikasi keadaan darurat ke pengguna dengan pengiriman data yang masih dalam toleransi operasional. Secara keseluruhan, berdasarkan hasil uji coba purwarupa terbukti berhasil menjalankan kendali irigasi dan *misting* secara otomatis dan konsisten sesuai logika yang dirancang, dengan pembacaan sensor DHT22 dan sensor kelembapan tanah, dan sensor tegangan INA219 yang tetap berada dalam batas toleransi (*error* suhu maksimum 1.66% dan *error* RH maksimum 6.79%, dan *error* tegangan INA219 maksimum 0.23%), didukung daya rata-rata panel surya sebesar 21.8 W dan konsumsi daya total seluruh beban sebesar 30.09 W.

Kata Kunci: ESP32, IoT Blynk, kelembapan tanah, otomasi irigasi, tenaga surya.

Abstract

Indonesia is endowed with abundant solar irradiation potential; however, its utilization within the small-scale agricultural and household sectors remains suboptimal. Conventional irrigation systems, which depend entirely on the state electricity grid and rely on manual operation, frequently lead to water wastage, energy inefficiency, and the risk of crop failure, as farmers are unable to monitor field conditions directly and continuously. This study aims to construct and evaluate a prototype of an IoT-integrated Solar-Powered Water Pump Control System, specifically engineered to perform two functions simultaneously: regulating water supply to the planting media (precision irrigation) and controlling the ambient temperature surrounding the crops through a mist cooling mode, particularly for high-value horticultural commodities such as grapes cultivated in greenhouses. The system integrates a 50 Wp solar panel, a PWM-type Solar

Charge Controller (SCC), a 12V lead-acid battery, a low-power ESP32 microcontroller, a capacitive soil moisture sensor, a DHT22 air temperature and humidity sensor, a relay module, a 12 V DC water pump, and the Blynk IoT platform as a remote control interface. Irrigation scheduling is implemented adaptively by utilizing time references obtained through the Network Time Protocol (NTP) to distinguish between daytime and nighttime periods. This schedule is subsequently verified through data from the capacitive soil moisture sensor before the pump relay is activated in a pulse cycle mode. On the other hand, the DHT22 sensor serves a dual role: acting as a trigger for the misting pump (cooling unit) when the temperature exceeds the optimal threshold, while simultaneously functioning as an early warning signal generator that activates a buzzer and delivers push notifications to the Blynk application. Based on the experimental results, the prototype demonstrates a high level of response accuracy to critical conditions. It has proven capable of minimizing water consumption by canceling irrigation cycles when the growing media remains moist, while also delivering emergency notifications to users with data transmission latency remaining within operational tolerance limits. Overall, based on the results of the trial the prototype proved successful in performing automatic and consistent irrigation and misting control in accordance with the designed logic, with DHT22 and soil moisture sensor, and INA219 voltage sensor readings remaining within acceptable tolerance (maximum temperature error of 1.66% and maximum RH error of 6.79%), and maximum INA219 voltage error of 0.23%), supported by an average solar panel power output of 21.8 W and a total load power consumption of 30.09 W.

Keywords: ESP32, IoT Blynk, soil moisture, irrigation automation, solar energy.

1. PENDAHULUAN

Posisi Indonesia yang berada di kawasan ekuator memberikan keunggulan berupa tingkat penyinaran matahari tahunan yang relatif tinggi, berkisar antara 4.5 hingga 5.1 kWh/m²/hari, yang nilainya melampaui rerata dunia sebesar 3.5 kWh/m²/hari (Marhatang et al., 2022). Sayangnya, optimalisasi energi ini untuk mendukung kegiatan pertanian skala kecil dan domestik masih belum tergarap secara maksimal, meskipun Indonesia dikenal sebagai salah satu wilayah paling potensial di dunia untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga surya. Di sisi lain, pemanfaatan energi surya di ranah pertanian rakyat dan rumah tangga skala terbatas masih tergolong rendah. Mayoritas petani, termasuk pembudidaya tanaman di *greenhouse* skala kecil, masih menggantungkan pasokan listriknya pada jaringan PLN. Ketergantungan ini berimplikasi pada membengkaknya biaya operasional jangka panjang, kerentanan terhadap pemadaman listrik mendadak, serta keterbatasan akses di wilayah pedesaan yang belum tersentuh infrastruktur kelistrikan.

Sistem konvensional yang banyak dijumpai saat ini pada umumnya dioperasikan dengan cara manual, baik berdasarkan jadwal tetap maupun penilaian subjektif dari pengguna. Pendekatan semacam ini menyimpan kelemahan pokok, yaitu risiko pemborosan volume air ketika pompa dibiarkan beroperasi melewati batas kebutuhan, ataupun ancaman cekaman air (*water stress*) pada tanaman saat pengguna tidak berada di tempat dan pompa tidak diaktifkan.

Permasalahan ini semakin krusial pada budidaya tanaman hortikultura unggulan di dalam *greenhouse*, misalnya anggur, yang memerlukan kestabilan kondisi suhu dan kelembapan udara untuk menunjang pertumbuhan optimal (Faqih, 2023). Fluktuasi suhu yang ekstrem dan kelembapan yang tidak terkendali dapat memicu stres fisiologis, gugurnya bunga, hingga berkembangnya patogen jamur, yang pada akhirnya berpotensi menggagalkan produksi dan menimbulkan kerugian ekonomi signifikan bagi pembudidaya. Ketidadaan mekanisme pemantauan jarak jauh serta sistem penjadwalan yang adaptif terhadap kondisi lingkungan aktual menyebabkan sistem irigasi tradisional gagal mengantisipasi dinamika kebutuhan air dan suhu di dalam *greenhouse*.

Dalam kurun waktu satu dasawarsa terakhir, kemajuan teknologi mikrokontroler konsumsi daya rendah serta platform Internet of Things (IoT) telah membuka celah solusi yang sangat luas untuk menjawab keterbatasan-keterbatasan sistem irigasi konvensional tersebut (Halimi et al., 2025). Mikrokontroler ESP32, yang dilengkapi modul Wi-Fi terintegrasi dan arsitektur *dual-core* 240 MHz, memungkinkan terwujudnya sistem kendali cerdas yang sanggup mengakuisisi data sensor, menjalankan algoritma kendali, serta mengirimkan data telemetri ke awan (*cloud*) secara paralel dengan konsumsi energi yang sangat hemat (Correa-Quiroz et al., 2025; Rozani et al., 2025). Adapun platform IoT berbasis gawai, misalnya Blynk, semakin memudahkan adopsi sistem ini karena menyuguhkan antarmuka pemantauan dan kendali yang intuitif (Saputri et al., 2025), tanpa mengharuskan pengguna akhir memiliki kemampuan teknis di bidang pemrograman antarmuka. Sinergi kedua pendekatan teknologi ini memberi peluang untuk merancang sistem irigasi presisi yang ramah anggaran sekaligus andal dalam kinerja operasionalnya. Meski demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya baru menysasar satu aspek saja (irigasi atau iklim mikro), sedangkan penelitian ini memadukan suplai daya mandiri PLTS, ambang kelembapan tanah adaptif waktu, serta mode pendinginan kabut dan sirkulasi udara sekaligus dalam satu sistem.

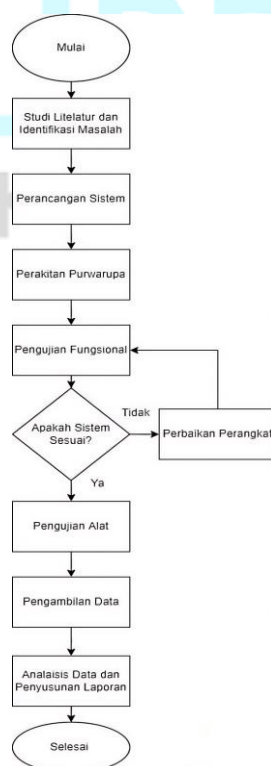
Berlandaskan uraian masalah dan peluang teknologi di atas, penelitian ini bertujuan membangun dan mengujikan purwarupa Sistem Kendali Pompa Air Tenaga Surya Berbasis IoT yang dirancang untuk beroperasi dalam dua skenario fungsional utama: (1) distribusi air irigasi yang diatur berdasarkan kelembapan tanah dan acuan waktu, serta (2) mode pendinginan kabut yang diaktifkan berdasarkan kondisi suhu udara. Untuk mendukung kedua skenario tersebut, sistem mengandalkan panel surya sebagai sumber daya utama, ESP32 sebagai pengendali, sensor kelembapan tanah kapasitif dan DHT22 sebagai penyaji data

kondisi aktual, serta Blynk sebagai antarmuka kendali jarak jauh. Rumusan masalah yang menjadi fokus penelitian ini meliputi dua hal pokok. Pertama, bagaimana merancang dan merealisasikan sistem kendali otomatis pompa air bertenaga surya berbasis IoT Blynk yang mampu mengatur eksekusi irigasi berdasarkan pembacaan tingkat kelembapan tanah dengan ambang batas adaptif yang menyesuaikan dengan waktu nyata (siang/malam)? Kedua, bagaimana mengintegrasikan sensor DHT22 dan *buzzer* ke dalam sistem sebagai pemicu fungsi pompa sekaligus sebagai mekanisme peringatan dini, yang mampu mendeteksi kondisi kritis lingkungan tanam dan meneruskan informasi darurat ke platform IoT secara cepat? Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata berupa referensi teknologi tepat guna yang dapat diaplikasikan oleh petani hortikultura skala kecil dan menengah..

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode perancangan dan implementasi sistem (*Research and Development*) untuk mengembangkan sistem kendali iklim mikro dan irigasi cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) bersuplai daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Metode ini dipilih karena fokus penelitian mencakup pembuatan perangkat keras (*hardware*), pengembangan perangkat lunak (*software*), integrasi sistem, serta pengujian kinerja alat secara langsung di lapangan dalam mengelola parameter lingkungan. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, perancangan sistem, perakitan perangkat, pemrograman mikrokontroler, serta pengujian dan analisa data kalibrasi.

2.1 Tahapan Penelitian



Gambar 1. *Flowchart* Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis untuk memastikan sistem otomasi yang dikembangkan dapat berfungsi dengan baik dan presisi. Tahapan tersebut diawali dengan identifikasi masalah dan studi literatur, dilanjutkan dengan perancangan arsitektur sistem, perakitan komponen perangkat keras, penulisan kode program pada mikrokontroler, dan integrasi modul IoT. Jika pada tahap pemrograman atau pengujian ditemukan ketidaksesuaian logika, proses dikembalikan ke langkah sebelumnya untuk dilakukan perbaikan. Setelah purwarupa beroperasi dengan stabil, tahapan diakhiri dengan proses pengambilan data kalibrasi sensor, pengujian respons matriks aktuator, serta evaluasi keluaran daya PLTS.

2.2 Persiapan Alat dan Bahan

Tahap persiapan alat dan bahan diawali dengan pemilihan komponen yang disesuaikan dengan kebutuhan operasional sistem irigasi presisi berbasis energi surya pada skala *greenhouse* kecil. Sumber energi sistem disuplai oleh panel surya monokristalin berkapasitas 50 Wp yang dipasangkan dengan Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM untuk mengatur arus pengisian baterai aki 12 V sekaligus mencegah kondisi *overcharging* dan *over-discharging*. Pemilihan kapasitas tersebut didasarkan pada kebutuhan daya pompa air DC 12 V, sehingga energi yang dihasilkan panel surya mencukupi untuk operasional harian tanpa membutuhkan baterai berkapasitas besar.

Pada sisi instrumentasi, perancangan sistem mencakup pengaturan alur komunikasi data antar komponen agar purwarupa dapat bekerja secara terintegrasi. Suhu dan kelembapan udara diukur menggunakan sensor DHT22 dengan protokol *single-wire*. Sementara itu, kelembapan tanah dipantau oleh sensor kapasitif yang mendeteksi perubahan dielektrik media tanam. Kedua sensor tersebut dihubungkan langsung ke pin GPIO mikrokontroler ESP32 yang berperan sebagai unit pengendali utama. Sebagai mekanisme proteksi tambahan, sistem juga dilengkapi sensor ultrasonik HC-SR04 yang dipasang pada bagian atas tandon air untuk memantau ketinggian air secara kontinu.

Selain memproses parameter lingkungan, ESP32 juga dihubungkan dengan sensor arus presisi INA219 melalui jalur komunikasi I²C untuk membaca metrik konsumsi daya sistem, khususnya memantau stabilitas tegangan sumber (baterai) secara aktual. Penambahan INA219 ini bertujuan agar performa kelistrikan dapat dipantau secara langsung, bukan hanya diasumsikan dari spesifikasi datasheet komponen. Seluruh data yang diterima ESP32, baik dari sensor lingkungan maupun sensor kelistrikan, selanjutnya diolah untuk mengatur logika kerja sistem secara keseluruhan, termasuk pengambilan keputusan eksekusi relai aktuator pompa irigasi, pompa *misting*, dan kipas.

Untuk mendukung pemantauan dan kendali jarak jauh, sistem dirancang agar ESP32 senantiasa terhubung dengan server platform Blynk melalui jaringan Wi-Fi dan internet. Data hasil pembacaan lingkungan dan kelistrikan dikirimkan secara berkala ke *dashboard* Blynk, sehingga pengguna dapat memantau kondisi lahan, status aktuator, maupun performa tegangan baterai secara langsung melalui aplikasi pada perangkat *smartphone*, tanpa harus berada di lokasi *greenhouse*.

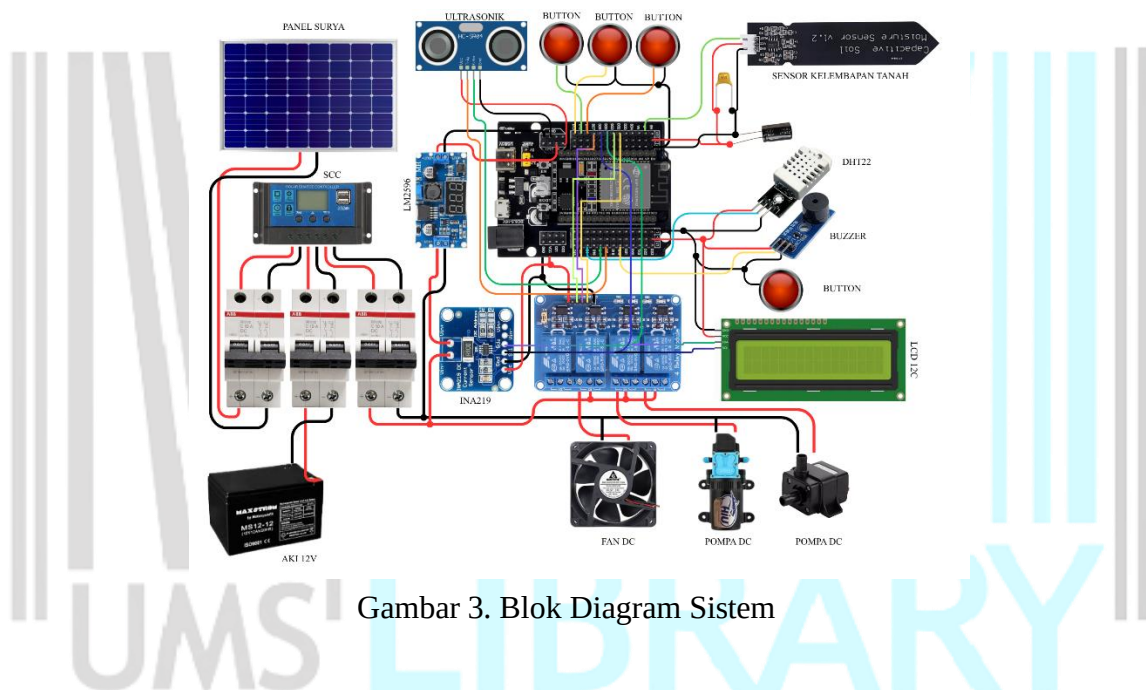


Gambar 2. Purwarupa Alat

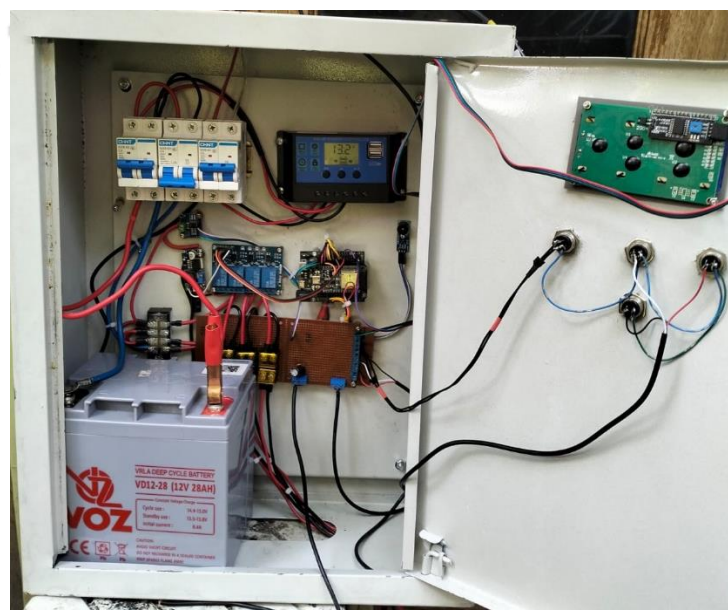
2.3 Perancangan Sistem

Perancangan perangkat keras dilakukan untuk membangun infrastruktur fisik yang mampu mengendalikan iklim mikro serta penyiraman tanaman secara otomatis, dengan mempertimbangkan keterbatasan daya yang tersedia dari sistem PLTS skala mikro. Sektor catu daya dioperasikan secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik PLN. Energi listrik yang dibangkitkan oleh panel surya pada siang hari diregulasi oleh Solar Charge Controller (SCC) tipe PWM sebelum disalurkan untuk mengisi daya baterai aki 12 V. Baterai ini berfungsi sebagai penyangga energi (*energy buffer*) yang memungkinkan sistem tetap dapat beroperasi pada saat radiasi matahari rendah, misalnya pada cuaca mendung atau menjelang malam hari, sehingga ketersediaan daya untuk aktuator tidak bergantung sepenuhnya pada kondisi cuaca seketika. Sektor aktuator pada sistem ini terdiri dari tiga perangkat elektromekanis utama, yaitu pompa air irigasi yang berfungsi mendistribusikan air dari sumber atau tangki ke media tanam, pompa *misting* yang berfungsi menghasilkan kabut air halus untuk menurunkan suhu udara di

dalam *greenhouse* melalui mekanisme pendinginan evaporatif (Eduard et al., 2022), serta kipas yang berfungsi membuang udara keluar dari ruang tanam guna menjaga sirkulasi udara. Ketiga aktuator tersebut tidak dihubungkan langsung ke pin GPIO ESP32, melainkan dikendalikan melalui modul relai yang berfungsi sebagai sakelar elektronik. Penggunaan relai dipilih karena mampu memberikan isolasi galvanik antara sisi sinyal kendali ESP32 yang bertegangan rendah (3.3 V) dan sisi daya aktuator yang bertegangan lebih tinggi (12 V), sehingga risiko kerusakan pada mikrokontroler akibat arus balik atau transien *startup* aktuator dapat diminimalkan. Pengaktifan ketiga relai tersebut dikoordinasikan secara terprogram oleh mikrokontroler berdasarkan hasil pembacaan sensor, agar sistem dapat beroperasi secara stabil dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.



Gambar 3. Blok Diagram Sistem



Gambar 4. Realisasi Rangkain Kendali

2.4 Teknik Pengujian dan Pengambilan Data

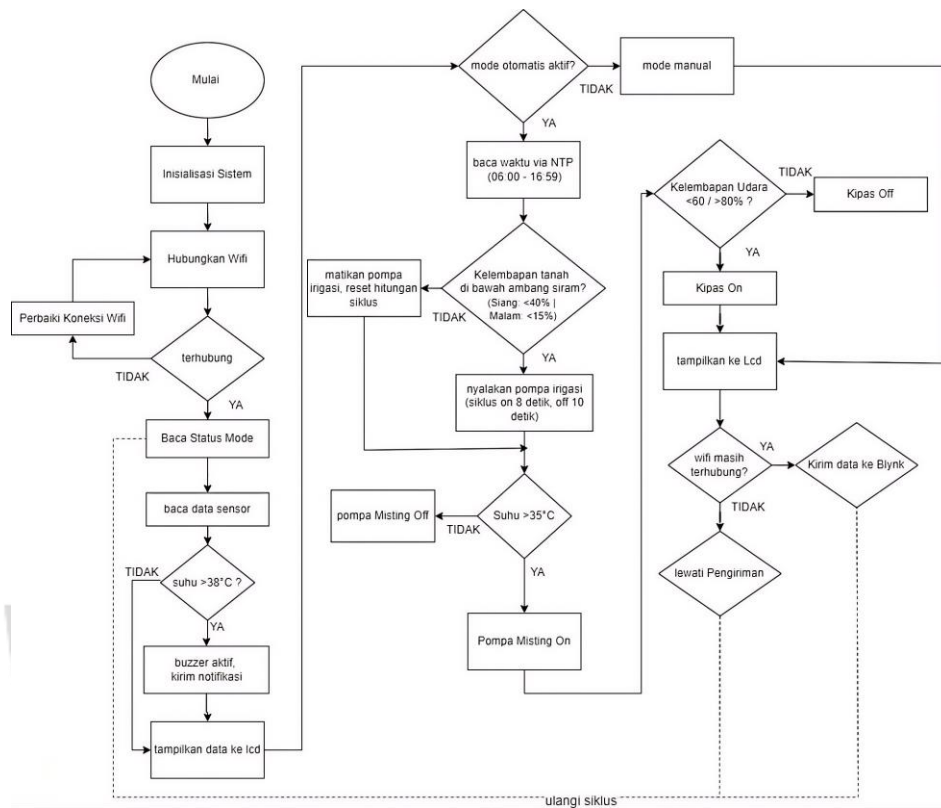
Perancangan perangkat lunak pada ESP32 diformulasikan menggunakan algoritma *Rule-Based Thresholding* atau kontrol ambang batas bersyarat, yaitu pendekatan kendali yang mengambil keputusan aktuasi berdasarkan perbandingan nilai sensor terhadap nilai ambang yang telah ditetapkan sebelumnya. Pendekatan ini dipilih karena sederhana untuk diimplementasikan pada mikrokontroler berdaya rendah, namun tetap cukup responsif untuk kebutuhan pengendalian iklim mikro dan irigasi pada skala *greenhouse* kecil. Logika sistem memproses instruksi aktuator secara spesifik untuk masing-masing parameter yang dipantau. Pada parameter suhu udara, pompa *misting* akan diaktifkan secara seketika apabila pembacaan sensor DHT22 melampaui ambang atas sebesar 35°C, dengan tujuan menurunkan suhu udara di dalam *greenhouse* melalui mekanisme pendinginan evaporatif sebelum kondisi tersebut menimbulkan stres panas (*heat stress*) pada tanaman anggur, merujuk pada penelitian Dou et al. (2024) yang menetapkan 35°C sebagai kondisi lingkungan alami (kontrol) bagi tanaman anggur, sedangkan suhu di atas kisaran tersebut (40°C) mulai memicu kerusakan fisiologis dan perubahan ekspresi gen akibat stres panas.

Pada parameter kelembapan udara, kipas akan menyala apabila nilai kelembapan relatif (RH) berada di luar rentang ideal, baik karena kelembapan terlalu tinggi yang berisiko memicu pertumbuhan jamur, maupun karena diperlukan sirkulasi udara tambahan untuk menstabilkan suhu di dalam ruang tanam. Ambang batas yang diterapkan pada logika ini adalah rentang RH 60-80%, sehingga kipas akan aktif secara otomatis apabila pembacaan sensor DHT22 menunjukkan nilai RH di bawah 60% atau di atas 80%, untuk mengembalikan kondisi kelembapan udara ke rentang yang sesuai bagi pertumbuhan tanaman anggur di dalam *greenhouse* (Faqih, 2023).

Berbeda dengan kedua aktuator pendingin tersebut, aktuator irigasi tidak dikendalikan oleh sebuah modul *Real-Time Clock* (RTC) fisik yang berdiri sendiri, melainkan oleh referensi waktu yang diperoleh ESP32 melalui protokol *Network Time Protocol* (NTP) dari jaringan internet, sehingga ketepatan jadwal irigasi tidak memerlukan komponen perangkat keras RTC tambahan. Berdasarkan periode siang atau malam yang ditentukan dari hasil pembacaan waktu tersebut, ESP32 tidak langsung mengaktifkan pompa irigasi, melainkan terlebih dahulu memvalidasi keputusan tersebut dengan membaca nilai aktual dari *Capacitive Soil Moisture Sensor*. Apabila hasil validasi menunjukkan kondisi tanah memerlukan penyiraman, pompa irigasi tidak diaktifkan secara kontinu, melainkan dieksekusi dalam mode pulsa (*pulse irrigation*), yaitu menyala selama 8 detik (empat siklus pembacaan), kemudian mati selama 10 detik (lima siklus pembacaan), sebelum dievaluasi ulang.

Validasi berlapis ini diterapkan dengan ambang batas kelembapan tanah yang berbeda menyesuaikan waktu eksekusi, yaitu di bawah 40% pada siang hari (Faqih, 2023), sedangkan pada malam hari pompa diaktifkan apabila kelembapan tanah berada di bawah 15%, atau di bawah 25% apabila siklus pulsa irigasi sedang berjalan. Perbedaan ambang batas tersebut mempertimbangkan tingkat evapotranspirasi yang lebih tinggi pada siang hari akibat suhu dan radiasi matahari, sehingga membutuhkan ambang yang lebih longgar dibanding malam hari ketika penguapan air dari media tanam relatif lebih rendah (Dayer et al., 2021). Apabila kelembapan tanah masih berada di atas ambang batas yang relevan, misalnya akibat hujan sebelumnya, eksekusi pompa akan dibatalkan secara otomatis untuk mencegah penyiraman berlebih (*overwatering*) dan menghemat penggunaan daya baterai. Sebagai lapisan proteksi tambahan, sistem juga memvalidasi ketersediaan air pada tandon melalui pembacaan jarak dari sensor ultrasonik HC-SR04 sebelum mengeksekusi perintah pompa irigasi. Apabila jarak yang terbaca menunjukkan ketinggian air berada di bawah ambang batas minimum, eksekusi pompa akan dibatalkan secara otomatis (*cut-off*) meskipun kondisi kelembapan tanah menunjukkan kebutuhan penyiraman, sehingga mencegah kondisi pompa menyala tanpa aliran air (*dry running*) yang berisiko merusak komponen pompa.

Setelah seluruh logika kendali tersebut selesai diintegrasikan ke dalam program ESP32, prosedur pengujian dilanjutkan dengan membandingkan pembacaan metrik sensor ESP32 terhadap instrumen standar komersial, yaitu Termometer HTC-1 untuk parameter suhu dan kelembapan udara, serta *Soil Meter* untuk parameter kelembapan tanah. Perbandingan ini dilakukan untuk menentukan persentase simpangan (*error*) kalibrasi antara nilai yang terbaca oleh sensor purwarupa dan nilai yang terbaca oleh instrumen acuan, sehingga akurasi data yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh sistem dapat dipastikan layak sebelum purwarupa diujikan pada kondisi operasional yang sesungguhnya.



Gambar 5. Diagram Alir Sistem



Gambar 6. Tampilan Blynk

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 HASIL KALIBRASI

Tabel 1. Kalibrasi sensor Suhu dan Kelembapan Udara

Waktu	Rata-rata <i>error</i> suhu (%)	Rata-rata <i>error</i> RH (%)
Pagi (± 08.00)	1.11	3.24
Siang (± 12.50)	1.63	6.79
Sore (± 15.50)	1.66	2.83

Sebelum membahas hasil kalibrasi, berikut disampaikan definisi singkat sejumlah singkatan dan istilah yang digunakan pada bagian ini agar tidak menimbulkan kerancuan. DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara secara bersamaan. HTC-1 adalah termometer-higrometer digital komersial yang digunakan sebagai alat ukur acuan (standar pembandingan) untuk memvalidasi hasil pembacaan sensor DHT22. RH (*Relative Humidity* atau kelembapan relatif) menyatakan persentase kandungan uap air di udara dibandingkan dengan kapasitas maksimum uap air yang dapat ditampung udara pada suhu tersebut. *Soil Meter* merupakan alat ukur kelembapan tanah komersial yang digunakan sebagai acuan pembandingan terhadap *Capacitive Soil Moisture Sensor*, yaitu sensor kelembapan tanah berbasis kapasitansi yang digunakan pada purwarupa alat.

Rata-rata *error* pada Tabel 1 dihitung dari selisih nilai sensor DHT22 terhadap nilai HTC-1 ($e = |(X_{\text{sensor}} - X_{\text{acuan}})/X_{\text{acuan}}| \times 100\%$) pada lima titik pengukuran tiap sesi. Berdasarkan Tabel 1, hasil kalibrasi pada tiga sesi pengukuran menunjukkan rata-rata *error* suhu yang relatif kecil dan konsisten, yaitu 1.11% pada sesi pagi, 1.63% pada sesi siang, dan 1.66% pada sesi sore. Pola serupa juga terlihat pada *error* kelembapan udara (RH), yaitu sebesar 3.24% pada sesi pagi, 6.79% pada sesi siang, dan 2.83% pada sesi sore. Selisih *error* antar sesi pengukuran tergolong kecil, dengan rentang *error* suhu hanya antara 1.11% hingga 1.66% dan rentang *error* RH antara 2.83% hingga 6.79%, yang mengindikasikan bahwa akurasi sensor tidak terpengaruh secara signifikan oleh perbedaan kondisi lingkungan pada pagi, siang, maupun sore hari. Kondisi tanah lapangan yang tercatat pada setiap sesi juga sejalan dengan kondisi suhu udara yang lebih tinggi pada siang hari, yang turut menjelaskan mengapa *error* pada sesi tersebut sedikit lebih besar dibandingkan dua sesi lainnya.

Tabel 2. Kalibrasi sensor Kelembapan Tanah

Waktu	Rata-rata nilai kelembapan sensor (%)	Kondisi tanah acuan (<i>Soil Meter</i>)
Pagi (± 08.00)	47.4	Normal
Siang (± 12.50)	34.2	Kering
Sore (± 15.50)	48.8	Normal

Kalibrasi sensor *Capacitive Soil Moisture* juga dilakukan pada ketiga sesi yang sama, yang ditampilkan pada tabel 2 dengan membandingkan kategori kondisi tanah hasil pembacaan *Soil Meter* terhadap rata-rata nilai yang dihasilkan sensor (Abdelmoneim et al., 2025). Berbeda dengan kalibrasi suhu dan RH, kelembapan tanah tidak dapat dinyatakan dalam bentuk *error* numerik karena *Soil Meter* sebagai alat ukur acuan hanya menghasilkan keluaran berupa kategori kondisi tanah, bukan nilai numerik yang dapat dikurangkan terhadap nilai sensor. Nilai yang dituliskan pada tabel 2 karena itu merupakan rata-rata dari lima nilai kelembapan yang dibaca langsung oleh sensor pada setiap sesi, kemudian dicocokkan secara kualitatif terhadap kategori acuan *Soil Meter*. Pada sesi pagi, kondisi tanah tercatat normal/lembab dengan rata-rata nilai sebesar 47.4%, sedangkan pada sesi siang kondisi tanah berubah menjadi kering dengan rata-rata nilai turun signifikan menjadi 34.2%. Pada sesi sore, kondisi tanah kembali ke kategori normal/lembab dengan rata-rata nilai sebesar 48.8%, mendekati nilai pada sesi pagi. Perubahan nilai ini konsisten dan sejalan dengan kategori kondisi tanah yang diamati secara manual menggunakan *Soil Meter* pada setiap sesi, yaitu nilai yang lebih rendah berkorespondensi dengan kondisi tanah yang lebih kering, sedangkan nilai yang lebih tinggi berkorespondensi dengan kondisi tanah yang lebih lembab.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sensor DHT22 dan sensor *Capacitive Soil Moisture* yang digunakan pada purwarupa memiliki tingkat akurasi dan keandalan yang baik. Sensor DHT22 menunjukkan deviasi *error* suhu yang tidak melebihi 1.7% dan deviasi *error* RH yang tidak melebihi 6.8%. Pada seluruh sesi pengukuran, sementara sensor *Capacitive Soil Moisture* menunjukkan respons nilai yang konsisten terhadap perubahan kategori kondisi tanah aktual di lapangan tanpa satu pun penyimpangan kategori antara hasil sensor dan *Soil Meter* pada ketiga sesi pengujian. Konsistensi kedua sensor ini menjadi dasar yang penting bagi keandalan sistem, mengingat data suhu dan kelembapan udara dari sensor DHT22 digunakan secara langsung oleh ESP32 sebagai parameter pengambilan keputusan dalam algoritma *rule-based thresholding* untuk mengaktifkan pompa *misting* pada ambang suhu di atas 35°C dan kipas pada kondisi RH di luar rentang 60-80%, sedangkan nilai dari sensor *Capacitive Soil*

Moisture menjadi dasar keputusan ambang batas kelembapan tanah (40% pada siang hari serta di bawah 15% pada kondisi awal atau di bawah 25% apabila siklus pulsa irigasi sedang berjalan, pada malam hari) yang menentukan aktivasi pompa irigasi dalam mode pulsa. Tingkat akurasi yang baik dan tidak bergantung pada waktu pengukuran ini memastikan bahwa keputusan kontrol iklim mikro maupun irigasi yang dihasilkan sistem tetap akurat sepanjang hari.



Gambar 7. Perbandingan kelembapan tanah



Gambar 8. Perbandingan suhu & kelembapan udara

Tabel 3. Validasi Tegangan Sensor INA219

Waktu	Multimeter (V)	Sensor INA219 (V)	Error (%)
08.00	13.05	13.03	0.15
11.00	13.10	13.07	0.23
13.00	13.12	13.09	0.23
15.00	13.08	13.05	0.23
18.00	13.00	12.97	0.23

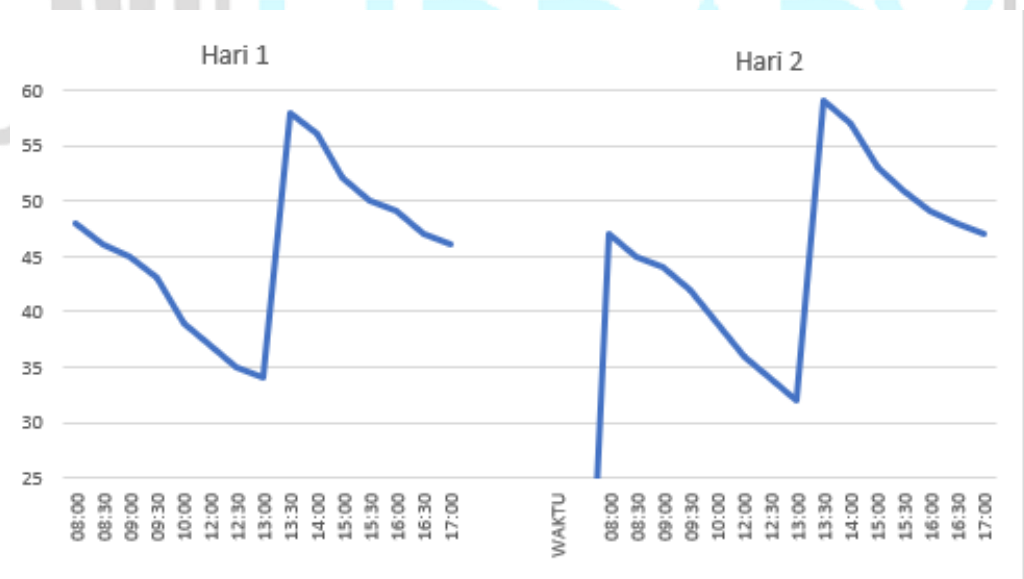
selain kalibrasi sensor DHT22 dan *Capacitive Soil Moisture*, dilakukan juga validasi terhadap pembacaan tegangan sensor INA219 yang digunakan untuk memantau stabilitas tegangan sumber (baterai) pada sistem. Validasi dilakukan pada hari pengujian yang berbeda dari sesi kalibrasi tabel 1 dan tabel 2, dengan membandingkan nilai tegangan yang dibaca oleh INA219 terhadap nilai tegangan acuan yang diukur menggunakan multimeter pada lima titik waktu. Rata-rata *error* pada tabel 3 dihitung dengan rumus yang sama, yaitu $e = |(X_{\text{sensor}} - X_{\text{acuan}}) / X_{\text{acuan}}| \times 100\%$. Berdasarkan Tabel 3, sensor INA219 menunjukkan tingkat akurasi

yang sangat baik dalam membaca tegangan baterai, dengan *error* yang konsisten kecil pada seluruh titik waktu pengukuran, berkisar antara 0.15% hingga 0.23%, dengan rata-rata *error* sebesar 0.21%. Hasil ini membuktikan bahwa data tegangan yang dibaca oleh INA219 dapat diandalkan sebagai representasi tegangan aki secara aktual, sehingga mendukung validitas data konsumsi daya yang disajikan pada Tabel 8.

3.2 Hasil Pengujian Logika Kontrol

Pengujian logika kontrol irigasi bertujuan untuk memverifikasi apakah sistem mampu mengaktifkan dan menonaktifkan pompa irigasi secara tepat berdasarkan nilai kelembapan tanah yang terdeteksi oleh sensor kapasitif. Ambang batas yang diterapkan adalah $\leq 40\%$ untuk kondisi kering yang memicu pompa aktif dengan pola pulsa On: 8 detik, Off: 10 detik, dan $> 40\%$ untuk kondisi lembab atau basah yang menjaga pompa dalam keadaan mati.

Verifikasi status pompa dilakukan melalui pengamatan fisik langsung di lapangan yang dikonfirmasi secara bersamaan dengan pemantauan *dashboard* Blynk, serta diperkuat oleh rekaman pola sinyal pulsa pada setiap titik pengamatan. Rekaman pola sinyal pulsa yang dimaksud merujuk pada urutan status *on/off* pompa yang dicatat pada kolom Pola Pulsa di Tabel 4 dan Tabel 5 untuk setiap titik waktu pengamatan, sehingga durasi aktif dan tidak aktifnya pompa dapat ditelusuri secara rinci sebagai bukti pendukung hasil pengamatan fisik dan *dashboard* Blynk.



Gambar 9. Grafik nilai kelembapan tanah

Gambar 9 memperlihatkan dinamika nilai kelembapan tanah selama dua hari pengujian. Pola penurunan kelembapan di pagi hingga siang hari dan lonjakan pasca-irigasi terlihat konsisten pada kedua hari. Data lengkap hasil pengujian logika kontrol irigasi disajikan pada

Tabel 4 & 5 berikut.

Tabel 4. Data Pengujian Logika Kontrol Irigasi – Hari 1

No	Waktu	Kondisi Tanah	Soil (%)	Pompa Irigasi	Pola Pulsa
1	08:00	Lembab	48	Off	On: 0 s, Off: 0 s
2	08:30	Lembab	46	Off	On: 0 s, Off: 0 s
3	09:00	Lembab	45	Off	On: 0 s, Off: 0 s
4	09:30	Lembab	43	Off	On: 0 s, Off: 0 s
5	10:00	Kering	39	On	On: 8 s, Off: 10 s
6	12:00	Kering	37	On	On: 8 s, Off: 10 s
7	12:30	Kering	35	On	On: 8 s, Off: 10 s
8	13:00	Kering	34	On	On: 8 s, Off: 10 s
9	13:30	Basah (Pasca-Irigasi)	58	Off	On: 0 s, Off: 0 s
10	14:00	Basah	56	Off	On: 0 s, Off: 0 s
11	15:00	Lembab	52	Off	On: 0 s, Off: 0 s
12	15:30	Lembab	50	Off	On: 0 s, Off: 0 s
13	16:00	Lembab	49	Off	On: 0 s, Off: 0 s
14	16:30	Lembab	47	Off	On: 0 s, Off: 0 s
15	17:00	Lembab	46	Off	On: 0 s, Off: 0 s

Tabel 5. Data Pengujian Logika Kontrol Irigasi – Hari 2

No	Waktu	Kondisi Tanah	Soil (%)	Pompa Irigasi	Pola Pulsa
1	08:00	Lembab	47	Off	On: 0 s, Off: 0 s
2	08:30	Lembab	45	Off	On: 0 s, Off: 0 s
3	09:00	Lembab	44	Off	On: 0 s, Off: 0 s
4	09:30	Lembab	42	Off	On: 0 s, Off: 0 s
5	10:00	Kering	39	On	On: 8 s, Off: 10 s
6	12:00	Kering	36	On	On: 8 s, Off: 10 s
7	12:30	Kering	34	On	On: 8 s, Off: 10 s
8	13:00	Kering	32	On	On: 8 s, Off: 10 s
9	13:30	Basah (Pasca-Irigasi)	59	Off	On: 0 s, Off: 0 s
10	14:00	Basah	57	Off	On: 0 s, Off: 0 s
11	15:00	Lembab	53	Off	On: 0 s, Off: 0 s

12	15:30	Lembab	51	Off	On: 0 s, Off: 0 s
13	16:00	Lembab	49	Off	On: 0 s, Off: 0 s
14	16:30	Lembab	48	Off	On: 0 s, Off: 0 s
15	17:00	Lembab	47	Off	On: 0 s, Off: 0 s

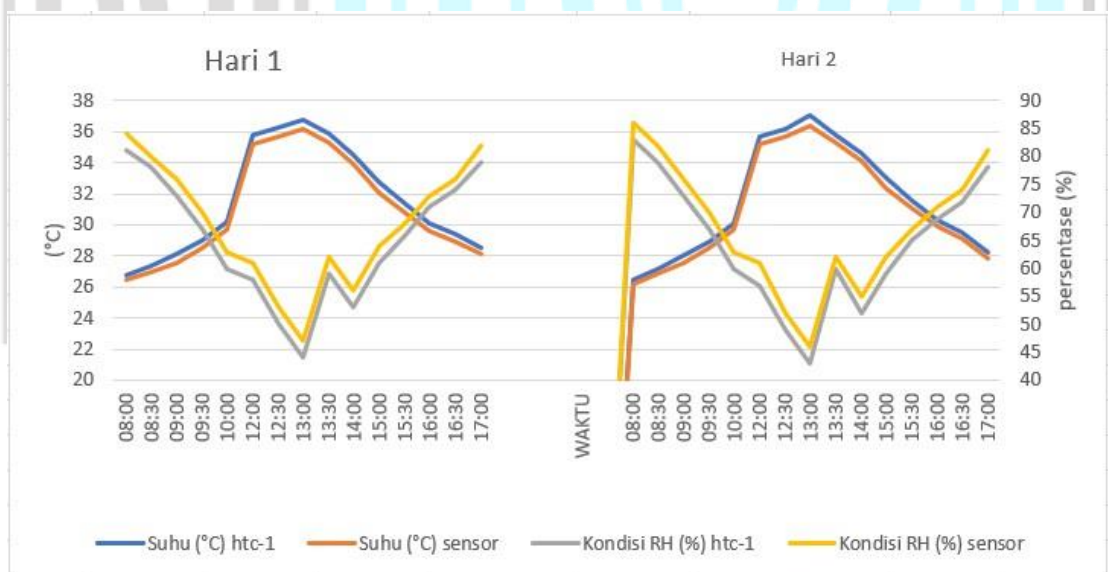
Berdasarkan Tabel 4, pada Hari 1 nilai kelembapan tanah berada pada kisaran 48% saat pengamatan dimulai pukul 08:00 WIB dalam kondisi lembab, sehingga pompa irigasi terjaga dalam keadaan mati. Nilai kelembapan terus menurun secara bertahap hingga menyentuh angka 39% pada pukul 10:00 WIB. Pada titik inilah sistem pertama kali mendeteksi kondisi kering ($\leq 40\%$) dan secara otomatis mengaktifkan pompa irigasi dengan pola pulsa On: 8 detik, Off: 10 detik. Pompa tetap beroperasi dalam mode pulsa seiring nilai kelembapan yang terus merosot ke titik terendah 34% pada pukul 13:00 WIB. Setelah siklus irigasi berlangsung, nilai kelembapan melonjak tajam ke 58% pada pukul 13:30 WIB yang mengindikasikan tanah telah menerima air secara cukup, dan pompa langsung dimatikan oleh sistem karena nilai kelembapan kembali melampaui ambang 40%. Nilai kemudian melandai secara natural ke 46% menjelang pukul 17:00 WIB. Penurunan bertahap yang masih terjadi pada rentang pukul 10:00-13:00 WIB, meskipun pompa irigasi telah aktif sejak pukul 10:00 WIB, disebabkan oleh mode pulsa yang sengaja tidak menyiram secara kontinu (On: 8 detik, Off: 10 detik) agar air sempat terserap media tanam dan mencegah pemborosan daya baterai. Pada rentang waktu tersebut laju evapotranspirasi akibat suhu dan radiasi matahari siang hari masih lebih tinggi dibandingkan laju penambahan air dari siklus pulsa yang berlangsung singkat, sehingga nilai kelembapan tanah tetap menunjukkan tren menurun secara bertahap sebelum akhirnya melonjak signifikan pada pukul 13:30 WIB setelah akumulasi beberapa siklus pulsa irigasi tercapai.

Tabel 5 menunjukkan pola yang sangat konsisten pada Hari 2. Nilai kelembapan dimulai pada 47% (08:00 WIB) dan turun hingga titik terkering 32% pada pukul 13:00 WIB. Pompa kembali teraktivasi saat nilai menyentuh 39% (10:00 WIB) dan berhasil mengembalikan kelembapan ke 59% pasca-irigasi, sebelum melandai ke 47% pada akhir sesi. Seluruh titik data pada kedua hari pengujian menunjukkan kesesuaian logika yang sesuai, yang berarti tidak terdapat kejadian di mana pompa gagal menyala saat tanah kering maupun gagal mati saat tanah sudah lembab kembali. Konsistensi ini membuktikan bahwa algoritma ambang batas irigasi yang diterapkan pada ESP32 bekerja dengan keandalan baik selama periode pengujian. Sebagai data pembanding, Hari 1 mencatat kelembapan awal 48%, titik terkering 34% pada pukul 13:00 WIB, dan lonjakan pasca-irigasi ke 58%, sedangkan Hari 2 menunjukkan pola yang sebanding dengan kelembapan awal 47%, titik terkering sedikit lebih rendah yaitu 32% pada pukul 13:00 WIB, dan lonjakan pasca-irigasi ke 59%. Selisih titik terkering antar kedua

hari (34% berbanding 32%) masih berada dalam rentang wajar akibat variasi kondisi cuaca harian, tanpa mengubah waktu aktivasi maupun pola kerja pompa, sehingga logika kendali dapat dinyatakan konsisten pada kedua hari pengujian.

3.3 Hasil Pengujian Fungsi Pompa ke Mode *Misting* serta peran Kipas sebagai Pendukung

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kemampuan sistem kendali pompa air dalam mengaktifkan pompa *misting* berdasarkan pembacaan suhu udara oleh sensor DHT22. Kipas diintegrasikan sebagai aktuator sekunder untuk mendukung sirkulasi udara di dalam *greenhouse* selama maupun setelah pompa *misting* aktif bekerja, sebagaimana tercatat pada kolom status Kipas di Tabel 6 dan 7. Lonjakan suhu signifikan terjadi pada pukul 12.00 WIB ketika sensor membaca 35.2°C dengan RH 61%. Nilai suhu yang melampaui ambang 35°C ini langsung memicu ESP32 untuk mengaktifkan pompa *misting* (mode pendinginan). Mekanisme pendinginan evaporatif mulai bekerja menurunkan suhu ruang. Verifikasi status aktuator dilakukan melalui pengamatan fisik langsung yang dikonfirmasi dengan tampilan *widget* status pada *dashboard* aplikasi Blynk secara *real-time*.



Gambar 10. Grafik suhu dan kelembapan udara antara sensor DHT22 dengan HTC-1

Grafik pada gambar 10 memperlihatkan tren suhu yang naik dari pagi ke siang, kemudian turun kembali di sore hari, dengan kelembapan udara bergerak berlawanan arah. Garis sensor DHT22 dan garis referensi HTC-1 terlihat sangat berdekatan sepanjang waktu, mengonfirmasi akurasi sensor. Data lengkap hasil pengujian logika kendali pompa *misting* disajikan pada Tabel 6 & 7 berikut.

Tabel 6. Data Pengujian Pompa *Misting* – Hari 1

No	Waktu	Suhu HTC-1 (°C)	Suhu Sensor (°C)	RH HTC-1 (%)	RH Sensor (%)	Pompa <i>Misting</i>	Kipas (pendukung)
1	08:00	26.8	26.5	81	84	Mati	On
2	08:30	27.4	27	78	80	Mati	Mati
3	09:00	28.1	27.6	73	76	Mati	Mati
4	09:30	29	28.5	67	70	Mati	Mati
5	10:00	30.2	29.7	60	63	Mati	Mati
6	12:00	35.8	35.2	58	61	On	Mati
7	12:30	36.3	35.7	50	53	On	On
8	13:00	36.8	36.2	44	47	On	On
9	13:30	35.9	35.3	59	62	On	Mati
10	14:00	34.5	33.9	53	56	Mati	On
11	15:00	32.7	32.1	61	64	Mati	Mati
12	15:30	31.4	30.8	66	68	Mati	Mati
13	16:00	30.1	29.6	71	73	Mati	Mati
14	16:30	29.4	28.9	74	76	Mati	Mati
15	17:00	28.5	28.1	79	82	Mati	On

Tabel 7. Data Pengujian Pompa *Misting* – Hari 2

No	Waktu	Suhu HTC-1 (°C)	Suhu Sensor (°C)	RH HTC-1 (%)	RH Sensor (%)	Pompa <i>Misting</i>	Kipas (pendukung)
1	08:00	26.5	26.2	83	86	Mati	On
2	08:30	27.2	26.9	79	82	Mati	On
3	09:00	28	27.6	73	76	Mati	Mati
4	09:30	28.9	28.5	67	70	Mati	Mati
5	10:00	30.1	29.7	60	63	Mati	Mati
6	12:00	35.7	35.2	57	61	On	Mati
7	12:30	36.2	35.7	49	52	On	On
8	13:00	37.1	36.4	43	46	On	On
9	13:30	35.8	35.3	60	62	On	Mati
10	14:00	34.6	34.1	52	55	Mati	On
11	15:00	33	32.4	59	62	Mati	Mati
12	15:30	31.6	31.1	65	67	Mati	Mati
13	16:00	30.3	29.9	69	71	Mati	Mati

14	16:30	29.5	29.1	72	74	Mati	Mati
15	17:00	28.2	27.8	78	81	Mati	On

Berdasarkan Tabel 6, pada Hari 1 pukul 08.00 WIB suhu terukur 26.5°C dengan RH 84%. Dalam kondisi ini, sistem mengaktifkan kipas untuk meningkatkan sirkulasi udara guna mengurangi kelembapan yang relatif tinggi. Pompa *misting* dalam keadaan mati karena suhu masih jauh di bawah ambang kritis. Memasuki pukul 08.30 WIB, suhu naik menjadi 27°C dan RH turun ke 80%, sehingga kipas dimatikan karena kelembapan telah kembali ke rentang normal. Kondisi stabil ini bertahan hingga pukul 10.00 WIB dengan suhu 29.7°C dan RH 63%, tanpa ada aktuatur yang aktif. Lonjakan suhu signifikan terjadi pada pukul 12.00 WIB ketika sensor membaca 35.2°C dengan RH 61%. Nilai suhu yang melampaui ambang 35°C ini langsung memicu ESP32 untuk mengaktifkan pompa *misting*. Mekanisme pendinginan evaporatif mulai bekerja menurunkan suhu ruang. Pada pukul 13.00 WIB, suhu mencapai puncak 36.2°C dengan RH 47%. Dalam kondisi ini, kipas diaktifkan sebagai aktif bersamaan dengan pompa *misting*, sesuai status yang tercatat pada Tabel 6. Setelah pukul 14.00 WIB, suhu mulai turun ke 33.9°C, sehingga pompa *misting* kembali ke mode siaga. Kipas tetap aktif untuk beberapa saat guna membantu menstabilkan kelembapan ruang dan menjaga sirkulasi. Menjelang pukul 17.00 WIB, suhu turun ke 28.1°C dengan RH naik ke 82%, sehingga kipas diaktifkan kembali sebagai respon terhadap tingginya kelembapan yang memerlukan sirkulasi udara tambahan.

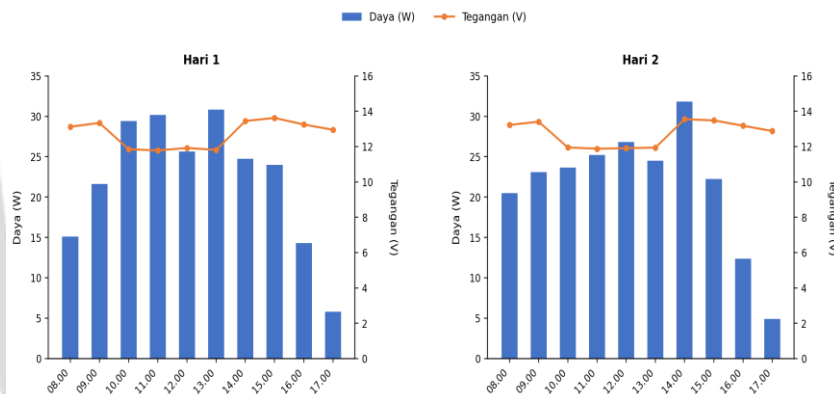
Pola serupa terlihat pada Hari 2 (Tabel 7). Suhu awal 26.2°C dengan RH 86% pada pukul 08.00 WIB memicu kipas aktif untuk mengurangi kelembapan berlebih. Suhu puncak 36.4°C dengan RH 46% pada pukul 13.00 WIB kembali membuktikan kemampuan sistem dalam mengaktifkan pompa *misting*, dengan kipas yang turut aktif untuk mendistribusikan kabut. Saat suhu turun di bawah 35°C pada pukul 14.00 WIB, pompa *misting* mati, dan kipas berfungsi mengeringkan sisa kabut. Menjelang pukul 17.00 WIB, RH yang naik ke 81% memicu kipas aktif untuk mencegah pengembunan.

Berdasarkan seluruh titik data pada kedua hari pengujian, dapat disimpulkan bahwa logika kendali pompa *misting* bekerja dengan tingkat keandalan yang baik, tanpa adanya kegagalan dalam mendeteksi suhu kritis >35°C dan mengaktifkan pompa. Pompa *misting* selalu aktif saat dibutuhkan dan mati setelah suhu turun. Kipas sebagai aktuatur sekunder juga menunjukkan respons yang konsisten dalam mendukung proses pendinginan maupun menjaga sirkulasi udara saat kelembapan relatif tinggi. Dengan demikian, sistem kendali pompa air yang dirancang mampu mengatur dua unit pompanya secara adaptif: pompa irigasi untuk kebutuhan air tanah, dan pompa *misting* untuk perlindungan tanaman dari stres panas, tanpa perlu

menambahkan modul kendali iklim mikro yang terpisah.

3.4 Hasil Pemantauan Keluaran Daya Panel Surya (PLTS)

Pengujian pemantauan keluaran daya PLTS bertujuan untuk mengevaluasi performa kelistrikan panel surya 50 Wp sebagai sumber energi primer sistem, mencakup tegangan, arus, dan daya aktual yang dihasilkan sepanjang jam operasional (08.00–17.00 WIB) selama dua hari pengujian. Data diperoleh dari hasil pengukuran multimeter yang terhubung pada jalur keluaran panel surya, sehingga performa PLTS dapat dipantau secara kuantitatif dan tidak hanya diasumsikan dari spesifikasi datasheet komponen.



Gambar 11. Grafik tegangan dan daya keluaran panel surya

Berdasarkan grafik tersebut, pada Hari 1 daya keluaran panel surya tercatat sebesar 15.09 W pada pukul 08.00 WIB, kemudian meningkat secara bertahap seiring naiknya intensitas radiasi matahari hingga mencapai titik puncak sebesar 30.82 W pada pukul 13.00 WIB dengan tegangan 11.81 V. Setelah melewati titik puncak, daya kembali menurun hingga 5.83 W pada pukul 17.00 WIB seiring berkurangnya intensitas cahaya matahari menjelang sore. Pola yang serupa terlihat pada Hari 2, dengan daya awal sebesar 20.49 W pada pukul 08.00 WIB, mencapai puncak sebesar 31.84 W pada pukul 14.00 WIB, dan kembali menurun menjadi 4.89 W pada pukul 17.00 WIB. Konsistensi pola kenaikan dan penurunan daya pada kedua hari pengujian menunjukkan bahwa keluaran panel surya merespons secara wajar terhadap pergerakan intensitas radiasi matahari sepanjang hari, dengan rata-rata daya keluaran sebesar 22.16 W pada Hari 1 dan 21.5 W pada Hari 2.

Untuk mengonfirmasi keterkaitan antara pola keluaran daya tersebut dengan kondisi iklim aktual di lokasi pengujian, dilakukan pencatatan kondisi cuaca kualitatif pada setiap sesi pengukuran, sebagaimana disajikan pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Kondisi Cuaca dan Daya Keluaran Panel Surya

Waktu	Hari 1				Hari 2			
	Cuaca	Tegangan	Arus	Daya	Cuaca	Tegangan	Arus	Daya

		(V)	(A)	(W)		(V)	(A)	(W)
08.00	Cerah Berawan	13.12	1.15	15.09	Terik	13.22	1.55	20.49
09.00	Cerah Berawan	13.34	1.62	21.61	Cerah Berawan	13.41	1.72	23.07
10.00	Terik	11.85	2.48	29.39	Cerah Berawan	11.95	1.98	23.66
11.00	Terik	11.78	2.56	30.16	Cerah Berawan	11.88	2.12	25.19
12.00	Cerah Berawan	11.92	2.15	25.63	Cerah Berawan	11.91	2.25	26.80
13.00	Terik	11.81	2.61	30.82	Cerah Berawan	11.94	2.05	24.48
14.00	Cerah Berawan	13.45	1.84	24.75	Terik	13.55	2.35	31.84
15.00	Terik	13.62	1.76	23.97	Cerah Berawan	13.48	1.65	22.24
16.00	Cerah Berawan	13.25	1.08	14.31	Cerah Berawan	13.18	0.94	12.39
17.00	Cerah Berawan	12.95	0.45	5.83	Cerah Berawan	12.88	0.38	4.89

Variasi nilai daya pada beberapa titik pengamatan, khususnya penurunan daya pada pukul 15.00 WIB Hari 1 (23.97 W), turut dipengaruhi oleh kondisi cuaca aktual di lokasi pengujian. Kondisi cuaca “Terik” pada beberapa jam pengamatan cenderung menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan kondisi “Cerah Berawan” pada jam yang berdekatan, mengindikasikan bahwa tutupan awan turut memengaruhi intensitas radiasi yang diterima panel surya meskipun secara umum tren harian tetap mengikuti pola pergerakan matahari. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa panel surya 50 Wp yang digunakan pada sistem mampu menghasilkan daya listrik secara konsisten sepanjang jam operasional siang hari, dengan daya rata-rata sebesar ± 21.8 W dan daya puncak mencapai ± 31.8 W pada kondisi cuaca optimal. Pola keluaran daya yang konsisten pada kedua hari pengujian ini menjadi dasar bagi analisis kecukupan suplai energi terhadap kebutuhan konsumsi aktuator yang dibahas pada sub-bab berikutnya.

3.5 Hasil Pengukuran Konsumsi Daya Sistem

Pengujian pengukuran konsumsi daya sistem bertujuan untuk mengetahui besarnya daya listrik yang dibutuhkan oleh masing-masing aktuator pada berbagai kondisi operasional, sebagai dasar evaluasi apakah suplai daya dari PLTS mencukupi kebutuhan beban sistem secara keseluruhan. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter pada tegangan kerja 12 V untuk empat kondisi operasional, yaitu pompa irigasi aktif, pompa *misting* aktif, kipas aktif, serta kondisi seluruh aktuator aktif secara bersamaan.

Tabel 9. konsumsi daya

no	Kondisi	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)
1	Pompa Irigasi On	11.9	0.45	5.36
2	Pompa <i>Misting</i> On	11.8	1.1	12.98

3	Kipas On	11.7	1	11.7
4	Semua Beban	11.8	2.55	30.09

Tabel 9 menyajikan data konsumsi daya dari masing-masing aktuator yang digunakan pada sistem. Pengukuran daya dilakukan dengan mengintegrasikan dua instrumen utama: sensor INA219 digunakan untuk pemantauan tegangan sistem beban melalui platform IoT, sedangkan arus yang ditarik oleh masing-masing beban diukur secara presisi menggunakan instrumen multimeter. Mengingat topologi rangkaian sistem menggunakan konfigurasi paralel, maka tegangan kerja pada setiap aktuator adalah identik dengan tegangan sumber (aki) yang terukur oleh sensor INA219. Nilai daya konsumsi (Watt) kemudian dihitung menggunakan rumus daya DC standar ($P = V \times I$). Berdasarkan hasil pengujian, Pompa *Misting* menunjukkan konsumsi daya tertinggi sebesar 12.98 Watt, yang mengindikasikan bahwa aktuator tersebut memiliki beban operasional paling dominan dalam sistem kendali ini. Data ini sekaligus memvalidasi bahwa sistem kendali IoT mampu memantau parameter kelistrikan utama sistem.

Analisis data pada tabel 9 menunjukkan adanya variasi konsumsi daya yang signifikan antar aktuator. Pompa *Misting* tercatat memiliki konsumsi daya tertinggi, yaitu sebesar 12.98 Watt, lalu untuk Pompa Irigasi sebesar 5.36 Watt dan Kipas DC sebesar 11.7 Watt. Tingginya konsumsi daya pada Pompa *Misting* dan Kipas DC menegaskan bahwa komponen pengondisi suhu lingkungan menyedot arus yang lebih dominan dibandingkan dengan sistem irigasi tetes. Variasi beban ini menegaskan pentingnya manajemen energi pada sistem PLTS untuk memastikan bahwa suplai tegangan dari baterai tetap stabil, baik saat aktuator bekerja secara parsial maupun seluruh beban aktif secara bersamaan. Secara keseluruhan, hasil pengukuran ini mengonfirmasi bahwa seluruh aktuator beroperasi dalam rentang efisiensi yang diharapkan, di mana sistem mampu mempertahankan tegangan kerja yang stabil sebagai sumber daya utama bagi beban mekanis.

Berdasarkan keseluruhan data pengujian yang telah dipaparkan pada sub-bab 3.1 hingga 3.6 di atas, secara umum dapat diketahui bahwa purwarupa sistem kendali pompa air berbasis IoT dan PLTS yang dibangun mampu bekerja sesuai dengan perencanaan awal. Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa sensor DHT22 dan *Capacitive Soil Moisture* yang menjadi dasar pengambilan keputusan sistem memiliki akurasi yang baik, dengan deviasi *error* suhu dan RH yang rendah terhadap alat ukur acuan, sehingga keputusan aktuasi yang diambil oleh ESP32 dapat diandalkan. Logika kendali otomatis pada pompa irigasi, pompa *misting*, dan kipas juga terbukti responsif terhadap perubahan ambang batas yang telah dirancang, baik berdasarkan waktu (siang/malam) maupun kondisi lingkungan aktual (suhu, RH, dan kelembapan tanah), tanpa ditemukan kegagalan aktuasi pada seluruh sesi pengujian. Di sisi kelistrikan, panel surya

PLTS terbukti mampu menghasilkan daya rata-rata sekitar 21.8 W dengan puncak hingga 31.8 W pada kondisi cuaca optimal, namun nilai tersebut berada di bawah kebutuhan daya sistem saat seluruh aktuator aktif secara bersamaan, yaitu sebesar 30.09 W, sehingga baterai tetap berperan penting sebagai penyangga daya pada kondisi beban puncak. Secara umum, integrasi antara sensor, logika kendali berbasis ESP32, dan sumber energi PLTS pada purwarupa ini telah berjalan sebagaimana mestinya dan mampu mendukung otomatisasi perawatan tanaman anggur di dalam *greenhouse* tanpa intervensi manual yang intensif.

3.6 Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik dan Proteksi *Cut-off* Otomatis

Sistem dilengkapi sensor ultrasonik HC-SR04 yang berfungsi memantau ketinggian air pada tandon secara kontinu, sebagai mekanisme proteksi otomatis untuk mencegah pompa irigasi beroperasi tanpa aliran air (*dry running*) apabila sumber air habis. Pengujian terhadap komponen ini terdiri atas dua tahap, yaitu pengujian akurasi pembacaan jarak sensor, dan pengujian fungsional terhadap logika proteksi *cut-off*.

Tabel 10. Kalibrasi Sensor Ultrasonik HC-SR04

No	Jarak Acuan (cm)	Jarak Sensor HC-SR04 (cm)	Error (%)
1	10	10.2	2.00
2	30	30.3	1.00
3	50	50.4	0.80
4	80	79.2	1.00
5	100	98.5	1.50

Berdasarkan Tabel 10, hasil pengujian menunjukkan sensor ultrasonik HC-SR04 memiliki rata-rata *error* sebesar 1.26%, dengan *error* tertinggi 2.00% pada jarak 10 cm dan *error* terendah 0.80% pada jarak 50 cm. Tingkat akurasi ini menunjukkan bahwa sensor HC-SR04 layak digunakan untuk keperluan pemantauan ketinggian air pada tandon.

Tabel 11. Pengujian Fungsional Proteksi *Cut-off* Otomatis

No	Kondisi Air Tandon (cm)	Kelembapan Tanah (%)	Status Pompa
1	45.2	32	ON
2	104.5	35	ON
3	113.8	30	OFF (<i>cut-off</i>)
4	116.0	28	OFF (<i>cut-off</i>)
5	118.5	33	OFF (<i>cut-off</i>)

Berdasarkan Tabel 11, pada jarak sensor 45.2 cm dan 104.5 cm dengan kelembapan tanah kering (32% dan 35%), pompa aktif menyala karena tinggi air masih berada di atas ambang batas 113.8 cm, yang berarti pompa masih tercelup sempurna. Pada jarak sensor 113.8 cm, yaitu tepat pada titik kritis yang setara dengan tinggi fisik pompa, sistem berhasil mendeteksi kondisi tersebut dan membatalkan

eksekusi pompa secara otomatis meskipun kelembapan tanah menunjukkan kondisi kering (30%). Kondisi *cut-off* ini tetap konsisten pada jarak 116.0 cm dan 118.5 cm yang merepresentasikan kondisi air semakin berkurang hingga tandon kosong. Hasil ini membuktikan bahwa ambang batas *cut-off* yang dihitung berdasarkan dimensi fisik pompa celup (4.2 cm) bekerja secara tepat pada titik kritis saat pompa mulai tidak tercelup sempurna, sehingga risiko kerusakan pompa akibat kondisi *dry running* dapat dicegah.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian purwarupa Sistem Kendali Pompa Air Tenaga Surya Berbasis IoT, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem kendali otomatis pompa air bertenaga surya berbasis IoT Blynk berhasil dirancang dan direalisasikan melalui algoritma *rule-based thresholding* pada ESP32, yang mampu mengeksekusi irigasi dalam mode pulsa berdasarkan pembacaan kelembapan tanah dengan ambang batas adaptif terhadap waktu (siang/malam), dan terbukti dapat diandalkan untuk beroperasi secara konsisten sesuai logika kendali yang dirancang.
2. Integrasi sensor DHT22 dan *buzzer* berhasil diwujudkan sebagai pemicu fungsi pompa *misting* pada ambang suhu di atas 35°C, sekaligus sebagai mekanisme peringatan dini terpisah yang aktif pada ambang kritis di atas 38°C dan meneruskan notifikasi kondisi kritis ke platform IoT Blynk secara cepat, sehingga terbukti layak digunakan sebagai mekanisme peringatan dini yang responsif.

Dengan tercapainya kedua hal tersebut, tujuan penelitian untuk membangun dan menguji purwarupa sistem yang mengintegrasikan PLTS, ESP32, dan algoritma ambang batas sederhana telah terpenuhi, sehingga sistem terbukti mampu menjawab permasalahan irigasi konvensional berupa ketergantungan pada listrik PLN, inefisiensi air, dan minimnya perlindungan tanaman dari suhu ekstrem. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan penambahan kapasitas panel surya atau baterai, penambahan fitur *data logging*, serta pengujian pada berbagai jenis media tanam.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga naskah publikasi ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Aris Budiman, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, bimbingan, serta motivasi selama proses perancangan hingga penyusunan naskah publikasi ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada

kedua orang tua beserta keluarga yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan moral maupun materiil tanpa henti selama proses studi berlangsung. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh dosen Program Studi Teknik Elektro, serta kepada rekan-rekan seperjuangan dan Grup Cacicu yang telah memberikan dukungan, masukan, dan semangat selama proses penelitian maupun penyusunan naskah publikasi ini.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). *Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications*. *Sensors*, 25(2), 343. <https://doi.org/10.3390/s25020343>
- Correa-Quiroz, J. J., Toribio-Barrueto, M. A., & Castro-Vargas, C. (2025). *IoT System with ESP32 for Smart Drip Irrigation and Climate Monitoring in Greenhouses*. *Emerging Science Journal*, 9(3), 1133–1157. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-01>
- Dayer, S., Herrera, J. C., Dai, Z., Burlett, R., Lamarque, L. J., Delzon, S., Bortolami, G., Cochard, H., & Gambetta, G. A. (2021). *Nighttime transpiration represents a negligible part of water loss and does not increase the risk of water stress in grapevine*. *Plant, Cell & Environment*, 44, 387–398. <https://doi.org/10.1111/pce.13923>
- Dou, F., Phillip, F. O., Liu, G., Zhu, J., Zhang, L., Wang, Y., & Liu, H. (2024). *Transcriptomic and physiological analyses reveal different grape varieties response to high temperature stress*. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1313832. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1313832>
- Eduard, R., Ruslan, W., Iskandar, I., & Setyanto, D. (2022). *Setting Temperature and Humidity with a Misting System in a Pilot Greenhouse at Cisauk-Tangerang, Indonesia*. *Applied Sciences*, 12(18), 9192. <https://doi.org/10.3390/app12189192>
- Faqih, W. A. (2023). *Sistem Monitoring Media Tanam Anggur untuk Fase Generatif dan Vegetatif Berbasis IoT* [Skripsi, Institut Teknologi Nasional Malang]. Eprints ITN Repository.
- Halimi, I., Vashti, R. P., Fadhilah, A., Winasis, D. H., & Muharim, M. F. (2025). *Pemanfaatan dan Implementasi Sistem IOT untuk Pengelolaan Irigasi Cerdas pada Greenhouse*. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, 11, 1–5.
- Marhatang, M., Pangkung, A., & Tandioga, R. (2022). *Perancangan dan Implementasi Sistem Kendali Automatic Transfer Switch antara PLTS Off-Grid dengan Jaringan PLN*. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat*, 6, 144–149.
- Rozani, M. A. A. M., Annuar, K. A. M., Sapiee, M. R. M., & Debnath, S. K. (2025). *Performance of an internet of things based plant monitoring and irrigation system using solar energy*. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 14(4), 2582–2592. <https://doi.org/10.11591/eei.v14i4.9085>
- Saputri, F. R., Linelson, R., Salehuddin, M., Nor, D. M., Ahmad, M. I., & Abdul-Qawy, A. S. H. (2025). *Design and development of an irrigation monitoring and control system based on Blynk internet of things and ThingSpeak*. *PLOS ONE*, 20(4), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0321250>