

# **TUGAS AKHIR**

## **HYDROTECH: IMPLEMENTASI *SMART GREENHOUSE* HIDROPONIK BERBASIS IOT DAN *MACHINE LEARNING* MELALUI PEMANFAATAN ENERGI TERBARUKAN (SOLAR PANEL)**

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

**Disusun Oleh:**

**ERDIANSYAH  
2107220051**



**UMSU**  
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN  
2025**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Erdiansyah

NPM : 2107220051

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : *HydroTECH : Implementasi Smart Greenhouse Hidroponik Berbasis IoT dan Machine Learning Melalui Pemanfaatan Energi Terbarukan (Solar Panel).*

Bidang ilmu : sistem kendali

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 12 September 2025

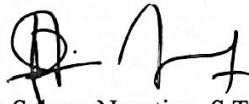
Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji



Rahmat Fauzi Siregar, S.T., M.T

Dosen Pembimbing II / Penguji



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

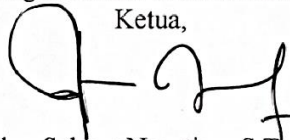
Dosen Pembimbing II / Peguji



Benny Oktrialdi, ST., MT

Program Studi Teknik Elektro

Ketua,



Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Erdiansyah  
Tempat /Tanggal Lahir : Medan/28 Mei 2003  
NPM : 2107220051  
Fakultas : Teknik  
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

**“ HydroTECH : Implementasi *Smart Greenhouse* Hidroponik Berbasis IoT dan *Machine Learning* Melalui Pemanfaatan Energi Terbarukan (Solar Panel).”**

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 12 September 2025

Saya yang menyatakan,



Erdiansyah

## ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan pangan dan variabilitas iklim mendorong urgensi penerapan pertanian presisi yang efisien sumber daya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem "HYDROTECH", sebuah prototipe *smart greenhouse* untuk budidaya hidroponik *Nutrient Film Technique* (NFT) yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT) dan *Machine Learning* (ML), serta beroperasi secara mandiri menggunakan energi terbarukan dari panel surya. Sistem ini dibangun dengan catu daya panel surya 580 Wp, dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32, dan dilengkapi serangkaian sensor untuk akuisisi data *real-time* meliputi pH, *Total Dissolved Solids* (TDS), suhu dan kelembapan udara (DHT22), suhu larutan (DS18B20), serta intensitas cahaya (LDR). Hasil kalibrasi menunjukkan akurasi sensor yang tinggi dengan galat masing-masing untuk pH ( $\leq \pm 0,10$  pH), TDS ( $\pm 1\%$ ), dan suhu DS18B20 ( $\leq \pm 0,3^\circ\text{C}$ ). Pengujian sistem menunjukkan kemampuan pemantauan parameter lingkungan dan nutrisi secara kontinu dan stabil, menjaga kondisi optimal untuk pertumbuhan tanaman seperti pH pada rentang 6,17–6,22 dan EC pada 1,61–1,68 mS/cm. Model *machine learning* berbasis *Recurrent Neural Network* (RNN) yang dikembangkan berhasil memberikan prediksi waktu panen dengan tingkat kesiapan mencapai 72% untuk bayam dan 65% untuk selada. Implementasi prototipe ini membuktikan kelayakan integrasi teknologi IoT, ML, dan energi surya sebagai solusi efektif untuk mendukung ketahanan pangan dan pertanian presisi skala rumah tangga.

**Kata Kunci:** *Smart Greenhouse*, Hidroponik, *Internet of Things* (IoT), *Machine Learning*, Energi Surya.

## ABSTRACT

*The increasing demand for food and climate variability drive the urgency for implementing resource-efficient precision agriculture. This research aims to design, implement, and test the "HYDROTECH" system, a smart greenhouse prototype for Nutrient Film Technique (NFT) hydroponics integrated with the Internet of Things (IoT) and Machine Learning (ML), operating autonomously using renewable energy from a solar panel. The system is built with a 580 Wp solar panel power supply, controlled by an ESP32 microcontroller, and equipped with a suite of sensors for real-time data acquisition, including pH, Total Dissolved Solids (TDS), air temperature and humidity (DHT22), solution temperature (DS18B20), and light intensity (LDR). Calibration results demonstrate high sensor accuracy with respective errors for pH ( $\leq \pm 0.10$  pH), TDS ( $\pm 1\%$ ), and DS18B20 temperature ( $\leq \pm 0.3^\circ\text{C}$ ). System testing revealed the capability for continuous and stable monitoring of environmental and nutrient parameters, maintaining optimal conditions for plant growth, such as a pH range of 6.17–6.22 and an EC of 1.61–1.68 mS/cm. The developed Recurrent Neural Network (RNN) based machine learning model successfully provided harvest time predictions with readiness levels reaching 72% for spinach and 65% for lettuce. The implementation of this prototype confirms the feasibility of integrating IoT, ML, and solar energy as an effective solution to support food security and household-scale precision agriculture.*

**Keywords:** Smart Greenhouse, Hydroponics, Internet of Things (IoT), Machine Learning, Solar Energy.

## KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah Subhanahu wa ta'ala yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “ *HydroTECH : Implementasi Smart Greenhouse Hidroponik Berbasis IoT dan Machine Learning Melalui Pemanfaatan Energi Terbarukan (Solar Panel)*. ” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Munawar Alfansury Siregar, ST., MT, selaku Dekan Fakultas Teknik, yang selalu memberikan arahan, dukungan, dan motivasi sehingga lingkungan akademik menjadi kondusif bagi mahasiswa untuk berkembang.
2. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, ST., MSc, Ph.D, selaku Wakil Dekan I, yang senantiasa berkomitmen dalam meningkatkan kualitas pendidikan, sehingga memberikan inspirasi bagi penulis untuk selalu berusaha meraih prestasi terbaik.
3. Bapak Affandi, ST., MT, selaku Wakil Dekan yang dengan penuh kepedulian mendukung berbagai kegiatan kemahasiswaan, sehingga memberikan semangat dan pengalaman yang sangat berarti selama penulis menempuh pendidikan.
4. Ibu Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro sekaligus Dosen Penguji I, atas arahan, masukan, serta ilmu berharga yang diberikan dengan penuh kesabaran dan keikhlasan.
5. Bapak Benny Oktrialdi, ST., MT, selaku Wakil Sekretaris Program Studi Teknik Elektro sekaligus Dosen Penguji II, atas bimbingan, kritik yang membangun, serta dorongan yang menambah wawasan dan memperkaya pemahaman penulis.

6. Bapak Rahmat Fauzi Siregar, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing, yang dengan penuh kesabaran, ketulusan, dan dedikasi tinggi telah membimbing, mengarahkan, dan memotivasi penulis dari awal hingga akhir penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Fakultas Teknik Elektro, yang telah mendidik, membekali, serta menanamkan nilai-nilai keilmuan dan kedisiplinan yang menjadi bekal berharga bagi penulis di masa depan.
8. Kedua orang tua tercinta, Bapak Suyanto dan Ibu Susilawati, atas kasih sayang, doa, pengorbanan, serta dukungan yang tidak pernah terputus. Tanpa doa dan cinta yang tulus dari mereka, penulis tidak akan mampu berdiri hingga titik ini.
9. Seluruh teman-teman Fakultas Teknik Elektro, yang telah menjadi sahabat seperjuangan, memberikan dukungan, semangat, serta kebersamaan yang akan selalu penulis kenang sepanjang hidup.
10. Keluarga penulis di kampus: Bapak Affandi, ST., MT, Bapak Rahmat Fauzi Siregar, S.T., M.T., Bapak Arya Rudi Nasution, S.T., M.T., Abang Panji Purnama, S.T., dan Abang Muhammad Alwi Ripay Harahap, yang senantiasa menjadi tempat berbagi ilmu, pengalaman, dan motivasi, sekaligus keluarga kedua yang memberikan kehangatan dan kekuatan

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap semoga karya ini dapat memberikan manfaat, baik bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang Teknik Elektro maupun sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya. Semoga segala amal baik dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis mendapat balasan yang berlipat ganda dari Allah Subhanahu wa ta'ala.

Medan, 12 September 2025



Erdiansyah

## DAFTAR ISI

|                                                   |             |
|---------------------------------------------------|-------------|
| <b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>                    | <b>ii</b>   |
| <b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....</b> | <b>iii</b>  |
| <b>ABSTRAK .....</b>                              | <b>iv</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>                             | <b>v</b>    |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                        | <b>vi</b>   |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>                         | <b>xi</b>   |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                         | <b>xiii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>                     | <b>1</b>    |
| 1.1 Latar Belakang.....                           | 1           |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                         | 3           |
| 1.3 Tujuan Penelitian.....                        | 3           |
| 1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....                | 3           |
| 1.5 Manfaat Penelitian.....                       | 4           |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>               | <b>5</b>    |
| 2.1 Tinjauan Pustaka Relevan .....                | 5           |
| 2.2 Landasan Teori .....                          | 6           |
| 2.2.1 Greenhouse .....                            | 6           |
| 2.2.2 Kanal C75 .....                             | 7           |
| 2.2.3 Kanal Reng .....                            | 8           |
| 2.2.4 Plastik UV .....                            | 9           |
| 2.2.5 Insect Net .....                            | 9           |
| 2.2.6 Hidroponik .....                            | 10          |
| 2.2.7 talang PVC .....                            | 12          |
| 2.2.8 Pompa Submersible .....                     | 13          |
| 2.2.7 Nutrisi AB Mix .....                        | 14          |
| 2.2.9 Rockwool.....                               | 15          |
| 2.2.9 Tray Semai.....                             | 15          |
| 2.2.10 Panel Surya .....                          | 16          |
| 2.2.11 <i>Solar Charge Controller</i> .....       | 18          |
| 2.2.12 Baterai Aki.....                           | 19          |
| 2.2.14 Inverter.....                              | 20          |
| 2.2.14 AC Watt Meter.....                         | 21          |
| 2.2.15 DC Meter .....                             | 22          |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.17 MCB ( <i>Miniature Circuit Breaker</i> ).....      | 23        |
| 2.2.17 Micro Kontroller .....                             | 23        |
| 2.2.18 Sensor pH.....                                     | 25        |
| 2.2.19 Sensor DHT22 .....                                 | 26        |
| 2.2.20 Sensor (DS18B20) .....                             | 27        |
| 2.2.21 Sensor Cahaya LDR.....                             | 28        |
| 2.2.22 Sensor TDS ( <i>Total Dissolved Solids</i> ) ..... | 29        |
| 2.2.23 Sensor Warna TCS34725.....                         | 30        |
| 2.2.24 Machine Learning .....                             | 30        |
| <b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>                    | <b>32</b> |
| 3.1 Tempat Dan Waktu Penelitian.....                      | 32        |
| 3.1.1 Tempat Penelitian .....                             | 32        |
| 3.1.2 Waktu Penelitian.....                               | 32        |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian .....                       | 33        |
| 3.2.1 Bahan Penelitian .....                              | 33        |
| 3.2.2 Alat Penelitian.....                                | 35        |
| 3.3 Bagan Alir Penelitian .....                           | 36        |
| 3.4 Metode Pembuatan Alat Penelitian .....                | 37        |
| 3.4.1 Perancangan dan Konstruksi <i>Greenhouse</i> . .... | 37        |
| 3.4.2 Instalasi Sistem Hidroponik.....                    | 38        |
| 3.4.3 Instalasi Sistem Catu Daya. ....                    | 39        |
| 3.4.4 Instalasi dan Integrasi Sistem Kontrol. ....        | 39        |
| 3.4.5 Pengembangan Model <i>Machine Learning</i> .....    | 41        |
| 3. 5 Metode Pengujian Alat .....                          | 42        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>                  | <b>44</b> |
| 4.1 Proses Pembuatan Alat.....                            | 44        |
| 4.2 Kalibrasi Alat.....                                   | 48        |
| 4.2.1 Kalibrasi Sensor pH .....                           | 48        |
| 4.2.2 Kalibrasi Sensor TDS .....                          | 49        |
| 4.2.3 Kalibrasi Sensor Suhu dan Kelembapan (DHT22).....   | 51        |
| 4.2.4 Data kalibrasi sensor DS18B20 .....                 | 52        |
| 4.2.5 Kalibrasi Sensor Cahaya (LDR) .....                 | 53        |
| 4.2.6 Kalibrasi Sensor Warna (TCS34725) .....             | 54        |
| 4.3 Pengujian Sistem Hydrotech .....                      | 55        |
| 4.3.1 Monitoring Sistem .....                             | 55        |
| 4.3.1 Pengujian Sensor .....                              | 59        |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.2 Pengujian Sistem Prediktif Machine Learning ..... | 60        |
| <b>BAB V PENUTUP.....</b>                               | <b>62</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....                                     | 62        |
| 5.2 Saran.....                                          | 63        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>                              | <b>64</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1 Greenhouse.....                       | 7  |
| Gambar 2.2 Kanal C74.....                        | 7  |
| Gambar 2.3 Kanal Reng 0.40 6 meter.....          | 8  |
| Gambar 2.4 Plastik UV .....                      | 9  |
| Gambar 2.5 Insect Net .....                      | 10 |
| Gambar 2.6 Hidroponik .....                      | 11 |
| Gambar 2.7 Talang PVC .....                      | 13 |
| Gambar 2.8 Pompa Submersible.....                | 13 |
| Gambar 2.7 Nutrisi AB Mix .....                  | 14 |
| Gambar 2.8 Rockwool .....                        | 15 |
| Gambar 2.9 Tray semai.....                       | 16 |
| Gambar 2.3 Panel Surya.....                      | 17 |
| Gambar 2.11 <i>Solar Charge Controller</i> ..... | 18 |
| Gambar 2.12 Baterai Aki .....                    | 19 |
| Gambar 2.13 Inverter .....                       | 20 |
| Gambar 2.14 Watt Meter .....                     | 21 |
| Gambar 2.15 Dc Meter.....                        | 22 |
| Gambar 2.16 Mcb Miniatur Circuit Breaker.....    | 23 |
| Gambar 2.17 Mikrokontroller .....                | 24 |
| Gambar 2.18 Mikrokontroler (ESP32).....          | 25 |
| Gambar 2.19 Sensor pH .....                      | 26 |
| Gambar 2.20 Sensor DHT22.....                    | 26 |
| Gambar 2.21 Sensor (DS18B20).....                | 27 |
| Gambar 2.22 Sensor Cahaya LDR .....              | 28 |
| Gambar 2.23 Sensor TDS .....                     | 29 |
| Gambar 2.24 Sensor warna TCS34725 .....          | 30 |
| Gambar 3.1 Desa Sambirejo Timur .....            | 32 |
| Gambar 3.1 Waktu Penelitian. ....                | 33 |
| Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian .....           | 36 |
| Gambar 3.2 Desain Greenhouse.....                | 38 |
| Gambar 3.3 Desain Hidroponik .....               | 38 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3.4 Rangkaian Solar Panel .....                           | 39 |
| Gambar 3.5 Blok Diagram Perancangan Alat.....                    | 40 |
| Gambar 3.5 Rangkaian Sistem Kontrol Greenhouse .....             | 40 |
| Gambar 3.6 Arsitektur Machine Learning .....                     | 42 |
| Gambar 4.1 Proses Perakitan Struktur Greenhouse .....            | 44 |
| Gambar 4.3 Pemasangan Insect Net.....                            | 45 |
| Gambar 4.4 Pemotongan Talang Sebagai Wadah.....                  | 45 |
| Gambar 4.5 Pembuatan lubang pada talang.....                     | 45 |
| Gambar 4.6 Instalasi Hidroponik Pada greenhouse .....            | 45 |
| Gambar 4.7 Pemasangan Panel Surya pada atap greenhouse .....     | 46 |
| Gambar 4.8 instalasi catu daya menggunakan panel surya.....      | 46 |
| Gambar 4.9 Integrasi sistem Kendali pada <i>greenhouse</i> ..... | 46 |
| Gambar 4.10 Sistem IoT greenhouse .....                          | 46 |
| Gambar 4.11 Dashboard Hydrotech.....                             | 47 |
| Gambar 4.12 Halaman Prediksi Hydrotech .....                     | 47 |
| Gambar 4.13 Tampilan Monitoring Pada Laman Dashboard .....       | 56 |
| Gambar 4.14 Sistem Prediktif Berbasis Machine Learning.....      | 61 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 3.1 Bahan Penelitian .....                               | 33 |
| Tabel 3.2 Alat yang digunakan .....                            | 35 |
| Tabel 3.3 konfigurasi pin mikrokontroler ESP32 yang .....      | 41 |
| Tabel 4.2.1. Data kalibrasi Sensor pH.....                     | 49 |
| Tabel 4.2.2. Data kalibrasi sensor TDS.....                    | 50 |
| Tabel 4.2.3. Data kalibrasi sensor DHT22 .....                 | 51 |
| Tabel 4.2.4. Data kalibrasi sensor DS18B20 .....               | 52 |
| Tabel 4.2.5. Data kalibrasi sensor cahaya LDR.....             | 53 |
| Tabel 4.2.6. Data kalibrasi sensor TCS34725.....               | 54 |
| Tabel 4.3.1 Monitoring Realtime .....                          | 57 |
| Tabel 4.3.1 Data Hasil Pengujian Greenhouse Selama 7 Hari..... | 59 |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kenaikan kebutuhan pangan, variabilitas iklim, serta menyusutnya sumber daya air menekan sistem produksi pertanian global untuk bertransformasi menuju budidaya yang lebih presisi dan hemat sumber daya. Sektor pertanian mengonsumsi sekitar 70% total pengambilan air tawar dunia, sehingga efisiensi air menjadi isu kunci dalam ketahanan pangan berkelanjutan [1]. Salah satu pendekatan yang makin mendapat perhatian ialah hidroponik *controlled-environment agriculture* (CEA) yang terdokumentasi mampu menurunkan konsumsi air hingga 90% dibanding budidaya tanah, sekaligus memungkinkan daur ulang larutan hara dan pemanfaatan ruang vertikal [2].

Kemajuan Internet of Things (IoT) dan *machine learning* (ML) memperkuat potensi CEA dengan pemantauan kondisi mikro (suhu, kelembapan, pH, electrical conductivity/EC, intensitas cahaya) secara real-time dan pengambilan keputusan berbasis data [3]. Tinjauan mutakhir menunjukkan kerangka terpadu IoT dan *machine learning* mampu mengoptimasi irigasi dan manajemen nutrisi pada sistem aeroponik/hidroponik, sedangkan model hibrida fisika-data terbaru berhasil memprediksi bobot segar, luas daun, kadar nitrat, serta konsumsi air pada lettuce [4].

Di Indonesia, pertanian tetap berperan strategis namun menghadapi tekanan struktural. Kontribusi pertanian, kehutanan, dan perikanan terhadap PDB tercatat sekitar 12,6% pada 2024, sementara anomali iklim El Niño memperburuk penurunan luas panen padi dan produksi pada 2024 dibanding 2023 [5]. Pada saat yang sama, urbanisasi dan konversi lahan mengerucutkan ruang budidaya di kawasan padat, mendorong inisiatif urban farming/hidroponik di kota-kota besar (program Buruan SAE di Bandung) sebagai respons atas keterbatasan lahan dan kebutuhan sayuran segar [6].

Hidroponik berbasis teknik Nutrient Film Technique (NFT) relevan untuk skala rumah tangga karena bersifat resirkulatif dan hemat air; praktik NFT untuk selada juga telah meluas di Indonesia (contoh: kebun komersial di Surabaya),

sehingga memberikan basis praktik untuk adopsi di masyarakat [7]. Di sisi lain, adopsi teknologi digital di sektor pertanian masih terhambat oleh literasi digital petani yang bervariasi dan kesiapan SDM yang belum merata terutama pada skala kecil sehingga kebutuhan pelatihan dan pendampingan menjadi krusial [8].

Aspek energi juga menentukan keberlanjutan operasional *greenhouse*. Indonesia memiliki potensi surya rata-rata sekitar 4,6 kWh/m<sup>2</sup>/hari, yang memadai untuk menopang beban listrik sensor, pompa sirkulasi NFT, aktuator, dan komputasi tepi (edge) pada sistem IoT, sekaligus menurunkan emisi serta ketergantungan jaringan [9].

Dari sisi riset, meskipun banyak studi mengkaji pemantauan IoT pada hidroponik atau prediksi berbasis *machine learning* secara terpisah, bukti implementasi terintegrasi yakni *smart greenhouse* hidroponik skala rumah tangga yang menggabungkan IoT (sensor-aktuator), *machine learning* untuk rekomendasi presisi (penyesuaian nutrisi/waktu penyiraman), dan pasokan energi mandiri dari panel surya masih terbatas, khususnya pada konteks tropis Indonesia dan model pemberdayaan komunitas salah satunya kelompok Ibu PKK untuk transfer pengetahuan. Tinjauan terbaru pun menekankan kebutuhan standarisasi kerangka IoT dan *Machine Learning* dan validasi lapangan lintas kondisi iklim agar temuan dapat digeneralisasi. Urgensi penelitian ini terukur pada [3]:

- a. efisiensi air potensial hingga 90% melalui hidroponik dibanding tanah (menghadapi fakta 70% air global diserap pertanian),
- b. sinyal tekanan produksi nasional penurunan luas panen/produksi padi pada 2024 akibat El Niño yang menuntut diversifikasi sumber sayuran cepat panen seperti selada, dan
- c. ketersediaan energi surya harian ~4,6 kWh/m<sup>2</sup>/hari untuk menopang operasi *greenhouse* off-grid, seraya menutup kesenjangan literasi digital melalui program mentoring komunitas.

Dengan demikian, penelitian “HYDROTECH” diarahkan untuk: merancang dan menguji *smart greenhouse* hidroponik NFT berbasis IoT dan *Machine Learning* bertenaga surya untuk budidaya selada skala rumah tangga, mengevaluasi dampak efisiensi air, energi dan kinerja pertumbuhan, serta pelatihan bagi Ibu PKK Desa Sambirejo Timur guna memperkuat kemandirian pangan dan nilai ekonomi

lokal. Ini menutup celah riset pada integrasi teknologi energi pemberdayaan yang kontekstual Indonesia dan dapat direplikasi di wilayah dengan keterbatasan lahan serta variabilitas iklim tinggi.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang *smart greenhouse* hidroponik tipe NFT skala rumah tangga yang kompatibel dengan keterbatasan lahan.
2. Bagaimana merancang sistem IoT pada *smart greenhouse* untuk memastikan nutrisi dan cahaya teratur dan tetap optimal dari masa pertumbuhan tanaman sampai masa panen.
3. Bagaimana menerapkan teknologi *machine learning* dalam sistem hidroponik untuk menganalisis data pertumbuhan tanaman selada secara real-time.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Sesuai dengan permasalahan yang dikemukakan di atas, maka tujuan dari penelitian sebagai berikut:

1. Merancang *smart greenhouse* hidroponik tipe NFT skala rumah tangga untuk lahan terbatas.
2. Mengembangkan sistem IoT untuk pemantauan dan pengendalian nutrisi serta pencahayaan agar tetap optimal sepanjang siklus pertumbuhan.
3. Menerapkan model *machine learning* untuk analitik waktu-nyata pertumbuhan selada dan rekomendasi tindakan perawatan yang presisi.

## **1.4 Ruang Lingkup Penelitian**

Agar penelitian ini dapat berjalan secara terfokus dan mendalam, maka ditetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas komoditas lain, teknik non-NFT (drip, DWC, aeroponik), atau operasi komersial berskala besar.
2. Wilayah beriklim tropis dataran rendah Indonesia (studi kasus Desa Sambirejo Timur).
3. Variabel lingkungan dipantau terbatas pada: pH, EC, suhu udara/larutan, kelembapan relatif, dan intensitas cahaya.

4. Sumber data hanya dari sensor yang terpasang pada sistem uji, tidak menggunakan citra kamera/visi komputer dan tidak menggabungkan dataset eksternal berskala besar.
5. Analisis energi mencakup estimasi produksi harian, *load coverage ratio*, dan kondisi baterai; tidak membahas *grid-tie*, *net metering*, atau optimasi ekonomi proyek PV skala jaringan.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan, baik dari segi pengembangan ilmu pengetahuan (teoretis) maupun dari segi penerapan praktis di bidang pertanian modern berbasis teknologi. Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Penelitian ini memberikan referensi ilmiah dan metodologi terstruktur mengenai perancangan dan implementasi *smart greenhouse* hidroponik tipe *Nutrient Film Technique* (NFT) yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT), *Machine Learning* (ML), dan energi surya untuk skala rumah tangga di iklim tropis.
2. Menambah pengetahuan dalam bidang rekayasa sistem pertanian presisi, khususnya pada pemantauan dan pengendalian variabel lingkungan (pH, EC, suhu, kelembapan, intensitas cahaya) secara real-time untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman selada.
3. Memberikan data empiris dan kerangka desain teknis yang dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya, termasuk pengembangan model prediksi pertumbuhan tanaman, optimasi manajemen nutrisi, dan integrasi teknologi energi terbarukan pada sistem hidroponik.
4. Menjadi materi studi kasus dan bahan ajar praktis bagi mahasiswa atau pelaku pelatihan di bidang Teknik Elektro, Teknik Pertanian, dan Teknologi Pangan yang mempelajari IoT, *machine learning*, energi terbarukan, dan *controlled-environment agriculture* (CEA).
5. Memberikan dampak sosial-ekonomi melalui peningkatan literasi digital dan keterampilan teknologi kelompok Ibu PKK, sekaligus mendorong kemandirian pangan dan peluang usaha di wilayah dengan keterbatasan lahan dan variabilitas iklim tinggi.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Hidroponik khususnya Nutrient Film Technique (NFT) muncul sebagai pendekatan *soilless* yang efektif untuk komoditas daun seperti selada karena mampu menjaga keseimbangan oksigen dan nutrisi pada zona perakaran melalui aliran larutan tipis yang terus-menerus. Berbagai studi melaporkan efisiensi penggunaan air dan stabilitas pertumbuhan yang lebih baik dibanding budidaya berbasis tanah maupun beberapa sistem *soilless* lain, terutama pada kondisi iklim mikro yang berfluktuasi. Keunggulan ini menjadikan NFT basis teknis yang logis untuk budidaya skala rumah tangga, yang pada gilirannya menuntut kontrol lingkungan yang presisi agar performa tanaman konsisten lintas siklus [10].

Kebutuhan kontrol presisi tersebut mengantar pada peran Internet of Things (IoT) dalam *smart greenhouse*. Arsitektur *smart greenhouse* berbasis IoT Arsitektur IoT memungkinkan akuisisi data real-time untuk variabel kritis (pH, EC, suhu, kelembapan, intensitas cahaya) dan pengaktifan aktuator (pompa, *dosing*, pencahayaan) melalui *gateway* lokal dan *dashboard* pemantauan. Perkembangan terbaru menekankan modularitas dan *edge computing* untuk menekan latensi dan ketergantungan jaringan, sehingga sistem tetap andal pada skala kecil dengan sumber daya terbatas. Dengan demikian, literatur tentang NFT dan IoT saling melengkapi NFT menyediakan medium budidaya yang efisien, sedangkan IoT menyediakan mekanisme penginderaan–pengendalian yang menjaga parameter lingkungan tetap pada rentang agronomis [11].

Di atas fondasi data IoT, *machine learning* (ML) menambahkan lapisan kecerdasan untuk pengambilan keputusan berbasis prediksi. Kajian terkini menunjukkan model-model regresi dan tree-based hingga pendekatan hibrida fisika data mampu memperkirakan indikator kinerja pertumbuhan (mis. bobot segar, luas daun, konsumsi air) sekaligus mendiagnosis kebutuhan intervensi (penyesuaian nutrisi, siklus pompa, jadwal pencahayaan). Integrasi *machine learning* ke dalam *loop* kendali memungkinkan transisi dari sekadar pemantauan menuju rekomendasi perawatan presisi yang adaptif terhadap dinamika lingkungan, sehingga

menghubungkan langsung keluaran analitik dengan aksi aktuator untuk menjaga stabilitas sistem NFT.[3].

Aspek berikutnya yang tak terpisahkan adalah energi, karena operasi pompa, sensor, *gateway*, dan bila digunakan pencahayaan tambahan menuntut pasokan daya yang stabil. Literatur manajemen energi rumah kaca menempatkan panel surya dan penyimpanan baterai sebagai opsi utama untuk mencapai otonomi energi, sekaligus menekan emisi dan ketergantungan jaringan. Pendekatan ini relevan bagi *smart greenhouse* skala rumah tangga, karena profil beban yang relatif kecil dapat dicukupi oleh konfigurasi panel surya yang tepat, terutama di kawasan berinsolasi tinggi [12].

Temuan-temuan tersebut, terlihat bahwa komponen kunci NFT yang hemat air, IoT yang menyediakan data dan aktuasi real-time, ML yang menghasilkan rekomendasi presisi, dan PV baterai yang menopang energi telah berkembang, namun implementasi terintegrasi pada skala rumah tangga di konteks tropis masih jarang dilaporkan. Kesenjangan ini mencakup belum bakunya kerangka IoT ML yang dapat digeneralisasi lintas lokasi/iklim serta minimnya evaluasi *end-to-end* yang mengaitkan kinerja budidaya, efisiensi air energi, dan keandalan sistem dalam satu paket. Dengan kata lain, literatur mengarahkan kebutuhan riset pada perancangan dan pengujian *smart greenhouse* NFT yang menghubungkan IoT, *Machine learning* dan PV secara *in situ*, sehingga menghasilkan bukti kuantitatif tentang peningkatan performa budidaya dan keberlanjutan operasional pada skala rumah tangga.

## **2.2 Landasan Teori**

### **2.2.1 Greenhouse**

Greenhouse, atau rumah kaca, merupakan fasilitas pertanian modern yang dirancang untuk menciptakan lingkungan tumbuh terkontrol agar tanaman dapat berkembang secara optimal. Struktur *greenhouse* umumnya dilengkapi penutup transparan seperti kaca atau plastik tahan UV yang memungkinkan penetrasi cahaya matahari sekaligus membantu mempertahankan suhu dan kelembapan internal sesuai kebutuhan tanaman. Dalam perkembangannya, konsep ini telah berevolusi menjadi *smart greenhouse*, yaitu sistem yang mengintegrasikan sensor, aktuator,

serta algoritma pengendalian otomatis berbasis IoT dan kecerdasan buatan untuk memonitor dan mengatur kondisi lingkungan secara real-time [13].



Gambar 2.1 Greenhouse

Penelitian yang menyoroti perkembangan sistem *greenhouse* pintar berbasis teknologi IoT menggabungkan sensor, kendali otomatis, komputasi awan, serta algoritma AI yang mampu memantau suhu, kelembapan, intensitas cahaya, dan kelembapan tanah secara presisi, meningkatkan produktivitas sekaligus efisiensi penggunaan sumber daya [14]. Selain itu, studi mendalam terkait sistem pada greenhouse yang fokus pada pemantauan dan kontrol parameter lingkungan secara menyeluruh dengan integrasi teknologi digital seperti IoT dan AI, *greenhouse* tidak hanya menjadi pelindung secara fisik tetapi juga sistem aktif untuk peningkatan efisiensi produksi dan konservasi sumber daya [15].

### 2.2.2 Kanal C75

Kanal C75 1.2 mm merupakan salah satu komponen struktural baja ringan yang dibentuk dari lembaran baja mutu tinggi melalui proses pembentukan dingin (cold-formed steel). Penamaan "C75" merujuk pada bentuk penampang profil yang menyerupai huruf 'C' dengan tinggi (dimensi web) sebesar 75 mm, sedangkan "1.2 mm" menunjukkan ketebalan dasar material baja yang digunakan [16].



Gambar 2.2 Kanal C74

Profil ini umumnya diproduksi dengan panjang standar 6 meter untuk efisiensi dalam mobilisasi dan pemasangan di lapangan. Material yang digunakan umumnya adalah baja High-Tensile Grade 550 (G550), yang memiliki tegangan leleh minimum sebesar 550 MPa dan dilapisi lapisan anti karat seperti seng (galvanis) atau paduan aluminium-seng (galvalum) untuk proteksi terhadap korosi, sesuai dengan standar yang ditetapkan dalam SNI 8399:2017 tentang Profil Rangka Baja Ringan [17]. Dalam aplikasi konstruksi, Kanal C75 dengan ketebalan 1.2 mm umum difungsikan sebagai elemen struktur utama pada rangka atap bentang menengah, seperti kuda-kuda dan gording, di mana kemampuannya dalam menahan beban lentur dan aksial menjadi faktor penentu dalam perancangan struktur.

### 2.2.3 Kanal Reng

Kanal Reng adalah profil baja ringan yang berfungsi sebagai elemen sekunder dalam struktur atap, khususnya sebagai tumpuan langsung bagi material penutup atap seperti genteng metal, keramik, atau spandek. Profil ini umumnya memiliki bentuk top-hat atau omega, yang dirancang untuk memberikan kekuatan dan kekakuan yang optimal meskipun dengan bobot yang ringan. Penamaan "0.40" merujuk pada ketebalan dasar material baja (Base Metal Thickness / BMT) sebesar 0.40 mm, yang diproduksi dengan panjang standar 6 meter [18].



Gambar 2.3 Kanal Reng 0.40 6 meter

Sesuai dengan SNI 8399:2017, reng baja ringan dibuat dari baja mutu tinggi, umumnya Grade 550 (G550) dengan tegangan leleh minimum 550 MPa, serta dilindungi oleh lapisan tahan karat berbasis seng (galvanis) atau paduan aluminium-seng (zincalume/galvalume) [19]. Dalam sistem rangka atap baja ringan, reng dipasang secara melintang di atas kasau atau kuda-kuda (truss) dengan jarak tertentu yang disesuaikan dengan jenis penutup atap yang akan digunakan,

berfungsi untuk mendistribusikan beban penutup atap secara merata ke struktur utama di bawahnya

#### 2.2.4 Plastik UV

Plastik UV (ultraviolet) adalah material film polimer, umumnya berbasis Polietilena (PE), yang dirancang khusus sebagai atap atau penutup pada struktur *greenhouse* dan sungkup. Karakteristik utama yang membedakannya dari plastik konvensional adalah adanya zat aditif stabilisator dan penyerap UV (UV stabilizer and absorber) yang diintegrasikan ke dalam matriks polimernya selama proses manufaktur [20]. Aditif ini, seperti Hindered Amine Light Stabilizers (HALS), berfungsi untuk melindungi struktur polimer plastik dari degradasi akibat paparan radiasi ultraviolet dari matahari, sehingga memperpanjang umur pakainya dan mencegahnya menjadi rapuh, menguning, atau sobek [21].



Gambar 2.4 Plastik UV

Selain fungsi proteksi material, plastik UV memiliki peran krusial dalam memodifikasi lingkungan mikro di dalam *greenhouse*. Lapisan ini mampu memfilter dan mengurangi intensitas radiasi UV yang berbahaya bagi tanaman, sekaligus mentransmisikan spektrum cahaya tampak (Photosynthetically Active Radiation / PAR) yang esensial untuk proses fotosintesis secara optimal [22]. Kemampuannya dalam menahan radiasi inframerah juga membantu menjaga kestabilan suhu di dalam *greenhouse*, terutama pada malam hari, sehingga mengurangi fluktuasi suhu ekstrem. Dengan demikian, penggunaan plastik UV secara efektif menciptakan kondisi lingkungan yang lebih terkontrol, melindungi tanaman dari cuaca buruk, serangan hama, dan paparan radiasi berlebih.

#### 2.2.5 Insect Net

Insect net (jaring serangga) adalah material jaring pelindung yang didesain secara spesifik untuk digunakan pada dinding atau ventilasi *greenhouse* sebagai

penghalang fisik (mekanis) terhadap masuknya serangga hama. Material ini umumnya terbuat dari polimer berkekuatan tinggi seperti High-Density Polyethylene (HDPE) atau poliester yang ditenun untuk membentuk lubang-lubang berukuran mikro yang seragam [23]. Karakteristik teknis utama dari insect net adalah ukuran mesh, yang menunjukkan jumlah lubang per inci persegi (misalnya, mesh 50) atau ukuran lubang dalam satuan milimeter. Pemilihan ukuran mesh yang tepat sangat krusial dan disesuaikan dengan jenis hama target; mesh yang lebih rapat efektif untuk mencegah serangga yang lebih kecil seperti kutu kebul (whitefly) dan thrips.



Gambar 2.5 Insect Net

Selain fungsi utamanya sebagai pengendali hama non-kimiawi, pemasangan insect net juga berpengaruh terhadap modifikasi lingkungan mikro di dalam *greenhouse* [24]. Kerapatan jaring dapat mengurangi laju aliran udara (ventilasi), yang berpotensi meningkatkan suhu dan kelembapan internal. Di sisi lain, jaring ini juga berfungsi sebagai peneduh (shading) yang dapat mengurangi intensitas cahaya matahari langsung. Oleh karena itu, pemilihan insect net memerlukan pertimbangan yang cermat antara tingkat proteksi terhadap hama dengan dampaknya terhadap kondisi iklim yang dibutuhkan untuk pertumbuhan optimal tanaman.

#### **2.2.6 Hidroponik**

Hidroponik merupakan suatu metode budidaya tanaman yang memanfaatkan air sebagai media tanam utama yang telah diperkaya dengan larutan nutrisi, sehingga tidak memerlukan tanah [25]. Istilah hidroponik berasal dari bahasa Yunani, yaitu *hydro* yang berarti air dan *ponos* yang berarti kerja, secara harfiah dimaknai sebagai "pengerjaan air".



Gambar 2.6 Hidroponik

Prinsip dasar dari sistem ini adalah pemenuhan kebutuhan unsur hara esensial bagi tanaman dalam bentuk larutan nutrisi yang disalurkan langsung ke zona perakaran. Teknik ini menjadi solusi strategis dalam mengatasi keterbatasan lahan pertanian, terutama di wilayah perkotaan, dan dapat diimplementasikan pada lahan dengan tingkat kesuburan rendah.

Secara teknis, budidaya hidroponik menawarkan sejumlah keunggulan signifikan dibandingkan metode konvensional. Keunggulan tersebut antara lain efisiensi penggunaan air dan nutrisi yang lebih tinggi, pertumbuhan tanaman yang relatif lebih cepat, serta kualitas hasil panen yang lebih bersih dan terkontrol karena minimnya risiko serangan hama dan penyakit tular tanah. Berikut ini adalah sistem yang ada pada hidroponik [26]:

- a. *Wick System* (Sistem Sumbu): Sistem ini merupakan yang paling sederhana dan pasif. Larutan nutrisi ditarik dari reservoir ke media tanam menggunakan sumbu melalui proses kapilaritas. Sistem ini cocok untuk tanaman kecil dan tidak memerlukan pompa.
- b. *Water Culture System* (Sistem Kultur Air): Dalam sistem ini, akar tanaman terendam langsung dalam larutan nutrisi. Sebuah pompa udara digunakan untuk menyediakan oksigen ke akar guna mencegah pembusukan. Sistem ini juga dikenal sebagai sistem rakit apung.
- c. *Ebb and Flow System* (Sistem Pasang Surut): Sistem ini bekerja dengan cara membanjiri media tanam dengan larutan nutrisi secara periodik, kemudian mengalirkannya kembali ke reservoir. Proses ini diatur oleh sebuah timer yang mengontrol pompa.
- d. *Drip System* (Sistem Tetes): Larutan nutrisi diteteskan secara perlahan ke media tanam di sekitar pangkal setiap tanaman. Sistem ini dapat berupa

sistem sirkulasi, di mana kelebihan larutan nutrisi dikembalikan ke reservoir, atau sistem non-sirkulasi.

- e. *Nutrient Film Technique* (NFT): Dalam sistem NFT, larutan nutrisi dialirkan secara terus-menerus dalam lapisan tipis di sepanjang saluran atau guli, di mana akar tanaman tumbuh. Sistem ini tidak menggunakan media tanam yang banyak, sehingga akar tanaman mendapatkan pasokan oksigen yang melimpah dari udara.
- f. *Aeroponic System* (Sistem Aeroponik): Sistem ini merupakan yang paling canggih, di mana akar tanaman digantung di udara dan disemprot dengan kabut larutan nutrisi secara berkala. Hal ini memungkinkan akar mendapatkan oksigen secara maksimal, yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman.
- g. *Deep Flow Technique* (DFT): Mirip dengan NFT, namun pada sistem DFT, larutan nutrisi dialirkan dengan kedalaman yang lebih tinggi (sekitar 4-6 cm) sehingga akar tanaman terendam sebagian. Hal ini memberikan cadangan nutrisi dan air jika terjadi kegagalan pompa.

Meskipun demikian, penerapan sistem ini dalam skala komersial memerlukan investasi awal yang cukup besar dan menuntut tenaga kerja dengan keterampilan teknis yang memadai.

#### **2.2.7 talang PVC**

Talang PVC (Polyvinyl Chloride) merupakan salah satu komponen sistem drainase atap yang berfungsi untuk mengumpulkan dan menyalurkan air hujan dari permukaan atap ke saluran pembuangan. Material utama penyusunnya, Polyvinyl Chloride, adalah polimer termoplastik yang dikenal memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi, reaksi kimia, dan degradasi biologis seperti jamur atau lumut. Sifat-sifat ini menjadikannya alternatif yang efektif dibandingkan material logam yang rentan terhadap karat [27].



Gambar 2.7 Talang PVC

Proses manufaktur talang PVC melalui ekstrusi memungkinkan produsen untuk menciptakan berbagai bentuk profil, seperti bentuk setengah lingkaran (U-shape) dan kotak, yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan arsitektural dan kapasitas debit air hujan [28].

#### 2.2.8 Pompa Submersible

Pompa submersible, atau pompa benam, adalah jenis pompa sentrifugal yang dirancang khusus untuk beroperasi sepenuhnya di dalam cairan yang akan dipindahkan. Ciri utama dari pompa ini adalah unit motor dan pompa yang terintegrasi dalam satu wadah kedap air (hermetically sealed housing), yang melindunginya dari kontak langsung dengan cairan dan mencegah kavitasi. Prinsip kerjanya didasarkan pada konversi energi kinetik menjadi energi tekanan oleh satu atau lebih impeller yang berputar [29]. Saat impeller berputar, cairan di sekitarnya didorong keluar secara radial menuju diffuser, yang kemudian memperlambat aliran dan meningkatkan tekanannya, sehingga mampu mendorong cairan ke permukaan melalui pipa keluaran (discharge pipe) [30].



Gambar 2.8 Pompa Submersible

Struktur ini memberikan beberapa keunggulan signifikan dibandingkan pompa permukaan (*surface pump*). Karena terendam langsung dalam fluida, pompa submersible tidak memerlukan proses *priming* (pemancangan awal) dan memanfaatkan tekanan dari cairan di sekitarnya untuk membantu mendorong fluida

masuk ke pompa, sehingga meningkatkan efisiensi dan mengurangi konsumsi energi [31]. Aplikasi utama pompa submersible sangat luas, meliputi pengurasan air pada proyek konstruksi, irigasi pertanian, pengelolaan air limbah, dan terutama untuk pengambilan air bersih dari sumur bor dalam (*deep well*) di mana daya isap pompa permukaan tidak lagi efektif.

### 2.2.7 Nutrisi AB Mix

Nutrisi AB Mix adalah formulasi pupuk hidroponik dua bagian yang dirancang khusus untuk menyediakan unsur hara esensial bagi tanaman secara lengkap dan seimbang[32]. Formulasi ini dipisahkan menjadi dua larutan pekat, yaitu larutan A dan larutan B, untuk mencegah terjadinya reaksi presipitasi (pengendapan) antara ion kalsium ( $Ca^{2+}$ ) dengan ion sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) dan fosfat ( $PO_4^{3-}$ ) [33]. Jika unsur-unsur ini dicampurkan dalam bentuk pekat, akan terbentuk senyawa kalsium sulfat ( $CaSO_4$ ) dan kalsium fosfat ( $Ca_3(PO_4)_2$ ) yang tidak larut dalam air, sehingga tidak dapat diserap oleh akar tanaman.



Gambar 2.7 Nutrisi AB Mix

Larutan A umumnya mengandung unsur-unsur makro yang tidak bereaksi dengan sulfat dan fosfat, seperti Kalsium Nitrat ( $Ca(NO_3)_2$ ) dan Kalium Nitrat ( $KNO_3$ ), serta unsur mikro dalam bentuk kelat seperti Besi (Fe-EDTA). Sementara itu, larutan B mengandung garam-garam sulfat dan fosfat, seperti Kalium Fosfat ( $KH_2PO_4$ ), Magnesium Sulfat ( $MgSO_4$ ), serta unsur-unsur mikro lainnya [34]. Dalam aplikasinya, kedua larutan pekat ini dilarutkan secara terpisah ke dalam air dengan volume yang besar sesuai dengan takaran rekomendasi untuk mencapai konsentrasi *parts per million* (ppm) atau nilai *Electrical Conductivity* (EC) yang sesuai dengan jenis dan fase pertumbuhan tanaman. Pemisahan ini memastikan semua unsur hara tetap tersedia dalam bentuk ionik yang siap diserap oleh tanaman.

### 2.2.9 Rockwool

Rockwool adalah salah satu jenis media tanam anorganik yang paling umum digunakan dalam sistem budidaya hidroponik, terutama untuk tahap persemaian dan perakaran. Media ini diproduksi dengan cara melelehkan batuan basalt dan kapur pada suhu ekstrem (sekitar 1600 °C), yang kemudian dilewatkan pada aliran udara bertekanan tinggi untuk membentuk serat-serat halus yang menyerupai wol. Serat-serat ini selanjutnya dipadatkan menjadi berbagai bentuk seperti kubus, lempengan (slab), atau butiran (granulate) [35].



Gambar 2.8 Rockwool

Keunggulan utama rockwool sebagai media tanam terletak pada sifatnya yang inert secara kimiawi, artinya tidak bereaksi dengan larutan nutrisi dan tidak mengubah komposisi unsur hara yang diberikan. Strukturnya yang berpori mampu menahan air dan larutan nutrisi dalam jumlah besar (kapasitas menahan air hingga 90% dari volumenya) sekaligus menyediakan aerasi yang sangat baik untuk zona perakaran (porositas udara sekitar 10-15%) [36]. Hal ini menciptakan rasio air dan oksigen yang ideal untuk perkembangan akar yang sehat. Selain itu, rockwool bersifat steril karena proses produksinya yang bersuhu tinggi, sehingga bebas dari patogen tular tanah [37]. Sebelum digunakan, rockwool umumnya perlu direndam terlebih dahulu untuk menstabilkan tingkat keasamannya (pH) ke level yang sesuai untuk tanaman.

### 2.2.9 Tray Semai

Tray semai (seedling tray) adalah wadah khusus yang dirancang untuk kegiatan persemaian benih dalam praktik agronomi modern, termasuk hidroponik. Alat ini terdiri dari sebuah nampan dengan sejumlah lubang atau sel (cells) yang seragam dalam ukuran dan volume, yang berfungsi sebagai kompartemen individual untuk setiap benih [38]. Tray semai umumnya terbuat dari material polimer termoplastik seperti Polistirena (PS) atau Polipropilena (PP) yang ringan,

tahan lama, dan dapat digunakan kembali (reusable). Desain setiap sel biasanya dilengkapi dengan lubang drainase di bagian bawah untuk mencegah akumulasi air berlebih yang dapat menyebabkan pembusukan akar (root rot) [39].



Gambar 2.9 Tray semai

Penggunaan tray semai menawarkan beberapa keunggulan signifikan dibandingkan metode penyemaian konvensional di bedengan. Pertama, ia memungkinkan kontrol yang presisi terhadap lingkungan perakaran setiap bibit, termasuk media tanam, kelembapan, dan nutrisi, sehingga menghasilkan pertumbuhan yang seragam dan berkualitas [40]. Kedua, sistem sel individual meminimalkan kompetisi antar tanaman dan mencegah akar saling terjerat, yang secara drastis mengurangi stres dan kerusakan akar (syok transplantasi) saat bibit dipindahkan ke sistem penanaman yang lebih besar. Selain itu, penggunaan tray semai mengoptimalkan efisiensi penggunaan ruang, media tanam, dan air selama fase persemaian.

#### **2.2.10 Panel Surya**

Panel surya, yang secara teknis disebut juga modul fotovoltaik (photovoltaic module), adalah sebuah perangkat semikonduktor yang berfungsi untuk mengkonversi energi dari radiasi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung. Proses konversi energi ini didasarkan pada prinsip efek fotovoltaik, yaitu fenomena di mana foton dari cahaya matahari menumbuk material semikonduktor (umumnya silikon) dan melepaskan elektron, sehingga menghasilkan aliran arus listrik [41]. Sebuah modul panel surya terdiri dari serangkaian sel surya (solar cells) yang terhubung secara seri dan paralel untuk mencapai tegangan dan arus yang diinginkan.



Gambar 2.3 Panel Surya

Berdasarkan material dan teknologi pembuatannya, panel surya secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis utama. Jenis yang paling umum adalah panel surya berbasis silikon kristal, yang terbagi lagi menjadi panel monokristalin (*monocrystalline*) dan polikristalin (*polycrystalline*)[42]. Panel monokristalin dibuat dari kristal silikon tunggal yang murni, sehingga memiliki efisiensi konversi energi tertinggi (biasanya 17-22%) dan tampilan warna hitam yang seragam. Sementara itu, panel polikristalin dibuat dari peleburan beberapa kristal silikon, menjadikannya lebih ekonomis namun dengan efisiensi yang sedikit lebih rendah (15-17%) serta tampilan permukaan biru dengan pola acak. Selain itu, terdapat pula teknologi lapisan tipis (*thin-film*), seperti *amorphous silicon* (a-Si), *cadmium telluride* (CdTe), dan *copper indium gallium selenide* (CIGS), yang menawarkan fleksibilitas dan performa lebih baik pada kondisi cahaya rendah, meskipun efisiensinya secara umum masih di bawah teknologi kristal silikon.

Kinerja dan efisiensi dari panel surya sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama. Faktor-faktor tersebut meliputi intensitas iradiasi surya ( $G$ ) yang diterima permukaan panel, suhu operasional sel ( $T_c$ ), sudut datang cahaya, serta kondisi kebersihan permukaan modul dari debu atau kotoran (Siahaan, 2016). Daya keluaran maksimum ( $P_{maks}$ ) dari sebuah panel surya dapat dihitung menggunakan formula dasar berikut [43]:

$$P_{maks} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (1)$$

Dimana:

- a.  $P_{maks}$  = Daya keluaran maksimum
- b.  $V_{oc}$  = tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*)
- c.  $I_{sc}$  = arus hubung singkat (*short-circuit current*)
- d.  $FF$  = *Fill Factor*

Sementara itu, efisiensi ( $\eta$ ) dari panel surya, yang mendefinisikan seberapa baik panel mengubah cahaya matahari menjadi listrik, dihitung dengan rumus [44]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \times G} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

- a.  $A$  = luas permukaan panel (dalam m<sup>2</sup>)
- b.  $G$  = iradiasi surya standar yang diterima (umumnya 1000 W/m<sup>2</sup>).

Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya adalah berupa arus searah (DC), sehingga dalam implementasinya seringkali memerlukan komponen tambahan seperti *inverter* untuk mengubahnya menjadi arus bolak-balik (AC) agar sesuai dengan kebutuhan sebagian besar beban listrik. Sebagai teknologi kunci dalam pemanfaatan energi terbarukan, panel surya menjadi komponen fundamental dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk menyediakan energi bersih dan mengurangi emisi karbon.

### 2.2.11 Solar Charge Controller

*Solar Charge Controller* (SCC), atau pengontrol pengisian daya surya, adalah perangkat elektronik esensial dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid yang menggunakan baterai sebagai penyimpan energi. Fungsi utamanya adalah untuk meregulasi daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya untuk mengisi daya baterai secara efisien dan aman [45].



Gambar 2.11 *Solar Charge Controller*

Perangkat ini secara kontinu memonitor voltase baterai dan mengatur arus pengisian dari panel surya untuk mencegah pengisian berlebih (*overcharging*) dan pengosongan berlebih (*over-discharging*) [46]. *Overcharging* dapat menyebabkan kerusakan permanen pada baterai akibat panas berlebih dan penguapan elektrolit, sementara *over-discharging* dapat mengurangi umur siklus baterai secara drastis.

Terdapat dua teknologi utama yang digunakan dalam *solar charge controller*, yaitu Pulse Width Modulation (PWM) dan Maximum Power Point Tracking

(MPPT). Kontroler PWM bekerja seperti saklar elektronik yang mengatur aliran arus dengan memvariasikan lebar pulsa tegangan, menghubungkan panel surya langsung ke baterai saat voltase baterai rendah. Sebaliknya, kontroler MPPT merupakan teknologi yang lebih canggih, dilengkapi dengan konverter DC-DC yang mampu melacak dan mengekstraksi titik daya maksimum dari panel surya [47]. MPPT secara aktif menyesuaikan tegangan input dari panel agar dapat memanen energi hingga 30% lebih banyak dibandingkan PWM, terutama efektif pada kondisi iradiasi rendah atau suhu dingin. Selain fungsi utama tersebut, SCC juga dilengkapi dengan fitur proteksi lain seperti perlindungan terhadap arus hubung singkat (*short circuit*), polaritas terbalik, dan arus balik pada malam hari.

### 2.2.12 Baterai Aki

Baterai aki (*accumulator*) adalah sebuah perangkat elektrokimia yang berfungsi sebagai penyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia dan melepaskannya kembali saat diperlukan. Dalam konteks sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai memegang peranan krusial untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik dengan menyimpan kelebihan energi yang dihasilkan panel surya pada siang hari untuk digunakan pada malam hari atau saat kondisi cuaca mendung. Proses penyimpanan (pengisian) dan pelepasan (pengosongan) energi ini terjadi melalui reaksi redoks (reduksi-oksidasi) yang reversibel pada elektroda positif dan negatif yang direndam dalam larutan elektrolit [48].



Gambar 2.12 Baterai Aki

Jenis baterai yang umum digunakan untuk aplikasi PLTS adalah baterai asam timbal (*lead-acid*), yang terbagi lagi menjadi beberapa tipe seperti *Flooded Lead-Acid* (FLA) atau aki basah, *Absorbed Glass Mat* (AGM), dan *Gel*. Selain itu, teknologi yang lebih modern seperti litium-ion (*lithium-ion*) juga semakin banyak digunakan karena menawarkan densitas energi yang lebih tinggi dan umur siklus yang lebih panjang. Kinerja sebuah baterai ditentukan oleh beberapa parameter

teknis utama, antara lain [49]: tegangan nominal (Volt), kapasitas yang dinyatakan dalam *Ampere-hour* (Ah) yang menunjukkan jumlah arus yang dapat dialirkan selama periode waktu tertentu, *Depth of Discharge* (DoD) yang merepresentasikan persentase kapasitas yang dilepaskan, dan umur siklus (*cycle life*) yang mengindikasikan berapa kali baterai dapat diisi dan dikosongkan sebelum mengalami degradasi performa yang signifikan.

#### 2.2.14 Inverter

Inverter adalah sebuah perangkat konverter daya statis yang berfungsi untuk mengubah energi listrik arus searah (Direct Current / DC) menjadi energi listrik arus bolak-balik (Alternating Current / AC). Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), inverter merupakan komponen vital yang menjembatani daya DC yang dihasilkan oleh panel surya atau yang disimpan dalam baterai dengan beban (peralatan elektronik) yang umumnya beroperasi pada tegangan dan frekuensi AC (misalnya, 220V, 50Hz) [50]. Proses konversi ini dicapai melalui rangkaian saklar elektronik berkecepatan tinggi, seperti MOSFET atau Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), yang secara periodik membalik polaritas tegangan DC untuk menghasilkan bentuk gelombang AC [51].



Gambar 2.13 Inverter

Berdasarkan kualitas bentuk gelombang keluarannya, inverter dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama: *pure sine wave* (gelombang sinus murni) dan *modified sine wave* (gelombang sinus modifikasi). Inverter *pure sine wave* menghasilkan gelombang AC yang identik atau bahkan lebih baik dari kualitas listrik yang dipasok oleh jaringan publik (PLN), sehingga cocok untuk semua jenis beban, termasuk perangkat elektronik sensitif seperti komputer, peralatan medis, dan motor induktif. Sebaliknya, inverter *modified sine wave* menghasilkan bentuk

gelombang kotak yang mendekati sinusoida. Meskipun lebih ekonomis, jenis ini dapat menyebabkan masalah efisiensi, panas berlebih, atau bahkan kerusakan pada beberapa perangkat elektronik yang lebih kompleks [52]. Oleh karena itu, pemilihan jenis inverter sangat bergantung pada karakteristik beban yang akan disuplai.

#### 2.2.14 AC Watt Meter

Ac Wattmeter adalah instrumen pengukuran yang digunakan untuk menentukan besaran daya listrik nyata (real power) dalam satuan Watt (W) pada suatu rangkaian listrik. Prinsip dasar pengukuran daya oleh wattmeter didasarkan pada interaksi antara tegangan dan arus dalam rangkaian. Instrumen ini secara internal terdiri dari dua jenis kumparan: kumparan arus (current coil) yang terhubung secara seri dengan beban untuk mendeteksi arus (I), dan kumparan tegangan (voltage coil atau potential coil) yang terhubung secara paralel dengan beban untuk mendeteksi tegangan (V) [53].



Gambar 2.14 Watt Meter

Pada AC wattmeter analog jenis elektrodinamometer, interaksi medan magnet yang dihasilkan oleh kedua kumparan ini menyebabkan defleksi (penyimpangan) pada jarum penunjuk yang besarnya proporsional dengan hasil perkalian sesaat antara tegangan, arus, dan faktor daya. Dengan demikian, alat ini mengukur daya nyata sesuai dengan persamaan [54]:

$$P = V \times I \times \cos\phi \quad (1)$$

Di mana:

- a.  $P$  = daya nyata (Watt).
- b.  $V$  = tegangan RMS (Volt).
- c.  $I$  = arus RMS (Ampere).
- d.  $\cos\phi$  = faktor daya (*power factor*).

Sementara itu, AC wattmeter digital modern bekerja dengan mengambil sampel digital dari bentuk gelombang tegangan dan arus secara simultan, kemudian mengalikannya secara digital untuk menghitung dan menampilkan nilai daya secara akurat.

### 2.2.15 DC Meter

DC meter adalah instrumen ukur yang dirancang khusus untuk mengukur besaran-besaran listrik pada rangkaian arus searah (Direct Current). Berdasarkan besaran yang diukur, DC meter dapat diklasifikasikan menjadi voltmeter DC untuk mengukur tegangan (beda potensial) dan ammeter DC (amperemeter) untuk mengukur kuat arus listrik. Prinsip kerja fundamental dari DC meter analog pada umumnya didasarkan pada mekanisme kumparan putar magnet permanen (Permanent Magnet Moving Coil / PMMC) atau yang dikenal sebagai D'Arsonval galvanometer [55].



Gambar 2.15 Dc Meter

Mekanisme ini bekerja berdasarkan gaya Lorentz, di mana arus DC yang diukur dialirkan melalui sebuah kumparan yang berada di dalam medan magnet permanen. Interaksi antara medan magnet dan arus pada kumparan menghasilkan torsi (gaya putar) yang menyebabkan kumparan dan jarum penunjuk yang terpasang padanya bergerak [56]. Besarnya simpangan jarum penunjuk ini berbanding lurus (linear) dengan besarnya arus yang mengalir melalui kumparan. Untuk berfungsi sebagai ammeter, instrumen ini dihubungkan secara seri dengan beban dan memiliki resistansi internal yang sangat rendah. Sebaliknya, untuk berfungsi sebagai voltmeter, sebuah resistor pengali (*multiplier resistor*) dengan resistansi tinggi dipasang seri dengan mekanisme PMMC, dan instrumen dihubungkan secara paralel dengan komponen yang akan diukur tegangannya.

### 2.2.17 MCB (*Miniature Circuit Breaker*)

Miniature Circuit Breaker (MCB) adalah sebuah perangkat proteksi elektromekanis yang berfungsi untuk memutus aliran listrik secara otomatis ketika mendeteksi adanya arus berlebih (*overcurrent*), baik yang disebabkan oleh beban berlebih (*overload*) maupun hubung singkat (*short circuit*). MCB dirancang untuk menggantikan fungsi sekering lebur konvensional dengan keunggulan dapat di-reset atau dioperasikan kembali secara manual setelah gangguan teratasi tanpa perlu penggantian komponen [57].



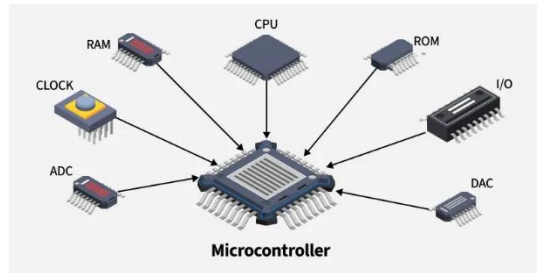
Gambar 2.16 MCB Miniatur Circuit Breaker

Proteksi pada MCB didasarkan pada mekanisme trip ganda (*dual-trip mechanism*) yang terdiri dari dua komponen utama. Pertama, elemen termal yang menggunakan keping bimetal. Ketika terjadi arus beban berlebih yang berlangsung lama, keping bimetal akan memanaskan dan melengkung, yang kemudian akan memicu mekanisme pemutus. Waktu pemutusan pada proteksi termal ini berbanding terbalik dengan besarnya arus berlebih. Kedua, elemen magnetis yang menggunakan solenoida (*kumparan*) [58]. Ketika terjadi lonjakan arus yang sangat tinggi secara tiba-tiba akibat hubung singkat, medan magnet kuat yang dihasilkan oleh solenoida akan secara instan menggerakkan tuas pemutus untuk memutus rangkaian dengan sangat cepat. Karakteristik teknis sebuah MCB ditentukan oleh arus nominal (*Ampere*), kapasitas pemutusan (*breaking capacity*) (*kA*), dan kurva trip (misalnya Tipe B, C, atau D) yang menunjukkan sensitivitas perangkat terhadap arus hubung singkat.

### 2.2.17 Micro Kontroller

Mikrokontroler (*microcontroller*) adalah sebuah sistem komputer fungsional yang terintegrasi dalam satu sirkuit terpadu (*Integrated Circuit / IC*) tunggal. Berbeda dengan mikroprosesor yang hanya memiliki unit pemrosesan pusat (*CPU*),

sebuah mikrokontroler dirancang sebagai system-on-a-chip (SoC) yang mandiri dengan menyertakan komponen-komponen esensial di dalamnya. Komponen tersebut meliputi CPU, memori (baik RAM untuk penyimpanan data sementara maupun memori non-volatil seperti Flash ROM atau EEPROM untuk penyimpanan program), serta port input/output (I/O) yang dapat diprogram [59].



Gambar 2.17 Mikrokontroller

Arsitektur terintegrasi ini memungkinkan mikrokontroler untuk berinteraksi langsung dengan dunia luar melalui pin I/O-nya, yang dapat dihubungkan ke berbagai sensor, aktuator (seperti motor dan relay), dan perangkat perifer lainnya. Fungsi utama mikrokontroler adalah untuk membaca data dari input (sensor), memproses data tersebut sesuai dengan program yang tersimpan di memorinya, dan menghasilkan output untuk mengendalikan suatu perangkat atau sistem [60]. Karena sifatnya yang ringkas, konsumsi daya yang rendah, dan kemampuannya untuk beroperasi dalam aplikasi spesifik tanpa memerlukan sistem operasi yang kompleks, mikrokontroler menjadi komponen fundamental dalam perancangan sistem tertanam (*embedded systems*), otomasi, dan perangkat *Internet of Things* (IoT).

Salah satu contoh mikrokontroler yang populer untuk aplikasi IoT adalah ESP32. Dikembangkan oleh *Espressif Systems*, ESP32 adalah mikrokontroler berbiaya rendah dan berdaya rendah yang telah dilengkapi dengan modul Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi. Keunggulan ini memudahkannya untuk terhubung ke jaringan internet dan berkomunikasi secara nirkabel dengan perangkat lain. Selain itu, ESP32 memiliki prosesor dual-core, pin I/O yang melimpah, dan mendukung berbagai protokol komunikasi, menjadikannya platform yang sangat serbaguna untuk pengembangan proyek otomasi, pemantauan jarak jauh, dan sistem kontrol cerdas.



Gambar 2.18 Mikrokontroler (ESP32)

Papan pengembangan ESP32, seperti model DEVKIT-V1 yang umum digunakan, biasanya menyediakan 30 hingga 38 pin fisik. Namun, tidak semua pin ini dapat digunakan sebagai *General Purpose Input/Output* (GPIO). Dari total pin tersebut, sekitar 25 pin dapat difungsikan sebagai GPIO untuk interaksi dengan komponen eksternal. Pin-pin ini bersifat *multiplexed*, artinya satu pin fisik dapat memiliki beberapa fungsi alternatif yang dapat dikonfigurasi melalui perangkat lunak. Fungsi-fungsi tersebut antara lain sebagai pin digital input/output, Analog-to-Digital Converter (ADC) untuk membaca data sensor analog, Digital-to-Analog Converter (DAC), sensor sentuh kapasitif (*capacitive touch*), serta mendukung berbagai protokol komunikasi serial seperti UART, I2C, dan SPI. Terdapat juga pin khusus untuk daya, seperti 3.3V, 5V (VIN), dan GND (Ground), serta pin kontrol seperti EN (*Enable*) dan BOOT [61]. Fleksibilitas konfigurasi pin ini memungkinkan ESP32 untuk terhubung dengan beragam jenis sensor dan aktuator secara efisien.

### 2.2.18 Sensor pH

Sensor pH adalah suatu transduser analitik yang berfungsi untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan (alkalinitas) dari suatu larutan. Pengukuran ini didasarkan pada konsentrasi ion hidrogen ( $H^+$ ) dalam larutan tersebut. Sensor pH yang paling umum digunakan adalah elektroda pH kombinasi, yang bekerja berdasarkan prinsip potensiometri [62]. Prinsip ini melibatkan pengukuran beda potensial (tegangan) yang timbul antara dua elektroda: elektroda pengukur (measuring electrode) dan elektroda referensi (reference electrode), yang keduanya terintegrasi dalam satu badan sensor.



Gambar 2.19 Sensor pH

Elektroda pengukur biasanya terbuat dari kaca dengan bohlam tipis di ujungnya yang sensitif terhadap ion  $H^+$ . Ketika sensor dicelupkan ke dalam larutan, terjadi pertukaran ion antara larutan dan membran kaca, yang menghasilkan tegangan listrik. Besarnya tegangan ini berbanding lurus secara logaritmik dengan konsentrasi ion  $H^+$ , sesuai dengan persamaan Nernst [63]. Elektroda referensi, yang umumnya terbuat dari Argentum/Perak Klorida ( $Ag/AgCl$ ), menyediakan potensial referensi yang stabil dan tidak terpengaruh oleh komposisi larutan sampel. Beda potensial antara kedua elektroda ini kemudian diukur dan dikonversi oleh sirkuit elektronik menjadi nilai pH dalam skala 0 hingga 14 [64]. Untuk memastikan akurasi, sensor pH memerlukan kalibrasi secara berkala menggunakan larutan penyangga (*buffer solution*) dengan nilai pH yang telah diketahui.

### 2.2.19 Sensor DHT22

Sensor DHT22, juga dikenal dengan nama AM2302, adalah sebuah sensor digital komposit yang berfungsi untuk mengukur dua parameter lingkungan sekaligus: suhu (temperatur) dan kelembapan relatif (relative humidity). Sensor ini terdiri dari dua komponen utama yang terintegrasi dalam satu wadah, yaitu sebuah sensor kelembapan kapasitif dan sebuah termistor tipe Negative Temperature Coefficient (NTC) [65]. Selain itu, di dalamnya juga terdapat sebuah mikrokontroler 8-bit yang bertugas untuk memproses data dari kedua sensor dan mengeluarkan sinyal digital yang telah terkalibrasi.



Gambar 2.20 Sensor DHT22

Prinsip kerja untuk pengukuran kelembapan didasarkan pada perubahan nilai kapasitansi. Sensor ini menggunakan sebuah substrat penahan kelembapan yang diapit oleh dua elektroda. Ketika uap air di udara diserap oleh substrat, konstanta dielektriknya berubah, yang secara langsung mengubah nilai kapasitansi antara kedua elektroda. Untuk pengukuran suhu, sensor ini memanfaatkan termistor NTC, yaitu sebuah resistor yang nilai resistansinya menurun secara prediktif seiring dengan kenaikan suhu [66]. Mikrokontroler internal membaca perubahan kapasitansi dan resistansi ini, mengonversinya menjadi nilai kelembapan dan suhu, lalu mengirimkan data tersebut sebagai sinyal digital melalui satu jalur data. Hal ini menyederhanakan proses antarmuka dengan mikrokontroler eksternal seperti Arduino atau ESP32, karena tidak memerlukan sirkuit *Analog-to-Digital Converter* (ADC) tambahan.

#### 2.2.20 Sensor (DS18B20)

Sensor DS18B20 adalah sebuah termometer digital presisi yang berfungsi untuk mengukur suhu dengan akurasi tinggi. Salah satu fitur utama yang membedakan sensor ini adalah penggunaannya terhadap protokol komunikasi 1-Wire, yang dikembangkan oleh Dallas Semiconductor. Protokol ini memungkinkan komunikasi dua arah (pembacaan suhu dan konfigurasi) antara sensor dan mikrokontroler hanya melalui satu jalur data tunggal, ditambah satu jalur untuk ground, sehingga menyederhanakan perkabelan secara signifikan [67].



Gambar 2.21 Sensor (DS18B20)

Setiap sensor DS18B20 memiliki alamat unik 64-bit yang tersimpan di dalam ROM internalnya. Fitur ini memungkinkan beberapa sensor DS18B20 untuk dihubungkan dan beroperasi secara paralel pada bus 1-Wire yang sama, yang dikenal sebagai mode "*parasite power*". Sensor ini mampu mengukur suhu dalam rentang  $-55^{\circ}\text{C}$  hingga  $+125^{\circ}\text{C}$  dan mengeluarkan data dalam format digital, sehingga tidak memerlukan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) eksternal [66].

Resolusi pengukurannya dapat dikonfigurasi oleh pengguna mulai dari 9-bit hingga 12-bit, yang mempengaruhi kecepatan konversi dan presisi pengukuran suhu. Karena akurasi dan kemudahan implementasinya, sensor ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi pemantauan suhu, dan tersedia dalam bentuk komponen TO-92 serta dalam versi probe tahan air (*waterproof*) yang ideal untuk mengukur suhu cairan.

#### 2.2.21 Sensor Cahaya LDR

Light Dependent Resistor (LDR), atau disebut juga fotoresistor, adalah sebuah komponen elektronik pasif yang nilai resistansinya dapat berubah secara signifikan sebagai respons terhadap intensitas cahaya yang mengenainya. Sensor ini terbuat dari material semikonduktor dengan resistivitas tinggi, seperti Kadmium Sulfida (CdS), yang didepositkan pada sebuah substrat isolator. Prinsip kerja LDR didasarkan pada fenomena fotokonduktivitas, di mana foton (partikel cahaya) yang menumbuk material semikonduktor akan memberikan energi yang cukup untuk melepaskan elektron dari ikatan valensinya, sehingga menciptakan pasangan elektron-lubang (electron-hole pair) [68].



Gambar 2.22 Sensor Cahaya LDR

Peningkatan jumlah pembawa muatan bebas (elektron dan lubang) ini akan menurunkan nilai resistansi material secara drastis. Dengan demikian, terdapat hubungan berbanding terbalik antara intensitas cahaya yang diterima oleh LDR dengan nilai resistansinya; semakin terang cahaya, semakin rendah nilai resistansinya, dan sebaliknya, dalam kondisi gelap resistansinya akan sangat tinggi (dapat mencapai beberapa Mega-ohm). Karena output-nya berupa perubahan resistansi, LDR umumnya diimplementasikan dalam sebuah rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) untuk mengubah perubahan resistansi tersebut menjadi

perubahan tegangan yang dapat dibaca oleh pin analog (*Analog-to-Digital Converter* / ADC) pada sebuah mikrokontroler [69].

#### 2.2.22 Sensor TDS (*Total Dissolved Solids*)

Sensor TDS (*Total Dissolved Solids*) adalah sebuah instrumen analitik yang digunakan untuk mengukur konsentrasi total zat padat terlarut dalam suatu larutan, yang umumnya dinyatakan dalam satuan parts per million (ppm) atau miligram per liter (mg/L) [70]. Zat padat terlarut ini mencakup garam-garam anorganik (seperti kalsium, magnesium, kalium, natrium), mineral, dan sejumlah kecil bahan organik. Prinsip kerja sensor TDS tidak secara langsung mengukur massa partikel, melainkan bekerja berdasarkan pengukuran konduktivitas listrik (*Electrical Conductivity* / EC) larutan.



Gambar 2.23 Sensor TDS

Sensor ini terdiri dari sepasang elektroda yang dicelupkan ke dalam larutan. Sebuah tegangan bolak-balik (AC) diterapkan pada elektroda tersebut, dan sensor mengukur seberapa mudah arus listrik mengalir melalui larutan. Larutan dengan konsentrasi ion terlarut yang tinggi akan memiliki konduktivitas listrik yang lebih tinggi pula. Nilai EC yang terukur kemudian dikonversi menjadi nilai TDS menggunakan sebuah faktor konversi ( $k$ ), dengan persamaan umum [71]:

$$TDS(ppm) = k \times EC(\mu S/cm) \quad (1)$$

Nilai faktor konversi  $k$  biasanya berkisar antara 0.5 hingga 0.7, tergantung pada komposisi ionik dari larutan yang diukur. Dalam aplikasi hidroponik dan pemantauan kualitas air, sensor TDS menjadi alat vital untuk memastikan bahwa konsentrasi nutrisi atau total zat terlarut berada dalam rentang yang optimal untuk pertumbuhan tanaman atau sesuai dengan baku mutu air [72].

### 2.2.23 Sensor Warna TCS34725

Sensor Warna TCS34725 adalah sebuah sensor cahaya digital canggih yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur warna dari suatu objek atau sumber cahaya. Sensor ini bekerja dengan cara mengukur intensitas cahaya pada empat kanal yang berbeda: Merah (R), Hijau (G), Biru (B), dan Bening (Clear atau tanpa filter). Secara internal, sensor ini memiliki sebuah matriks fotodioda berukuran 3x4 yang terintegrasi dengan filter warna spesifik di atasnya. Ketika cahaya mengenai sensor, filter-filter ini hanya akan meneruskan spektrum warna yang sesuai ke fotodioda di bawahnya [73].



Gambar 2.24 Sensor warna TCS34725

Salah satu keunggulan utama dari TCS34725 adalah adanya filter pemblokir radiasi inframerah (IR) yang terintegrasi. Filter ini sangat penting untuk meminimalkan distorsi spektral dari komponen cahaya inframerah, sehingga menghasilkan pengukuran warna yang lebih akurat dan mendekati persepsi mata manusia. Setelah mendeteksi intensitas cahaya pada setiap kanal (R, G, B, dan Clear), sensor ini menggunakan konverter analog-ke-digital (*Analog-to-Digital Converter* / ADC) internal untuk mengubah data analog tersebut menjadi data digital 16-bit [74]. Data digital ini kemudian dapat diakses oleh mikrokontroler melalui antarmuka komunikasi I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*), memungkinkan sistem untuk merekonstruksi dan mengidentifikasi warna yang dideteksi secara presisi.

### 2.2.24 Machine Learning

*Machine Learning* (Pembelajaran Mesin) adalah cabang dari kecerdasan buatan (Artificial Intelligence / AI) yang berfokus pada pengembangan algoritma dan model statistik yang memungkinkan sistem komputer untuk "belajar" dari data tanpa diprogram secara eksplisit. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi

pola, membuat prediksi, dan mengambil keputusan berdasarkan data historis yang dianalisis. Proses pembelajaran ini melibatkan pemberian sejumlah besar data kepada model, yang kemudian menyesuaikan parameter internalnya untuk meminimalkan kesalahan (error) antara output prediksinya dan hasil sebenarnya.

Secara umum, pendekatan *machine learning* diklasifikasikan ke dalam tiga model utama:

1. *Supervised Learning* (Pembelajaran Terarah): Pada pendekatan ini, algoritma belajar dari dataset yang telah diberi label, di mana setiap data input memiliki output yang benar. Tujuannya adalah untuk mempelajari fungsi pemetaan yang dapat memprediksi output untuk data baru yang belum pernah dilihat sebelumnya. Contoh aplikasinya meliputi klasifikasi (misalnya, deteksi spam email) dan regresi (misalnya, prediksi harga rumah).
2. *Unsupervised Learning* (Pembelajaran Tak Terarah): Algoritma ini bekerja dengan data yang tidak berlabel dan mencoba menemukan struktur atau pola tersembunyi di dalamnya. Tujuannya adalah untuk eksplorasi data. Contoh aplikasinya termasuk *clustering* (misalnya, segmentasi pelanggan) dan asosiasi (misalnya, analisis keranjang belanja).
3. *Reinforcement Learning* (Pembelajaran Penguatan): Dalam paradigma ini, sebuah agen (*agent*) belajar untuk mengambil tindakan dalam suatu lingkungan untuk memaksimalkan imbalan (*reward*) kumulatif. Agen belajar melalui metode *trial-and-error*, menerima umpan balik positif atau negatif atas tindakannya. Pendekatan ini umum digunakan dalam robotika, permainan strategis, dan sistem kontrol otonom.

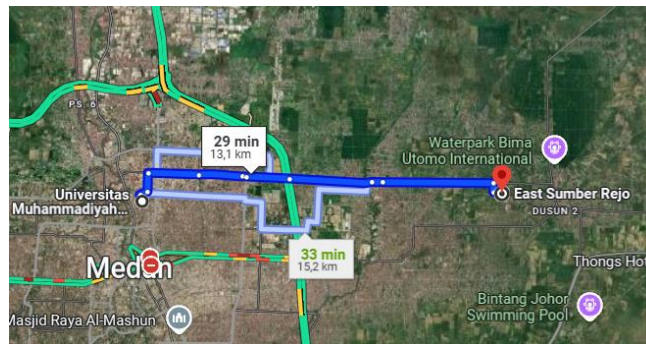
## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Tempat Dan Waktu Penelitian

##### 3.1.1 Tempat Penelitian

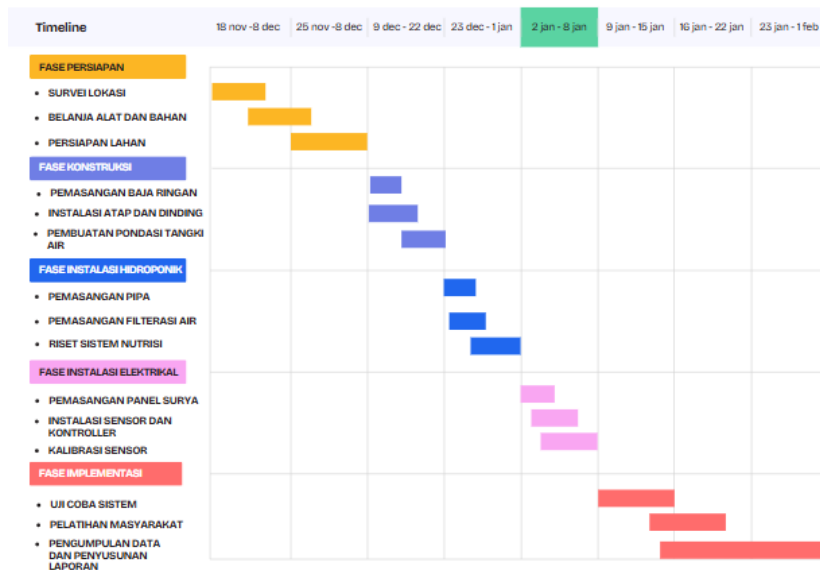
Penelitian dilaksanakan di Desa Sambirejo Timur, Kecamatan Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang (Sumatera Utara) berbatasan dengan Desa Tembung di barat, Bandar Klippa di utara, Amplas di selatan, dan Sena di timur pada koordinat  $3^{\circ}35'22.1''\text{LU}$ ;  $98^{\circ}47'11.0''\text{BT}$ , dengan luas wilayah  $\pm 429,892$  ha dan berjarak sekitar 13,1 km dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Lokasi ini dipilih karena karakteristik sosial-spasial desa yang relevan dengan tujuan penelitian, yakni pengembangan *smart greenhouse* hidroponik berbasis IoT–ML untuk memaksimalkan produktivitas pada lahan terbatas.



Gambar 3.1 Desa Sambirejo Timur

##### 3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian direncanakan selama  $\pm 2,5$  bulan, yaitu 18 November 2024–1 Februari 2025, dengan tahapan terstruktur sebagai berikut: sosialisasi, survei, dan analisis kebutuhan (18 November–8 Desember 2024); pengadaan material dan persiapan lahan (25 November–8 Desember); konstruksi *greenhouse* (9–22 Desember); instalasi sistem hidroponik (23 Desember–1 Januari); instalasi *smart system* (panel surya, sensor, pengendali) dan kalibrasi (2–8 Januari); uji coba sistem (16–22 Januari); pelatihan masyarakat/operasional (9–15 Januari); serta monitoring–evaluasi dan penyusunan laporan (23–31 Januari). Rangkaian tahapan dan rentang tanggal tersebut diadopsi langsung dari proposal program yang disahkan untuk Desa Sambirejo Timur.



Gambar 3.1 Waktu Penelitian.

### 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut alat komponen dan alat yang digunakan antara lain:

#### 3.2.1 Bahan Penelitian

Berikut ini adalah tabel bahan yang digunakan pada penelitian:

Tabel 3.1 Bahan Penelitian

| No | Item                                  | Keterangan               |
|----|---------------------------------------|--------------------------|
| 1  | Kanal C 75 1.2 mm (6 m)               | Rangka <i>greenhouse</i> |
| 2  | Reng 0.40 (6 m)                       | Rangka/penyangga atap    |
| 3  | Baut seng SDS 2 inch                  | Fastener rangka/atap     |
| 4  | Baut seng SDS 1 inch                  | Fastener rangka/atap     |
| 5  | Mata bor comp.                        | Consumable pemotong      |
| 6  | Mata gerinda potong                   | Consumable pemotong      |
| 7  | Mata gerinda kasar/gosok              | Consumable pengikis      |
| 8  | Media tanam rockwool                  | Pembibitan               |
| 9  | Paket tray semai (10 tray+alas+cover) | Persemaian               |
| 10 | Benih (bayam, kangkung, selada)       | Bibit tanaman            |
| 11 | AB Mix 0.5 L (konsentrat)             | Nutrisi hidropunik       |

|           |                                   |                           |
|-----------|-----------------------------------|---------------------------|
| <b>12</b> | Nutrisi AB Mix 100 L              | Nutrisi hidroponik        |
| <b>13</b> | PCB dot-matrix 7Ã—9 cm            | Papan proyek              |
| <b>14</b> | Kabel jumper (MM, MF, FF)         | Kabel perakitan           |
| <b>15</b> | Kayu 1Ã—2 cm                      | Konstruksi ringan         |
| <b>16</b> | Paku 2 inch                       | Pengikat kayu             |
| <b>17</b> | Insect net 3Ã—30 m                | Dinding <i>greenhouse</i> |
| <b>18</b> | Plastik UV 200 Î¼m (8Ã—6 m)       | Atap <i>greenhouse</i>    |
| <b>19</b> | Lat kayu penahan plastik          | Penahan atap plastik      |
| <b>20</b> | Benang bangunan                   | Bantu pemasangan          |
| <b>21</b> | Kabel PV 2Ã—2.5 mm + MC4<br>(5 m) | Kabel panel surya         |
| <b>22</b> | Talang PVC 4 m                    | Saluran NFT               |
| <b>23</b> | Ensel pintu                       | Fitting                   |
| <b>24</b> | Grendel pintu                     | Fitting                   |
| <b>25</b> | Semen (Semen Padang @40 kg)       | Konstruksi pondasi        |
| <b>26</b> | Pasir (8 goni)                    | Konstruksi                |
| <b>27</b> | Krikil/sertu                      | Konstruksi                |
| <b>28</b> | Pasir timbunan (2 truk)           | Perataan lahan            |
| <b>29</b> | Selang 1/2 inch (3 m)             | Distribusi air            |
| <b>30</b> | Ring klem 1 1/2 inch              | Pengikat selang/pipa      |
| <b>31</b> | Pipa 3 inch                       | Instalasi air             |
| <b>32</b> | Pipa 2 inch                       | Instalasi air             |
| <b>33</b> | Pipa 1 1/2 inch                   | Instalasi air             |
| <b>34</b> | Elbow 1 1/2 inch                  | Sambungan pipa            |
| <b>35</b> | Tutup pipa 3 inch                 | Penutup jalur             |
| <b>36</b> | Tutup pipa 2 inch                 | Penutup jalur             |
| <b>37</b> | Reducer 3" ke 1 1/2"              | Sambungan pipa            |
| <b>38</b> | Baut seng SDS (1 kg)              | Fastener tambahan         |
| <b>39</b> | TDS-3 & pH Meter (kit)            | Alat ukur nutrisi & pH    |
| <b>40</b> | Sensor TDS (Meter V1.0)           | Sensor kualitas air       |
| <b>41</b> | Sensor pH PH-4502C                | Sensor pH air             |

|    |                                      |                                |
|----|--------------------------------------|--------------------------------|
| 42 | Sensor DS18B20                       | Sensor suhu air/pipa           |
| 43 | Sensor DHT22                         | Sensor suhu & kelembapan udara |
| 44 | LCD 16x2 + Modul I2C                 | Tampilan karakter              |
| 45 | LCD 20x4                             | Tampilan karakter              |
| 46 | RTC DS3231                           | Waktu real-time                |
| 47 | Arduino Uno R3                       | Mikrokontroler                 |
| 48 | Relay 5V 2 Channel                   | Pengendali beban               |
| 49 | Breadboard mini                      | Perakitan tanpa solder         |
| 50 | ESP32 DoIT                           | Mikrokontroler IoT             |
| 51 | Base Plate ESP32 + Adaptor 9V 1A     | Aksesori/penyokong catu        |
| 52 | Pompa Resun SP-2500 (18 W)           | Sirkulasi nutrisi              |
| 53 | Pompa SKP-104                        | Sirkulasi/transfer air         |
| 54 | Wattmeter stop-kontak (AC)           | Ukur daya AC                   |
| 55 | Wattmeter DC 60V 100A                | Ukur tegangan/arus/daya DC     |
| 56 | Solar Charge Controller MPPT 60A 12V | Pengendali pengisian PV        |
| 57 | Panel surya LONGI 580 Wp             | Sumber energi                  |
| 58 | Inverter 12Vâ†’220VAC 1000 W         | Catu beban AC                  |

### 3.2.2 Alat Penelitian

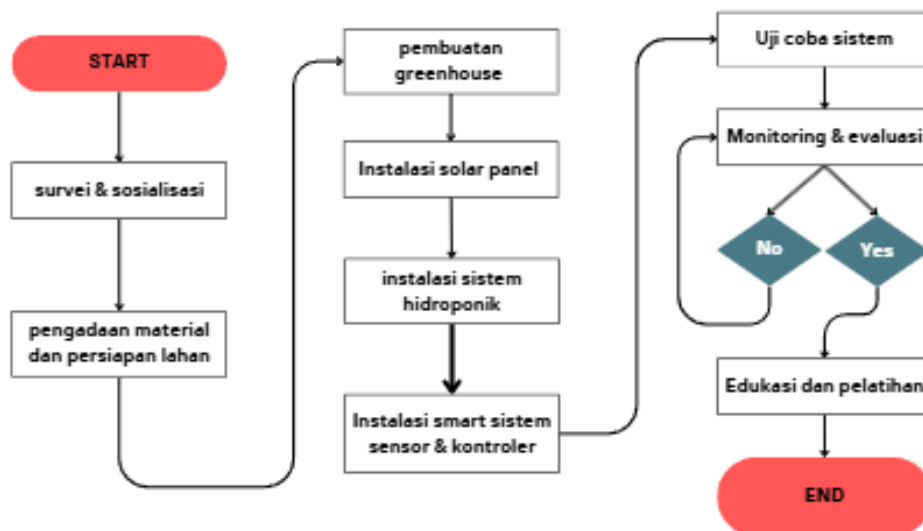
Berikut ini adalah alat yang digunakan untuk penelitian:

Tabel 3.2 Alat yang digunakan

| No | Item                    | Catatan                  |
|----|-------------------------|--------------------------|
| 1  | Meteran 10 Meter        | Alat ukur panjang        |
| 2  | Martil                  | Perkakas tangan          |
| 3  | Siku Meter              | Pengukur sudut/ketegakan |
| 4  | Tang                    | Perkakas tangan          |
| 5  | Jirifarm Sprayer 500 ml | Penyemprot manual        |
| 6  | Suntikan takaran 12 ml  | Pengukur volume nutrisi  |

|    |                                |                                |
|----|--------------------------------|--------------------------------|
| 7  | Gelas ukur 1 liter             | Pengukur volume                |
| 8  | Bor INGCO                      | Perkakas listrik               |
| 9  | Gerinda INGCO                  | Perkakas listrik               |
| 10 | Waterpass 40 cm                | Alat ukur ketegakan/level      |
| 11 | Gergaji tangan                 | Perkakas potong                |
| 12 | Gun stapler / hektar<br>tembak | Perkakas pengikat              |
| 13 | Mata bor hole saw              | Aksesori bor (pemotong lubang) |

### 3.3 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

1. Mulai (START) - Proses dimulai dengan persiapan awal.
2. Survei dan Sosialisasi - Langkah pertama adalah survei lokasi dan sosialisasi kepada pihak terkait atau masyarakat sekitar untuk memastikan pemahaman dan kesiapan semua pihak dalam proyek ini.
3. Pengadaan Material dan Persiapan Lahan - Setelah survei dan sosialisasi, langkah selanjutnya adalah pengadaan material yang dibutuhkan serta persiapan lahan tempat *greenhouse* akan didirikan.

4. Pembuatan *Greenhouse* - Dengan material yang tersedia dan lahan yang telah siap, dilakukan pembangunan *greenhouse* sebagai tempat untuk sistem hidroponik.
5. Instalasi Solar Panel - Panel surya diinstalasi untuk menyediakan sumber energi terbarukan yang akan mendukung operasional sistem secara berkelanjutan.
6. Instalasi Sistem Hidroponik - Setelah panel surya terpasang, dilanjutkan dengan instalasi sistem hidroponik yang menjadi inti dari proses pertanian modern ini.
7. Instalasi Sistem Sensor dan Kontroler (Smart System) - Langkah selanjutnya adalah memasang sistem sensor dan kontroler pintar yang akan memantau kondisi tanaman serta lingkungan *greenhouse*, seperti kelembapan, suhu, dan kebutuhan nutrisi setelah itu data akan diambil sebagai dataset *machine learning*.
8. Uji Coba Sistem - Setelah semua instalasi selesai, dilakukan uji coba untuk memastikan seluruh sistem berjalan dengan baik dan sesuai dengan rancangan.
9. Monitoring dan Evaluasi - Sistem kemudian dimonitor dan dievaluasi secara berkala. Jika ada kendala atau kekurangan (No), maka dilakukan perbaikan atau penyesuaian hingga sistem berfungsi optimal.
10. Edukasi dan Pelatihan - Apabila sistem telah berfungsi sesuai dengan yang diharapkan (Yes), tahap akhir adalah memberikan edukasi dan pelatihan kepada operator atau petani yang akan menjalankan dan merawat sistem ini.
11. Akhir (END) - Proses selesai setelah edukasi dan pelatihan diberikan, dan sistem siap digunakan secara mandiri.

### **3.4 Metode Pembuatan Alat Penelitian**

Pembuatan alat *smart greenhouse* HYDROTECH dilakukan melalui beberapa tahapan yang terstruktur. Adapun tahap-tahap proses pembuatan alat adalah sebagai berikut:

#### **3.4.1 Perancangan dan Konstruksi *Greenhouse*.**

Berikut ini adalah desain arsitektur *greenhouse*:

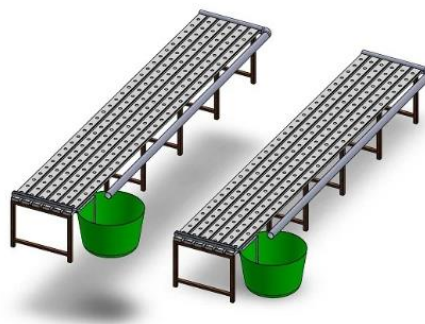


Gambar 3.2 Desain *Greenhouse*

Tahap ini, dimulai dengan perancangan desain struktur *greenhouse* menggunakan perangkat lunak *sketchup*. Desain dari *smart greenhouse* ini memiliki dimensi Panjang 7 meter, lebar 4 meter, dan tinggi 3 meter. Struktur utama dibangun menggunakan rangka baja ringan yang dilapisi dengan dua jenis material. Sisi atap menggunakan Plastik UV untuk memaksimalkan transmisi cahaya matahari sekaligus menjadi tempat instalasi panel surya sebagai sumber energi utama. Sementara itu, sisi dinding dilapisi dengan *Insect Net* yang berfungsi sebagai penghalang masuknya hama serangga namun tetap menjaga sirkulasi udara di dalam *greenhouse* dan dilanjutkan dengan konstruksi fisik *greenhouse*. Rangka utama dibangun menggunakan 20 batang baja ringan Kanal C 75 dan 24 batang Reng 0.40. Struktur kemudian ditutup menggunakan Plastik UV 200 micron sebagai atap dan *Insect Net* 50 mesh sebagai dinding untuk proteksi.

### 3.4.2 Instalasi Sistem Hidroponik.

Setelah kerangka fisik siap, dilakukan perakitan sistem hidroponik NFT. Dimulai terlebih dahulu dengan membuat desain sistem hidroponik dengan perangkat lunak *sketchup*:

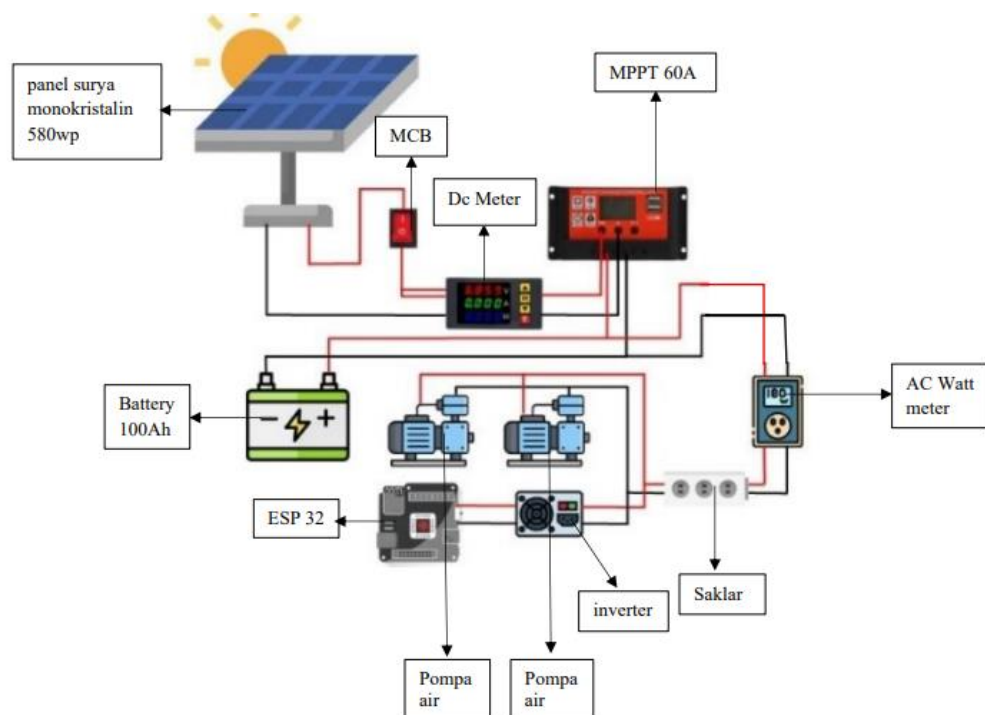


Gambar 3.3 Desain Hidroponik

Instalasi ini menggunakan 12 talang hidroponik berbahan PVC, di mana setiap talang memiliki panjang 6 meter dan dilubangi sebanyak 30 lubang tanam berdiameter 32 mm dengan jarak antar lubang 20 cm, sehingga total kapasitas sistem mencapai 360 lubang tanam. Sistem ini didukung oleh dudukan berbahan kayu dan menggunakan dua buah pompa air untuk sirkulasi larutan nutrisi.

### 3.4.3 Instalasi Sistem Catu Daya

Tahap ini berfokus pada pemasangan sistem energi terbarukan. Sebuah panel surya monokristalin berdaya 580 Wp dipasang di atap *greenhouse*. Gambar 3.4 Menunjukkan rangkaian solar panel untuk catu sumber daya *greenhouse*

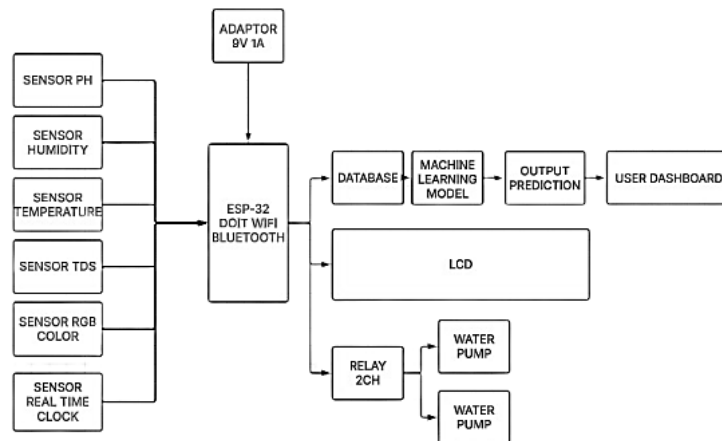


Gambar 3.4 Rangkaian Solar Panel

Panel ini terhubung ke sebuah baterai VRLA GEL 12V 100Ah melalui *Solar Charge Controller* MPPT 60A. Untuk memenuhi kebutuhan listrik pompa AC, dipasang sebuah inverter 1000 Watt yang mengubah tegangan 12V DC dari baterai menjadi 220V AC.

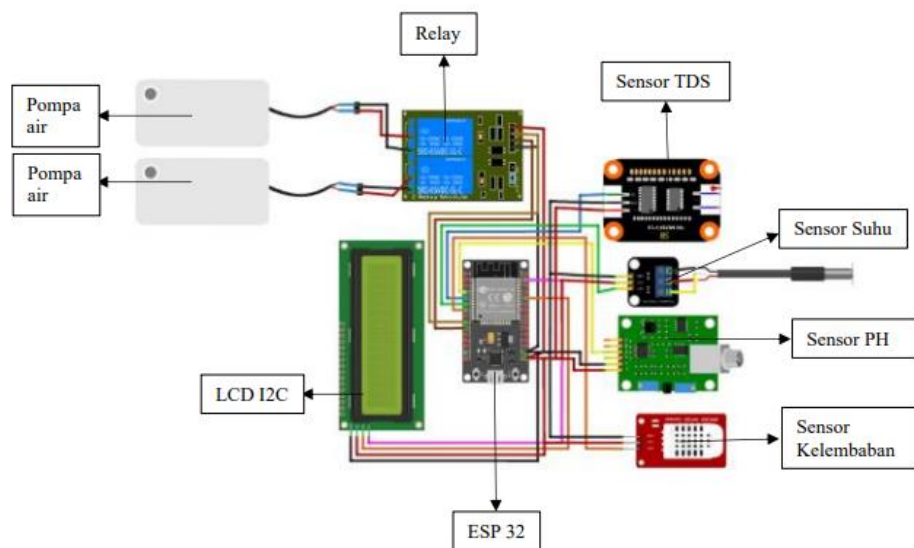
### 3.4.4 Instalasi dan Integrasi Sistem Kontrol.

Adapun blok diagram bagan perancangan alat adalah sebagai berikut:



Gambar 3.5 Blok Diagram Perancangan Alat

Pada tahap ini, instrumentasi dirancang untuk memantau dan mengendalikan parameter lingkungan serta nutrisi pada *smart greenhouse* hidroponik secara otomatis. Sistem ini menggunakan serangkaian sensor sebagai unit masukan (input), yang terdiri dari sensor pH dan sensor TDS untuk mengukur kualitas larutan nutrisi, sensor humidity dan sensor temperature untuk memonitor kondisi suhu dan kelembapan udara, sensor RGB color untuk mendeteksi warna daun tanaman, serta sensor Real Time Clock untuk pencatatan waktu. Gambar 3.5 Rangkaian alat sistem kontrol *greenhouse*



Gambar 3.5 Rangkaian Sistem Kontrol *Greenhouse*

Sinyal digital dari sensor suhu dan kelembapan DHT22 serta sensor suhu air DS18B20 terhubung ke pin GPIO mikrokontroler. Sementara itu, beberapa

sensor lain seperti sensor pH, TDS, warna (TCS34725), dan modul Real Time Clock (RTC) dihubungkan ke mikrokontroler melalui jalur komunikasi I<sup>2</sup>C. Mikrokontroler ESP32 digunakan untuk memproses seluruh sinyal dari sensor-sensor ini untuk menjalankan dua fungsi utama. Pertama, untuk mengaktifkan modul relay 2-channel yang digunakan untuk menggerakkan dua buah pompa air sirkulasi nutrisi. Kedua, untuk menampilkan seluruh data status sistem dan pembacaan sensor secara visual pada layar LCD yang juga terhubung melalui antarmuka I<sup>2</sup>C. Berikut adalah tabel konfigurasi pin mikrokontroler ESP32 yang digunakan pada rangkaian ini:

Tabel 3.3 konfigurasi pin mikrokontroler ESP32 yang

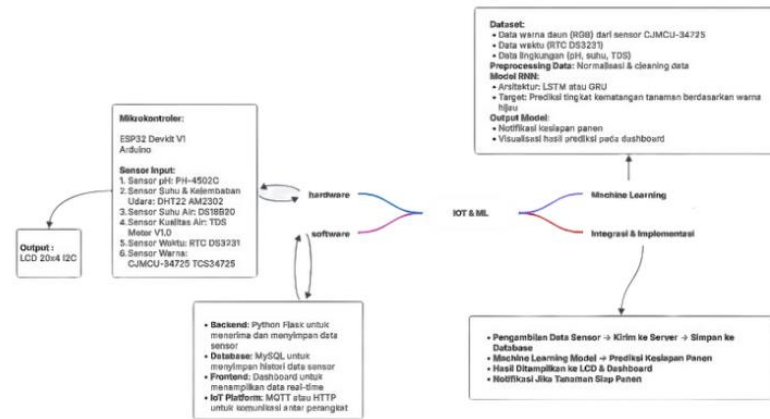
| Komponen                                        | Pin                          |
|-------------------------------------------------|------------------------------|
| Sensor Suhu & Kelembapan (DHT22)                | GPIO 4                       |
| Sensor Suhu Air (DS18B20)                       | GPIO 5                       |
| Sensor pH                                       | SDA (GPIO 21), SCL (GPIO 22) |
| Sensor TDS                                      | SDA (GPIO 21), SCL (GPIO 22) |
| Sensor Warna (TCS34725)                         | SDA (GPIO 21), SCL (GPIO 22) |
| RTC (DS3231)                                    | SDA (GPIO 21), SCL (GPIO 22) |
| LCD 16x2 / 20x4 (dengan modul I <sup>2</sup> C) | SDA (GPIO 21), SCL (GPIO 22) |
| Relay Channel 1 (Pompa 1)                       | GPIO 26                      |
| Relay Channel 2 (Pompa 2)                       | GPIO 27                      |
| VCC (Untuk semua modul & sensor)                | 3.3V / 5V (VIN)              |
| GND (Untuk semua modul & sensor)                | GND                          |

Apabila semua komponen telah terangkai, program yang berisi logika kendali dan pemantauan diunggah ke mikrokontroler ESP32. Setelah itu, dilakukan proses kalibrasi pada sensor-sensor analitik seperti sensor pH dan TDS menggunakan larutan standar untuk menjamin akurasi dan validitas data yang akan dibaca oleh sistem.

### 3.4.5 Pengembangan Model *Machine Learning*.

Data yang diperoleh dari seluruh sensor secara kontinu dikirim dan disimpan ke dalam *database* MySQL untuk membentuk *dataset*. *Dataset* ini

mencakup data lingkungan (pH, suhu, TDS) serta data spesifik tanaman (warna daun RGB) yang diberi stempel waktu. Gambar 3.6 menunjukkan Arsitektur *Machine Learning*



Gambar 3.6 Arsitektur *Machine Learning*

Data tersebut kemudian melalui tahap *preprocessing* (normalisasi dan pembersihan data) sebelum digunakan untuk melatih model *Recurrent Neural Network* (RNN) dengan arsitektur LSTM atau GRU. Tujuan utama model ini adalah untuk memprediksi tingkat kematangan dan estimasi waktu panen tanaman berdasarkan pola data yang telah dipelajari. Tahap terakhir adalah pengujian sistem secara menyeluruh. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa semua komponen perangkat keras berfungsi, perangkat lunak berjalan sesuai logika, dan model *machine learning* mampu memberikan hasil prediksi yang divisualisasikan pada *dashboard* pemantauan.

### 3. 5 Metode Pengujian Alat

Setelah seluruh proses pembuatan alat selesai, dilakukan serangkaian pengujian untuk memastikan bahwa sistem *smart greenhouse* HYDROTECH dapat berfungsi sesuai dengan perancangan. Metode pengujian alat dibagi menjadi beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Pengujian Fungsional Perangkat Keras. Tahap ini bertujuan untuk memverifikasi fungsi setiap komponen perangkat keras secara individual. Pengujian meliputi:

- a. Validasi Sensor: Setiap sensor (pH, TDS, DHT22, DS18B20, TCS34725) diuji untuk memastikan dapat memberikan pembacaan data yang akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.
  - b. Uji Aktuator: Pompa air yang terhubung pada modul *relay* diuji untuk memastikan dapat diaktifkan dan dinonaktifkan sesuai perintah dari mikrokontroler.
  - c. Uji Catu Daya: Sistem panel surya, *solar charge controller*, dan baterai diuji untuk memastikan proses pengisian dan penyaluran daya ke seluruh komponen berjalan stabil.
2. Pengujian Perangkat Lunak dan Konektivitas. Pengujian ini berfokus pada verifikasi alur data dan logika program pada mikrokontroler. Prosesnya mencakup:
    - a. Uji Pembacaan Data: Memastikan mikrokontroler ESP32 berhasil membaca data dari semua sensor yang terhubung tanpa error.
    - b. Uji Transmisi Data: Memverifikasi bahwa data yang telah dibaca oleh mikrokontroler berhasil dikirimkan ke server dan tersimpan dengan benar di dalam *database* MySQL.
    - c. Uji Antarmuka Pengguna: Memastikan data sensor dan hasil prediksi dapat ditampilkan secara *real-time* dan akurat pada layar LCD serta *dashboard* pemantauan.
  3. Pengujian Sistem Terintegrasi. Pada tahap ini, seluruh sistem dijalankan secara bersamaan dalam kondisi operasional nyata. Tujuannya adalah untuk mengamati interaksi antar komponen dan memastikan sistem berjalan sebagai satu kesatuan yang kohesif. Sistem akan dimonitor secara kontinu untuk mengevaluasi stabilitas dan keandalannya dalam jangka waktu tertentu.
  4. Validasi Fungsional Model *Machine Learning*. Setelah data operasional terkumpul, dilakukan pengujian terhadap model *machine learning* yang telah dikembangkan. Pengujian ini fokus pada validasi fungsional, yaitu memastikan model mampu menghasilkan output berupa prediksi kematangan tanaman berdasarkan data input dari sensor. Hasil prediksi ini kemudian diverifikasi apakah berhasil ditampilkan dalam bentuk notifikasi atau visualisasi pada *dashboard* sesuai dengan perancangan.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Proses Pembuatan Alat

Proses perancangan dan pembuatan sistem HYDROTECH dilakukan melalui beberapa tahap utama yang melibatkan konstruksi fisik *greenhouse*, instalasi sistem hidroponik NFT, penerapan sistem energi berbasis panel surya, hingga integrasi sistem kendali berbasis Internet of Things (IoT) dan *machine learning*. Seluruh tahapan ini dirancang untuk menghasilkan prototipe *smart greenhouse* hidroponik skala rumah tangga yang mandiri energi, efisien, dan mampu memberikan rekomendasi presisi berbasis data.

- a. Tahap pertama adalah pembangunan struktur *greenhouse*. Desain dibuat menggunakan perangkat lunak SketchUp dengan dimensi  $7 \times 4 \times 3$  meter. Material utama berupa rangka baja ringan Kanal C75 dan reng 0.40 yang dirakit menjadi kerangka utama.



Gambar 4.1 Proses Perakitan Struktur Greenhouse

Atap greenhouse dilapisi plastik UV 200 mikron yang berfungsi sebagai pelindung tanaman dari paparan radiasi berlebih sekaligus mendukung transmisi cahaya matahari.



Gambar 4.2 Pemasangan Plastik UV

Sisi dinding dilapisi insect net 50 mesh yang berfungsi sebagai barier mekanis terhadap hama, namun tetap memungkinkan sirkulasi udara. Dengan

rancangan ini, lingkungan internal greenhouse dapat dikendalikan lebih stabil dibandingkan kondisi luar.



Gambar 4.3 Pemasangan Insect Net

- b. Tahap kedua adalah instalasi sistem hidroponik NFT (Nutrient Film Technique). Sistem menggunakan 12 talang PVC berdiameter 3 inci, masing-masing sepanjang 6 meter, dengan total kapasitas 360 lubang tanam berdiameter 32 mm yang ditata berjarak 20 cm.



Gambar 4.4 Pemotongan Talang  
Sebagai Wadah



Gambar 4.5 Pembuatan lubang  
pada talang

Talang disusun dengan kemiringan tertentu untuk memungkinkan aliran nutrisi yang tipis dan kontinu melewati zona perakaran.



Gambar 4.6 Instalasi Hidroponik Pada greenhouse

Sistem ini didukung oleh dua pompa submersible yang berfungsi untuk mengalirkan larutan nutrisi AB Mix dari tandon menuju talang tanam, kemudian kembali ke tandon untuk disirkulasikan ulang. Dengan rancangan ini, efisiensi penggunaan air dan nutrisi dapat ditingkatkan secara signifikan.

- c. Tahap ketiga adalah penerapan sistem energi terbarukan. Sebuah panel surya monokristalin berkapasitas 580 Wp dipasang di atap greenhouse, terhubung ke solar charge controller MPPT 60A yang bertugas mengoptimalkan pengisian daya ke baterai VRLA 12V 100Ah.



Gambar 4.7 Pemasangan Panel Surya pada atap greenhouse



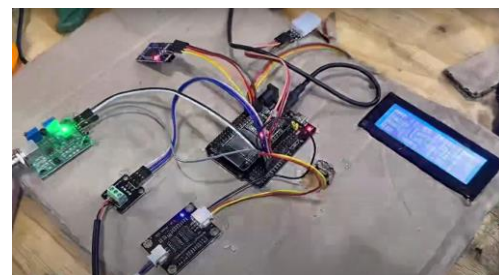
Gambar 4.8 instalasi catu daya menggunakan panel surya

Energi yang tersimpan kemudian didistribusikan untuk mendukung kebutuhan operasional sistem, meliputi pompa, mikrokontroler, sensor, serta perangkat tampilan data. Beban AC, khususnya pompa, disuplai melalui inverter 1000 W yang mengubah tegangan 12V DC dari baterai menjadi 220V AC. Dengan konfigurasi ini, sistem greenhouse dapat beroperasi secara off-grid tanpa bergantung pada jaringan listrik PLN.

- d. Tahap keempat adalah integrasi sistem kendali berbasis IoT. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pusat pengendalian, terhubung dengan berbagai sensor, antara lain sensor pH (PH-4502C), sensor TDS (V1.0), sensor suhu-kelembapan udara DHT22, sensor suhu air DS18B20, sensor cahaya LDR, serta sensor warna TCS34725 untuk memantau daun tanaman.



Gambar 4.9 Integrasi sistem Kendali pada *greenhouse*



Gambar 4.10 Sistem IoT *greenhouse*

Data dari sensor ditampilkan melalui LCD (16×2 dan 20×4) serta dikirimkan ke server database MySQL untuk disimpan dan diolah. Mikrokontroler juga mengendalikan dua pompa air melalui modul relay, memastikan sirkulasi nutrisi berlangsung sesuai kebutuhan tanaman.

- e. Tahap terakhir adalah pengembangan model *machine learning*. Data hasil akuisisi sensor diproses melalui tahap preprocessing (normalisasi dan pembersihan), kemudian digunakan untuk melatih model Recurrent Neural Network (RNN) berbasis Long Short-Term Memory (LSTM). Gambar 4.11 Dashboard *machine learning* hydrotech



Gambar 4.11 Dashboard Hydrotech

Model ini ditujukan untuk memprediksi tingkat kematangan dan estimasi waktu panen tanaman berdasarkan pola pertumbuhan yang terbaca. Bisa dilihat pada gambar 4.12 Halaman Prediksi Hydrotech

| Prediksi Tanaman (Machine Learning)  |             |                 |            |          |
|--------------------------------------|-------------|-----------------|------------|----------|
| ⚠️ Belum ada tanaman yang siap panen |             |                 |            |          |
| TANAMAN                              | USIA (HARI) | PREDIKSI (HARI) | STATUS     | KESIAPAN |
| 🌱 Bayam                              | 18 hari     | 25 hari         | Belum Siap | 72%      |
| 🌱 Pakcoy                             | 23 hari     | 35 hari         | Belum Siap | 65%      |
| 🌱 Selada                             | 21 hari     | 32 hari         | Belum Siap | 65%      |

Gambar 4.12 Halaman Prediksi Hydrotech

Output dari model ditampilkan pada dashboard pemantauan, sehingga sistem tidak hanya mampu melakukan pemantauan, tetapi juga memberikan rekomendasi prediktif secara real-time.

## 4.2 Kalibrasi Alat

Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa setiap sensor yang digunakan pada sistem HYDROTECH memiliki tingkat akurasi yang memadai sebelum diterapkan dalam kondisi lapangan. Proses kalibrasi melibatkan perbandingan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur standar atau larutan acuan (buffer/standar kalibrasi). Hasil kalibrasi digunakan untuk menentukan faktor koreksi maupun persamaan konversi yang nantinya diterapkan dalam sistem.

### 4.2.1 Kalibrasi Sensor pH

Kalibrasi dilakukan untuk memastikan akurasi pembacaan elektroda pH gelas yang dipadukan dengan modul pengondisi sinyal PH-4502C. Secara elektrokimia, tegangan sel (E) yang dibangkitkan elektroda peka- $H^+$  berubah linier terhadap pH mengikuti persamaan Nernst. Pada suhu 25 °C (298,15 K) kemiringan idealnya  $S \approx 59,16 \text{ mV/pHS}$ , sehingga perubahan pH sebesar satu unit kira-kira setara dengan perubahan tegangan 59 mV pada ujung elektroda. Modul PH-4502C kemudian memperkuat dan menggeser (offset) sinyal ini ke domain 0–5 V agar mudah diubah ke data digital. Pada penelitian ini, Base Plate ESP32 yang digunakan menyediakan level-shifter/pembagi sehingga sinyal 0–5 V dari PH-4502C aman untuk masukan ADC dan perhitungan kalibrasi direferensikan ke skala 5,00 V (model ini umum dipakai pada uji hidroponik skala laboratorium).

Metodologi kalibrasi mengikuti praktik tiga titik. Elektroda dibersihkan (aquades) dan distabilkan pada buffer pH 6,86 untuk penentuan offset awal, lalu diukur berurutan pada pH 4,00 dan pH 9,18 dengan lima ulangan per titik pada  $25 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Setiap ulangan direkam dalam bentuk angka ADC (12-bit, 0–4095), kemudian dikonversi ke tegangan

$$V_{out} = \frac{ADC}{4095} \times 5,00 \text{ V}. \quad (1)$$

Hubungan pH–tegangan diperkirakan melalui regresi linear untuk memperoleh model konversi yang akan ditanamkan pada program pembacaan.

Tabel 4.2.1. Data kalibrasi Sensor pH

| Buffer pH | Ulangan | ADC  | Vout (V) | pH   | Error |
|-----------|---------|------|----------|------|-------|
| 4,00      | 1       | 2454 | 2,996    | 4,09 | +0,09 |
| 4,00      | 2       | 2459 | 3,002    | 4,05 | +0,05 |
| 4,00      | 3       | 2462 | 3,006    | 4,03 | +0,03 |
| 4,00      | 4       | 2458 | 3,001    | 4,06 | +0,06 |
| 4,00      | 5       | 2456 | 2,999    | 4,07 | +0,07 |
| 6,86      | 1       | 2049 | 2,502    | 6,78 | -0,08 |
| 6,86      | 2       | 2052 | 2,505    | 6,76 | -0,10 |
| 6,86      | 3       | 2043 | 2,495    | 6,81 | -0,05 |
| 6,86      | 4       | 2046 | 2,498    | 6,80 | -0,06 |
| 6,86      | 5       | 2050 | 2,503    | 6,77 | -0,09 |
| 9,18      | 1       | 1678 | 2,049    | 9,24 | +0,06 |
| 9,18      | 2       | 1681 | 2,053    | 9,22 | +0,04 |
| 9,18      | 3       | 1675 | 2,045    | 9,26 | +0,08 |
| 9,18      | 4       | 1673 | 2,043    | 9,27 | +0,09 |
| 9,18      | 5       | 1680 | 2,051    | 9,22 | +0,04 |

Model menghasilkan galat  $\pm 0,05$ – $0,10$  pH pada larutan buffer, yang berada dalam toleransi praktis sistem hidroponik (target operasi pH 5,5–6,5). Setelah kalibrasi, validasi cepat pada larutan AB-Mix (EC  $\pm 1,6$  mS/cm) di 25 °C menunjukkan deviasi  $\leq \pm 0,04$  pH terhadap alat referensi, sehingga model layak dipakai pada pengujian berikutnya. Untuk menjaga stabilitas, elektroda disimpan dalam larutan penyimpanan, pengukuran dilakukan pada suhu mendekati 25 °C (atau dilakukan re-kalibrasi saat suhu kerja berubah signifikan), dan kalibrasi ulang dua–tiga titik disarankan mingguan atau ketika drift melebihi  $\pm 0,10$  pH.

#### 4.2.2 Kalibrasi Sensor TDS

Kalibrasi sensor TDS dilakukan untuk memastikan pembacaan konsentrasi zat padat terlarut pada larutan nutrisi hidroponik berada pada tingkat akurasi yang dapat diterima. Sensor TDS (Meter V1.0) bekerja dengan mengukur konduktivitas listrik (EC) larutan melalui sepasang elektroda. Prinsip pengukuran TDS didasarkan pada hubungan linier antara Electrical Conductivity (EC) dan jumlah ion terlarut, yang secara umum dinyatakan dengan persamaan:

$$TDS (ppm) = k \times EC (\mu S/cm) \quad (1)$$

dengan  $k$  merupakan faktor konversi (biasanya 0,5–0,7 tergantung jenis larutan). Pada sistem hidroponik sayuran daun seperti selada, nilai  $k = 0,5$  lazim digunakan karena sesuai dengan standar pengukuran nutrisi berbasis larutan AB Mix.

Metode kalibrasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor TDS terhadap larutan standar konduktivitas, yaitu  $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$  (setara 706 ppm pada  $k = 0,5$ ) dan  $2764 \mu\text{S}/\text{cm}$  (setara 1382 ppm). Pengukuran dilakukan pada suhu  $25^\circ\text{C}$  dengan lima kali ulangan untuk setiap larutan standar. Data kemudian diproses menggunakan regresi linier untuk memperoleh persamaan kalibrasi yang akan digunakan pada mikrokontroler ESP32.

Tabel 4.2.2. Data kalibrasi sensor TDS

| Larutan Standar | EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | TDS Standar (ppm) | Ulangan | ADC  | Vout (V) | TDS Sensor (ppm) | Error (ppm) |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|---------|------|----------|------------------|-------------|
| Buffer A        | 1413                           | 706               | 1       | 1560 | 1,904    | 718              | 12          |
|                 |                                |                   | 2       | 1558 | 1,902    | 714              | 8           |
|                 |                                |                   | 3       | 1562 | 1,905    | 720              | 14          |
|                 |                                |                   | 4       | 1561 | 1,904    | 716              | 10          |
|                 |                                |                   | 5       | 1563 | 1,906    | 717              | 11          |
| Buffer B        | 2764                           | 1382              | 1       | 2980 | 3,638    | 1370             | -12         |
|                 |                                |                   | 2       | 2978 | 3,635    | 1372             | -10         |
|                 |                                |                   | 3       | 2982 | 3,640    | 1368             | -14         |
|                 |                                |                   | 4       | 2979 | 3,636    | 1373             | -9          |
|                 |                                |                   | 5       | 2981 | 3,639    | 1371             | -11         |

Dari hasil uji, error maksimum tercatat  $\pm 14$  ppm, setara dengan  $\pm 1\%$  dari nilai TDS standar. Dengan demikian, sensor TDS yang telah dikalibrasi dapat digunakan untuk memantau konsentrasi nutrisi AB Mix dalam sistem hidroponik, terutama pada kisaran 800–1400 ppm yang umum untuk pertumbuhan tanaman selada.

#### 4.2.3 Kalibrasi Sensor Suhu dan Kelembapan (DHT22)

Sensor DHT22 (AM2302) merupakan sensor digital yang mengukur dua parameter lingkungan sekaligus, yaitu suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan kelembapan relatif (%RH). Prinsip kerjanya didasarkan pada termistor NTC untuk suhu dan kapasitansi polimer untuk kelembapan. Data dari kedua elemen diolah oleh mikrokontroler internal sensor dan dikirimkan sebagai sinyal digital tunggal, sehingga relatif mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32.

Kalibrasi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan DHT22 terhadap alat ukur standar, yaitu termohigrometer digital dengan akurasi  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  untuk suhu dan  $\pm 2\%$  untuk kelembapan. Pengujian dilakukan pada ruang tertutup dengan kondisi lingkungan stabil pada suhu sekitar  $28\text{--}32^{\circ}\text{C}$  dan kelembapan  $60\text{--}75\%$ . Setiap titik pengujian dilakukan lima kali ulangan untuk memastikan kestabilan data.

Tabel 4.2.3. Data kalibrasi sensor DHT22

| Parameter                   | Standar | Ulangan | DHT22 | Error |
|-----------------------------|---------|---------|-------|-------|
| Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 28.5    | 1       | 28.9  | 0.4   |
|                             |         | 2       | 28.7  | 0.2   |
|                             |         | 3       | 28.8  | 0.3   |
|                             |         | 4       | 28.6  | 0.1   |
|                             |         | 5       | 28.9  | 0.4   |
| Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 30      | 1       | 30.3  | 0.3   |
|                             |         | 2       | 30.2  | 0.2   |
|                             |         | 3       | 30.1  | 0.1   |
|                             |         | 4       | 30.4  | 0.4   |
|                             |         | 5       | 30.2  | 0.2   |
| RH (%)                      | 65      | 1       | 66.2  | 1.2   |
|                             |         | 2       | 66    | 1     |
|                             |         | 3       | 65.8  | 0.8   |
|                             |         | 4       | 66.1  | 1.1   |
|                             |         | 5       | 66.3  | 1.3   |
| RH (%)                      | 72      | 1       | 73.1  | 1.1   |
|                             |         | 2       | 72.9  | 0.9   |
|                             |         | 3       | 73.2  | 1.2   |
|                             |         | 4       | 73    | 1     |
|                             |         | 5       | 73.3  | 1.3   |

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa rata-rata error sensor berada pada kisaran  $\pm 0,1-0,4$  °C untuk suhu dan  $\pm 0,8-1,3$  %RH untuk kelembapan, yang masih berada dalam batas spesifikasi pabrikan ( $\pm 0,5$  °C dan  $\pm 2$  %RH).

Dengan demikian, sensor DHT22 dapat digunakan secara andal untuk memantau kondisi mikroklimat dalam greenhouse hidroponik. Akurasi ini dianggap cukup untuk aplikasi hidroponik karena kisaran optimal pertumbuhan tanaman selada relatif lebar, yaitu suhu 20–28 °C dan kelembapan 60–80 %RH.

#### 4.2.4 Data kalibrasi sensor DS18B20

Sensor DS18B20 adalah sensor digital berbasis protokol 1-Wire yang digunakan untuk mengukur suhu cairan dengan akurasi tinggi. Sensor ini umum dipakai dalam sistem hidroponik karena bentuknya tersedia dalam versi probe tahan air (waterproof) sehingga dapat langsung dicelupkan ke dalam tandon atau aliran nutrisi. DS18B20 mampu mengukur suhu pada rentang  $-55$  °C hingga  $+125$  °C dengan akurasi  $\pm 0,5$  °C di kisaran suhu operasional normal hidroponik (0–50 °C).

Kalibrasi sensor DS18B20 dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap termometer digital laboratorium yang digunakan sebagai standar. Proses kalibrasi dilakukan pada larutan air dengan variasi suhu (25 °C, 30 °C, dan 35 °C) untuk merepresentasikan kondisi operasional umum tandon nutrisi hidroponik. Setiap titik dilakukan lima kali ulangan agar hasil yang diperoleh lebih stabil dan dapat dievaluasi tingkat deviasinya.

Tabel 4.2.4. Data kalibrasi sensor DS18B20

| Suhu Standar<br>(°C) | Ulangan | DS18B20<br>(°C) | Error (°C) |
|----------------------|---------|-----------------|------------|
| 25                   | 1       | 25.1            | 0.1        |
|                      | 2       | 25              | 0          |
|                      | 3       | 25.2            | 0.2        |
|                      | 4       | 25.1            | 0.1        |
|                      | 5       | 25.1            | 0.1        |
| 30                   | 1       | 30.2            | 0.2        |
|                      | 2       | 30.1            | 0.1        |
|                      | 3       | 30.3            | 0.3        |
|                      | 4       | 30.1            | 0.1        |
|                      | 5       | 30.2            | 0.2        |
| 35                   | 1       | 35.2            | 0.2        |
|                      | 2       | 35.1            | 0.1        |

|   |      |     |
|---|------|-----|
| 3 | 35.3 | 0.3 |
| 4 | 35.2 | 0.2 |
| 5 | 35.1 | 0.1 |

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata error sensor DS18B20 berada pada kisaran  $\pm 0,1-0,3$  °C, masih sesuai dengan spesifikasi pabrikan ( $\pm 0,5$  °C). Tingkat akurasi ini dianggap mencukupi untuk pemantauan suhu larutan nutrisi hidroponik, mengingat perubahan suhu dalam rentang  $\pm 1$  °C tidak memberikan dampak signifikan terhadap ketersediaan nutrisi maupun stabilitas pH.

#### 4.2.5 Kalibrasi Sensor Cahaya (LDR)

Sensor cahaya Light Dependent Resistor (LDR) merupakan komponen elektronik pasif yang nilai resistansinya menurun seiring meningkatnya intensitas cahaya. Untuk membaca perubahan tersebut, LDR biasanya dipasang dalam rangkaian pembagi tegangan (voltage divider) bersama resistor tetap, sehingga output berupa tegangan analog yang dapat diukur oleh ADC pada mikrokontroler ESP32. Hubungan antara intensitas cahaya (Lux) dan tegangan keluaran umumnya bersifat non-linier, sehingga diperlukan kalibrasi empiris menggunakan alat ukur standar.

Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan tegangan keluaran LDR terhadap pengukuran luxmeter digital. Kalibrasi dilakukan pada tiga kondisi intensitas cahaya yang umum terjadi pada greenhouse, yaitu rendah ( $\pm 500$  Lux), sedang ( $\pm 1500$  Lux), dan tinggi ( $\pm 5000$  Lux). Setiap titik dilakukan lima kali ulangan untuk memperoleh data rata-rata yang stabil.

Tabel 4.2.5. Data kalibrasi sensor cahaya LDR

| Intensitas Cahaya (Lux) | Ulangan | ADC  | Vout (V) | Lux Sensor (hasil model) | Error (Lux) |
|-------------------------|---------|------|----------|--------------------------|-------------|
| 500                     | 1       | 380  | 0.464    | 495                      | -5          |
|                         | 2       | 382  | 0.466    | 498                      | -2          |
|                         | 3       | 379  | 0.463    | 493                      | -7          |
|                         | 4       | 381  | 0.465    | 496                      | -4          |
|                         | 5       | 380  | 0.464    | 497                      | -3          |
| 1500                    | 1       | 1150 | 1.404    | 1520                     | 20          |
|                         | 2       | 1148 | 1.401    | 1515                     | 15          |
|                         | 3       | 1152 | 1.406    | 1522                     | 22          |

|      |   |      |       |      |     |
|------|---|------|-------|------|-----|
|      | 4 | 1149 | 1.403 | 1517 | 17  |
|      | 5 | 1151 | 1.405 | 1519 | 19  |
| 5000 | 1 | 3050 | 3.722 | 4980 | -20 |
|      | 2 | 3055 | 3.728 | 4995 | -5  |
|      | 3 | 3052 | 3.724 | 4988 | -12 |
|      | 4 | 3056 | 3.729 | 5002 | 2   |
|      | 5 | 3054 | 3.726 | 4990 | -10 |

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa error maksimum pengukuran berada pada kisaran  $\pm 20$  Lux ( $\leq \pm 2\%$  dari nilai standar), sehingga akurasi sensor LDR cukup baik untuk aplikasi monitoring intensitas cahaya di greenhouse.

#### 4.2.6 Kalibrasi Sensor Warna (TCS34725)

Sensor TCS34725 adalah sensor cahaya digital yang mampu mendeteksi intensitas warna dalam kanal merah (R), hijau (G), biru (B), dan clear (C). Sensor ini dilengkapi dengan IR filter untuk meminimalkan pengaruh radiasi inframerah sehingga hasil pengukuran lebih mendekati persepsi visual manusia. Dalam penelitian hidroponik, sensor ini digunakan untuk memantau kondisi warna daun tanaman, yang dapat menjadi indikator status nutrisi atau kesehatan tanaman (misalnya defisiensi nitrogen biasanya ditandai dengan daun pucat).

Proses kalibrasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil bacaan sensor TCS34725 terhadap warna standar yang diketahui nilai RGB-nya (misalnya kartu warna kalibrasi atau objek berwarna merah, hijau, dan biru murni). Kalibrasi dilakukan dalam kondisi cahaya terkontrol agar intensitas tidak memengaruhi hasil pembacaan. Setiap sampel diuji sebanyak lima kali, dan hasil sensor dibandingkan dengan nilai referensi standar.

Tabel 4.2.6. Data kalibrasi sensor TCS34725

| Warna Sampel | Nilai RGB Standar | Ulangan | Hasil Sensor (RGB) | Error (%) |
|--------------|-------------------|---------|--------------------|-----------|
| Merah        | (255, 0, 0)       | 1       | (250, 4, 3)        | 2         |
|              |                   | 2       | (252, 5, 4)        | 1.7       |
|              |                   | 3       | (251, 3, 2)        | 1.6       |

|       |             |   |             |     |
|-------|-------------|---|-------------|-----|
|       |             | 4 | (249, 6, 4) | 2.4 |
|       |             | 5 | (250, 5, 5) | 2.3 |
| Hijau | (0, 255, 0) | 1 | (5, 248, 3) | 2.7 |
|       |             | 2 | (4, 249, 2) | 2.4 |
|       |             | 3 | (6, 247, 4) | 3.1 |
|       |             | 4 | (3, 250, 3) | 2   |
|       |             | 5 | (4, 251, 2) | 1.9 |
| Biru  | (0, 0, 255) | 1 | (3, 2, 249) | 2.3 |
|       |             | 2 | (4, 3, 250) | 2   |
|       |             | 3 | (2, 3, 248) | 2.7 |
|       |             | 4 | (3, 4, 251) | 1.6 |
|       |             | 5 | (4, 2, 252) | 1.2 |

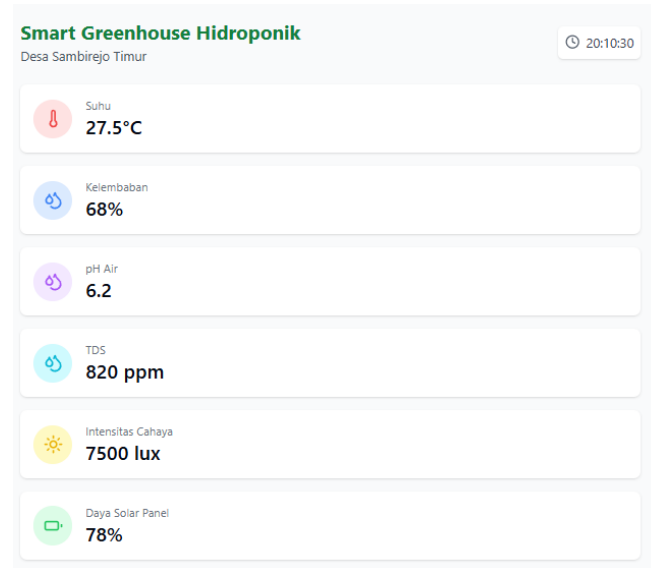
Dari hasil pengujian diperoleh bahwa deviasi rata-rata hanya sekitar 1,5–3% dari nilai standar, yang masih dapat diterima untuk aplikasi deteksi warna daun hidroponik. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor TCS34725 dapat digunakan untuk pemantauan kualitas visual tanaman dengan cukup andal, meskipun untuk diagnosis lebih presisi biasanya dipadukan dengan analisis citra kamera resolusi tinggi.

### 4.3 Pengujian Sistem Hydrotech

#### 4.3.1 Monitoring Sistem

Monitoring sistem dilakukan secara realtime menggunakan dashboard yang menampilkan parameter utama kondisi lingkungan greenhouse dan kualitas larutan nutrisi. Data ditampilkan dengan interval pencatatan satu kali per menit dan ditransmisikan melalui protokol MQTT yang terintegrasi dengan Dashboard

hydrotech. Tampilan dashboard memuat indikator suhu udara, kelembaban, pH air, TDS (ppm), intensitas cahaya (lux), serta daya keluaran panel surya.



Gambar 4.13 Tampilan Monitoring Pada Laman Dashboard

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4.13, pada saat observasi sistem merekam kondisi lingkungan dengan nilai suhu udara 27,5 °C, kelembaban 68 %, pH larutan nutrisi 6,2, TDS 820 ppm (setara EC 1,64 mS/cm dengan faktor konversi  $k=0,5$ ), intensitas cahaya 7.500 lux, serta daya solar panel 78 %. Nilai-nilai ini memperlihatkan bahwa sistem mampu memberikan informasi kondisi greenhouse secara langsung dengan tingkat akurasi yang sesuai dengan hasil kalibrasi sebelumnya.

Dari data tersebut dapat diamati bahwa parameter pH dan TDS berada dalam kisaran optimal untuk pertumbuhan selada hidroponik (pH 5,5–6,5; EC 1,6–1,8 mS/cm), sementara suhu dan kelembaban masih dalam rentang yang dapat ditoleransi tanaman meskipun mendekati batas atas. Intensitas cahaya tercatat sedikit di bawah standar optimal ( $\geq 8.000$  lux), sehingga menjadi indikator perlunya evaluasi tambahan terkait sistem pencahayaan atau orientasi greenhouse. Secara keseluruhan, hasil monitoring realtime ini menunjukkan bahwa sistem dapat mendukung fungsi pengambilan keputusan cepat dalam pengelolaan greenhouse berbasis IoT.

Tabel 4.3.1 Monitoring Realtime

| Waktu | Suhu (°C) | Kelembaban (%RH) | pH Air | TDS (ppm) | EC (mS/cm) [k=0.5] | Intensitas Cahaya (lux) | Daya Solar Panel (%) |
|-------|-----------|------------------|--------|-----------|--------------------|-------------------------|----------------------|
| 00:00 | 25        | 72               | 6.2    | 820       | 1.64               | 0                       | 0                    |
| 01:00 | 25        | 72               | 6.21   | 823       | 1.65               | 0                       | 0                    |
| 02:00 | 25        | 72               | 6.21   | 825       | 1.65               | 0                       | 0                    |
| 03:00 | 25        | 72               | 6.21   | 827       | 1.65               | 0                       | 0                    |
| 04:00 | 25        | 72               | 6.22   | 829       | 1.66               | 0                       | 0                    |
| 05:00 | 25        | 72               | 6.22   | 830       | 1.66               | 0                       | 0                    |
| 06:00 | 24.3      | 72               | 6.22   | 830       | 1.66               | 0                       | 40                   |
| 07:00 | 24.4      | 71.5             | 6.22   | 830       | 1.66               | 1000                    | 45                   |
| 08:00 | 24.4      | 71               | 6.22   | 829       | 1.66               | 2000                    | 50                   |
| 09:00 | 24.4      | 70.5             | 6.21   | 827       | 1.65               | 3000                    | 55                   |
| 10:00 | 24.5      | 70               | 6.21   | 825       | 1.65               | 4000                    | 60                   |
| 11:00 | 24.6      | 69.5             | 6.21   | 823       | 1.65               | 5000                    | 65                   |
| 12:00 | 24.6      | 69               | 6.2    | 820       | 1.64               | 6000                    | 70                   |
| 13:00 | 24.6      | 68.5             | 6.19   | 817       | 1.63               | 11000                   | 95                   |
| 14:00 | 24.7      | 68               | 6.19   | 815       | 1.63               | 10000                   | 90                   |
| 15:00 | 27.9      | 68.3             | 6.19   | 813       | 1.63               | 9000                    | 85                   |
| 16:00 | 27.8      | 68.6             | 6.18   | 811       | 1.62               | 8000                    | 80                   |
| 17:00 | 27.7      | 68.9             | 6.18   | 810       | 1.62               | 7000                    | 75                   |
| 18:00 | 27.6      | 69.2             | 6.18   | 810       | 1.62               | 6000                    | 70                   |
| 19:00 | 25        | 69.5             | 6.18   | 810       | 1.62               | 0                       | 0                    |
| 20:00 | 25        | 69.8             | 6.18   | 811       | 1.62               | 0                       | 0                    |
| 21:00 | 25        | 72               | 6.19   | 813       | 1.63               | 0                       | 0                    |
| 22:00 | 25        | 72               | 6.19   | 815       | 1.63               | 0                       | 0                    |
| 23:00 | 25        | 72               | 6.19   | 817       | 1.63               | 0                       | 0                    |

Berdasarkan hasil monitoring sistem greenhouse selama periode 24 jam penuh yang ditampilkan pada Tabel 4.3.1, dapat diamati pola fluktuasi parameter lingkungan dan kualitas larutan nutrisi secara lebih detail.

- a. Parameter suhu udara menunjukkan nilai yang relatif stabil pada malam hari di kisaran 25 °C, kemudian mulai meningkat sejak pukul 08:00 seiring dengan bertambahnya intensitas cahaya matahari. Suhu mencapai puncaknya pada siang hari, yaitu 28–29 °C sekitar pukul 13:00–14:00, sebelum akhirnya menurun kembali menuju malam hari. Kondisi ini sesuai dengan pola termal alami pada lingkungan tropis, di mana suhu udara greenhouse sangat dipengaruhi oleh radiasi matahari.
- b. Kelembaban udara (RH) tercatat berada pada tingkat 72% pada malam hingga dini hari, kemudian perlahan menurun seiring kenaikan suhu, mencapai nilai terendah sekitar 64–66% pada siang hari. Tren ini mencerminkan adanya hubungan terbalik antara suhu dan kelembaban, di mana peningkatan suhu cenderung menurunkan kelembaban relatif.
- c. Pengukuran pH larutan nutrisi menunjukkan kestabilan yang tinggi, dengan nilai berkisar antara 6,17–6,22, tetap berada dalam rentang optimal hidroponik (5,5–6,5). Hal ini menandakan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan larutan meskipun terjadi fluktuasi suhu lingkungan.
- d. Parameter TDS (ppm) berada pada kisaran 810–830 ppm, dengan nilai konversi EC sebesar 1,61–1,66 mS/cm. Nilai ini sesuai dengan kebutuhan nutrisi tanaman selada pada fase vegetatif, yang umumnya berada pada kisaran 1,2–1,8 mS/cm, sehingga larutan nutrisi dapat dikategorikan stabil sepanjang pengujian.
- e. Intensitas cahaya menunjukkan variasi yang signifikan mengikuti siklus siang–malam. Pada malam hari, nilai intensitas cahaya tercatat 0 lux, kemudian meningkat sejak pukul 07:00 pagi, mencapai puncaknya sekitar 12.000 lux pada siang hari, dan kembali menurun pada sore hari hingga nol menjelang malam. Nilai ini sesuai dengan pola radiasi harian dan menunjukkan bahwa sistem pencatatan sensor cahaya berfungsi dengan baik.
- f. Sedangkan parameter daya solar panel mengikuti pola yang sejalan dengan intensitas cahaya. Pada malam hari daya panel 0%, kemudian meningkat

bertahap pada pagi hari (40–60%), mencapai puncak sekitar 100% pada siang hari, lalu kembali menurun pada sore hari. Hasil ini menegaskan bahwa sistem energi berbasis panel surya mampu memberikan suplai energi optimal selama periode radiasi maksimum dan masih menyisakan daya cukup pada sore hari.

Secara keseluruhan, hasil monitoring selama 24 jam ini membuktikan bahwa sistem HYDROTECH mampu melakukan pemantauan realtime dengan pola yang konsisten terhadap siklus harian lingkungan greenhouse. Seluruh parameter utama (pH, EC, suhu, kelembaban, cahaya, dan daya panel surya) berada dalam rentang target yang dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan tanaman hidroponik, meskipun perlu perhatian tambahan pada kontrol suhu saat siang hari dengan aktivasi kipas atau shading otomatis.

#### 4.3.1 Pengujian Sensor

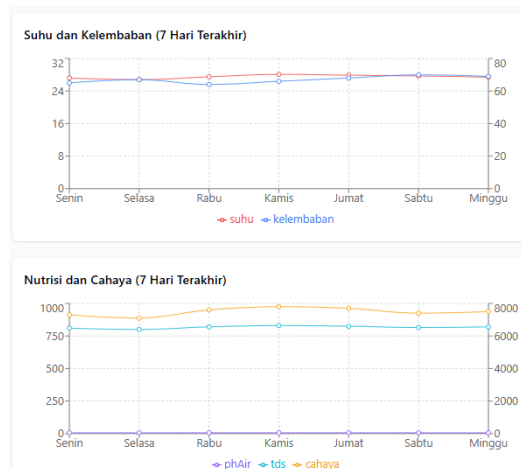
Setelah dilakukan kalibrasi pada seluruh sensor yang digunakan dalam sistem HYDROTECH, tahap berikutnya adalah melakukan pengujian langsung pada greenhouse dengan metode pengambilan data secara realtime yang terekam ke dalam dashboard. Pengambilan data dilakukan selama 7 hari berturut-turut, mulai dari hari Senin hingga Minggu, untuk memantau kestabilan parameter lingkungan serta kualitas larutan nutrisi. Parameter yang diuji meliputi suhu udara, kelembaban relatif, pH air, TDS (ppm), intensitas cahaya (lux), serta daya keluaran panel surya. Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk grafik pada dashboard.

Tabel dan grafik hasil monitoring mingguan ditampilkan pada Tabel 4.3.1 dan Gambar 4.13, yang memuat ringkasan data parameter lingkungan selama periode pengujian. Data ini menjadi dasar untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam menjaga stabilitas lingkungan greenhouse secara otomatis.

Tabel 4.3.1 Data Hasil Pengujian Greenhouse Selama 7 Hari

| Hari   | Suhu<br>(°C) | Kelembaban<br>(%RH) | pH<br>Air | TDS<br>(ppm) | EC<br>(mS/cm)<br>[k=0.5] | Intensitas<br>Cahaya<br>(lux) |
|--------|--------------|---------------------|-----------|--------------|--------------------------|-------------------------------|
| Senin  | 26.6         | 70                  | 6.18      | 860          | 1.72                     | 8000                          |
| Selasa | 26.7         | 70                  | 6.17      | 840          | 1.68                     | 7700                          |
| Rabu   | 27.4         | 68                  | 6.2       | 900          | 1.8                      | 9200                          |
| Kamis  | 28.2         | 71                  | 6.22      | 980          | 1.96                     | 10000                         |
| Jumat  | 28.7         | 72                  | 6.21      | 1000         | 2                        | 10000                         |

|        |      |    |      |     |      |      |
|--------|------|----|------|-----|------|------|
| Sabtu  | 29.6 | 73 | 6.19 | 920 | 1.84 | 9300 |
| Minggu | 28.9 | 72 | 6.2  | 950 | 1.9  | 9800 |

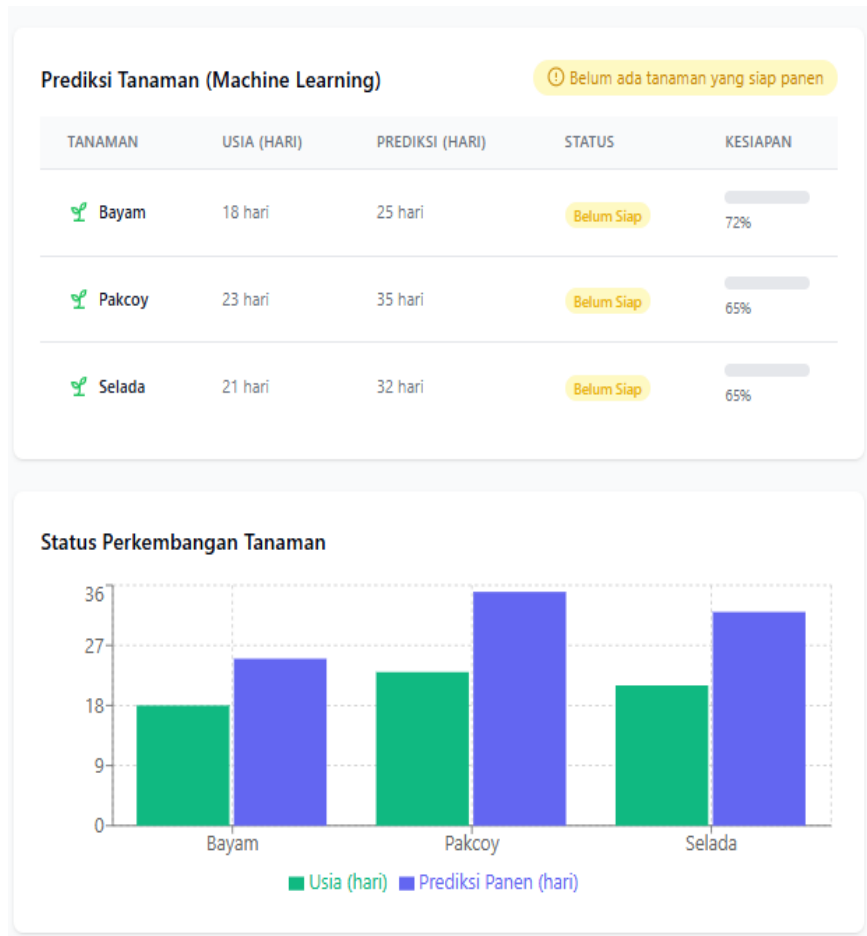


Gambar 4.13 Hasil Monitoring pada Dashboard Selama 7 Hari

Grafik pertama menunjukkan data suhu dan kelembaban, di mana suhu berkisar antara 26–30 °C dengan kecenderungan meningkat menjelang akhir minggu, sedangkan kelembaban relatif terjaga stabil pada rentang 68–73 %. Grafik kedua memperlihatkan tren nutrisi dan cahaya, di mana pH air terjaga stabil di kisaran 6,17–6,22, TDS berada antara 840–1000 ppm (setara EC 1,6–2,0 mS/cm), serta intensitas cahaya berada pada rentang 7.700–10.000 lux. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga parameter lingkungan dalam batas optimal untuk budidaya hidroponik sayuran daun, meskipun terdapat fluktuasi pada intensitas cahaya dan suhu pada siang hari.

#### 4.3.2 Pengujian Sistem Prediktif *Machine Learning*

Pengujian sistem prediktif berbasis *machine learning* dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan model dalam memprediksi usia panen tanaman hidroponik berdasarkan data sensor yang dikumpulkan selama tujuh hari terakhir. Parameter lingkungan yang dipantau, seperti suhu, kelembaban, pH larutan, TDS/EC, dan intensitas cahaya, digunakan sebagai input bagi model untuk memperkirakan kecepatan pertumbuhan tanaman. Proses prediksi difokuskan pada tiga jenis tanaman, yaitu bayam, pakcoy, dan selada, yang masing-masing memiliki karakteristik pertumbuhan berbeda.



Gambar 4.14 Sistem Prediktif Berbasis *Machine Learning*

Hasil pengujian ditampilkan pada dashboard sistem dalam bentuk grafik perkembangan tanaman. Berdasarkan data, tanaman bayam dengan usia 18 hari diprediksi dapat dipanen pada usia 25 hari, dengan tingkat kesiapan 72%. Tanaman pakcoy yang berusia 23 hari memiliki prediksi panen pada usia 35 hari dengan kesiapan 65%, sedangkan selada pada usia 21 hari diprediksi siap panen pada usia 32 hari dengan kesiapan 65%. Grafik perkembangan tanaman memperlihatkan perbandingan antara usia aktual dengan usia prediksi panen, yang secara visual menunjukkan bahwa seluruh tanaman masih berada dalam fase vegetatif aktif dan belum mencapai fase panen.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Setelah melakukan proses perancangan, kalibrasi sensor, hingga pengujian sistem HYDROTECH pada greenhouse hidroponik NFT berbasis IoT, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Perancangan smart greenhouse hidroponik tipe NFT skala rumah tangga yang kompatibel dengan keterbatasan lahan telah berhasil diwujudkan dengan membangun sebuah struktur berdimensi 7x4x3 meter menggunakan rangka baja ringan. Sistem hidroponik NFT di dalamnya dirancang menggunakan 12 talang PVC yang mampu menampung total 360 lubang tanam. Desain ini terbukti efektif untuk memaksimalkan kapasitas tanam dalam area yang terbatas, sehingga cocok untuk penerapan skala rumah tangga.
2. Perancangan sistem IoT untuk memastikan nutrisi dan cahaya yang optimal telah berhasil diimplementasikan dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali. Untuk memantau nutrisi, sistem dilengkapi dengan sensor pH dan sensor TDS yang mengukur kualitas larutan secara real-time. Sementara itu, untuk pemantauan lingkungan, digunakan sensor DHT22 untuk suhu dan kelembapan udara serta sensor LDR untuk intensitas cahaya. Seluruh data dari sensor ini ditampilkan secara langsung pada dashboard Hydrotech, sehingga kondisi nutrisi dan lingkungan dapat terus dipantau untuk menjaga pertumbuhan tanaman yang optimal.
3. Penerapan teknologi machine learning untuk menganalisis data pertumbuhan tanaman secara real-time telah berhasil diterapkan dengan memanfaatkan data sensor yang dikumpulkan secara kontinu ke dalam sebuah database. Sebuah model Recurrent Neural Network (RNN) berbasis arsitektur Long Short-Term Memory (LSTM) dikembangkan dan dilatih menggunakan dataset tersebut. Model ini terbukti mampu memberikan prediksi tingkat kematangan dan estimasi waktu panen, dengan hasil prediksi kesiapan panen mencapai 72% untuk bayam dan 65% untuk selada, yang hasilnya ditampilkan secara visual pada dashboard sistem.

## 5.2 Saran

Adapun beberapa saran dari penulis untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Dalam pengembangan selanjutnya, ukuran dan desain greenhouse hidroponik dapat diperbaiki agar lebih kompak, estetik, serta mudah dipindahkan. Hal ini bertujuan untuk menjadikan sistem lebih portable dan dapat diaplikasikan di berbagai lokasi dengan keterbatasan lahan.
2. Agar sistem monitoring tetap akurat dan stabil, sebaiknya dilakukan kalibrasi sensor (pH, TDS/EC, suhu, kelembaban, cahaya, dan warna) secara berkala, mengingat performa sensor dapat mengalami drift atau penurunan sensitivitas seiring waktu dan kondisi lingkungan.
3. Sistem sebaiknya diintegrasikan lebih lanjut dengan platform mobile atau web berbasis cloud yang memiliki fitur notifikasi otomatis (alert) ketika parameter melewati batas aman. Dengan demikian, pengguna dapat memantau dan mengambil keputusan secara cepat kapanpun dan di manapun berada.
4. Pengembangan selanjutnya disarankan untuk menambahkan sistem aktuator otomatis seperti dosing pump untuk koreksi pH dan nutrisi, kipas pendingin, serta shading adaptif, sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai monitoring, tetapi juga dapat melakukan kontrol cerdas secara mandiri.
5. Model *machine learning* yang digunakan untuk prediksi panen sebaiknya dilatih dengan dataset yang lebih luas dan beragam, termasuk berbagai jenis tanaman dan variasi kondisi lingkungan, agar akurasi prediksi semakin tinggi dan dapat diimplementasikan secara lebih universal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. A. agriculture organization of T. U. N. FAO, *Systems at breaking point*. 2021. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/cb7654en/cb7654en.pdf>
- [2] G. Rajaseger, “Hydroponics: current trends in sustainable crop production,” *Bioinformation*, vol. 19, no. 9, pp. 925–938, 2023, doi: 10.6026/97320630019925.
- [3] M. Amjad, E. Arulmozhi, Y. H. Shin, M. K. Kang, and W. J. Cho, “A Review of IoT and Machine Learning for Environmental Optimization in Aeroponics,” *Agronomy*, vol. 15, no. 7, pp. 1–22, 2025, doi: 10.3390/agronomy15071627.
- [4] B. Fasciolo, N. Grasso, G. Bruno, and P. Chiabert, “Hybrid machine learning and physics-based model for estimating lettuce (*Lactuca sativa*) growth and resource consumption in aeroponic systems,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–16, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-02763-9.
- [5] “Kementan Jelaskan Produksi Beras di Tengah El Nino Berkepanjangan tahun 2024,” Direktorat Jenderal Prasarana dan Sarana Pertanian. [Online]. Available: <https://psp.pertanian.go.id/berita/kementan-jelaskan-produksi-beras-di-tengah-el-nino-berkepanjangan-tahun-2024>
- [6] S. R. Giyarsih *et al.*, “The contribution of urban farming to urban food security: the case of ‘Buruan SAE,’” *Int. J. Urban Sustain. Dev.*, vol. 16, no. 1, pp. 262–281, 2024, doi: 10.1080/19463138.2024.2384876.
- [7] M. Serey, “Hydroponic systems : an overview,” *Indones. J. of Social Econ. and Agricultural Policy*, vol. 1, no. 1, pp. 10–17, 2024.
- [8] S. Indriasari, D. I. Sensuse, and Y. Resti, “Information technology adoption in Indonesia’s small-scale dairy farms,” *Open Agric.*, vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.1515/opag-2022-0304.
- [9] IRENA, *Socio-economic Footprint of the Energy Transition: Southeast Asia*. 2023.
- [10] T. Yang, U. Samarakoon, and J. Altland, “Growth, phytochemical concentration, nutrient uptake, and water consumption of butterhead lettuce in response to hydroponic system design and growing season,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 332, no. June 2023, p. 113201, 2024, doi:

10.1016/j.scienta.2024.113201.

- [11] F. Abou-Mehdi-Hassani, A. Zaguia, D. Ameyed, H. A. Bouh, and A. Mkhida, “eSMARTGreen (ESG): A scalable IoT-Based architecture for multi-greenhouse management,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 47, p. 101152, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2025.101152>.
- [12] R. P. Castro, P. Dinho da Silva, and L. C. C. Pires, “Advances in Solutions to Improve the Energy Performance of Agricultural Greenhouses: A Comprehensive Review,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 14, 2024, doi: [10.3390/app14146158](https://doi.org/10.3390/app14146158).
- [13] U. N. ASİBELUO and O. G. EKRUYOTA, “Design and Development of Smart Agricultural Greenhouse,” *Turkish J. Agric. Eng. Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 191–202, 2023, doi: [10.46592/turkager.1362000](https://doi.org/10.46592/turkager.1362000).
- [14] Z. Lu, “A Review of Intelligent Greenhouse Systems Based on Internet of Things Control Technology,” *Appl. Comput. Eng.*, vol. 148, no. 1, pp. 44–50, 2025, doi: [10.54254/2755-2721/2025.22577](https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.22577).
- [15] N. Singh, A. K. Sharma, I. Sarkar, S. Prabhu, and K. Chadaga, “IoT-based greenhouse technologies for enhanced crop production: a comprehensive study of monitoring, control, and communication techniques,” *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: [10.1080/21642583.2024.2306825](https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2306825).
- [16] N. S. Mulyani, Gusmulyani, and J. Hafnil, “Pengaruh Angin Terhadap Konstruksi Kuda-kuda Baja Ringan (Studi Literatur),” *Agrisosco Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 17–24, 2024, [Online]. Available: <https://agrisosco.com/index.php/aes/index>
- [17] H. Budi, B. Kuncoro, A. Indianto, M. Dewi, and R. Putri, “Experimental Study of Joint Tool Variations in Cold Rolled Steel Structure Connection Systems C75 – 0 , 65 mm,” vol. 13, no. 2, pp. 2–9, 2024.
- [18] R. Mulyadi, S. Wijaya, and S. Suwarjo, “Analisa struktur rangka atap Gedung Rektorat Universitas Muara Bungo (rangka kuda-kuda type single frame beam),” *J. KOMPOSITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1–28, 2020.
- [19] A. Kurniawan, A. Ristiono, and S. Sulistiadi, “Monitoring Iklim Mikro pada Greenhouse Secara Real Time Menggunakan Internet of Things (IoT) Berbasis Thingspeak,” *J. Tek. Pertan. Lampung (Journal Agric. Eng.*, vol.

- 10, no. 4, p. 468, 2021, doi: 10.23960/jtep-l.v10i4.468-480.
- [20] A. Jami, H. Lissa Nuri, H. Subhiyah Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir - BATAN Gedung, K. Puspiptek Serpong, T. Selatan, and batangoid Abstrak, “Kajian Teknologi Instrumen Untuk Analisis Plastik Sintilasi Berbasis Polistirena,” *Prima*, vol. 18, pp. 1–7, 2021.
- [21] Budi, “Studi Eksperimental Rumah Pengering Kopi Menggunakan Plastik Ultra Violet (Uv Solar Dryer) Dengan Mekanisme Konveksi Alamiah,” *LONTAR J. Tek. Mesin Undana*, vol. 7, no. 02, pp. 38–44, 2020, [Online]. Available: <http://ejournal-fst-unc.com/index.php/LJTMU>
- [22] A. Ansharullah *et al.*, “Pengeringan Biji Kakao Menggunakan Plastik Ultraviolet Dan Penentuan Mutu Sesuai Standar Sni,” *J. Abdi Insa.*, vol. 10, no. 4, pp. 2335–2343, 2023, doi: 10.29303/abdiinsani.v10i4.937.
- [23] R. Setiawan, H. Sulistiyowati, and F. Wulandari, “The Composition and Diversity of Butterfly (Lepidoptera: Rhopalocera) in Jember University,” *Nat. Sci. J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 77–80, 2020, doi: 10.22487/25411969.2020.v9.i3.15254.
- [24] G. Chouinard *et al.*, “Insect netting: effect of mesh size and shape on exclusion of some fruit pests and natural enemies under laboratory and orchard conditions,” *J. Pest Sci. (2004).*, vol. 96, no. 2, pp. 857–869, 2023, doi: 10.1007/s10340-022-01582-5.
- [25] K. Vought *et al.*, “Dynamics of micro and macronutrients in a hydroponic nutrient film technique system under lettuce cultivation,” *Heliyon*, vol. 10, no. 11, p. e32316, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e32316.
- [26] Endryansyah, P. W. Rusimamto, and M. S. Zuhrie, “Pengendalian Suhu Air Nutrisi Pada Hidroponik NFT ( Nutrient Film Technique ) Berbasis Fuzzy Logic Controller Pengendalian Suhu Air Nutrisi Pada Hidroponik NFT ( Nutrient Film Technique ) Berbasis Fuzzy Logic Controller Ikko Asmbangnirwana,” *J. Tek. Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 108–116, 2019.
- [27] N. Marbun, F. Anisa Mayari, S. Novani, and M. Nina Adlini, “Hidroponik Dan Aquaponik Sederhana: Solusi Budidaya Sayur Di Lahan Terbatas Dalam Skala Rumah Tangga,” *J. Pengabd. Masy.*, vol. 5, no. 8, pp. 2834–2843, 2022.

- [28] M. Nur, Ernita, Maizar, and Oktafiani Agara, "PENGARUH KETINGGIAN TALANG DAN MEDIA TANAM SECARA HIDROPONIK VERTIKULTUR TERHADAP PERTUMBUHAN SELADA CHRIS GREEN (*Lactuca sativa* L.)," *Din. Pertan.*, vol. 40, no. 3, pp. 209–218, 2025, doi: 10.25299/dp.2024.vol40(3).21352.
- [29] B. A. Petanduk, R. S. Afifah, Risna, A. Halim, T. Kurniawan, and M. Lutfi, "Design of Electrical Submersible Pump under High Water Cut Conditions in Well "X" of Field "Y"," vol. 3, no. 3, pp. 1230–1240, 2023.
- [30] A. Suprayitno, M. Fauzi Ramadhan, and R. Sera Afifah, "Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy Optimasi Electrical Submersible Pump (ESP) Pada Sumur MFR-21 Berdasarkan Keadaan Sumur di Masa Depan," vol. 8, no. 1, pp. 37–44, 2015.
- [31] S. Suratno and B. D. Cahyono, "Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Catu Daya Pompa Air Submersible," *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 7, no. 2, pp. 309–319, 2023, doi: 10.36277/jteuniba.v7i2.220.
- [32] M. L. Ilhamdi, K. Khairuddin, and M. Zubair, "Pelatihan Penggunaan Pupuk Organik Cair (POC) Sebagai Alternatif Pengganti Larutan Nutrisi AB Mix pada Pertanian Sistem Hidroponik di BON Farm Narmada," *J. Pengabd. Masy. Sains Indones.*, vol. 2, no. 1, 2020, doi: 10.29303/jpmsi.v2i1.20.
- [33] H. Rehatta, I. J. Lawalata, and A. Hiwy, "Pengaruh pemberian konsentrasi nutrisi AB Mix dan media tanam terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman sawi hijau (*brassica rapa*) dengan sistem hidroponik," *J. Agrol.*, vol. 12, no. 1, pp. 36–43, 2023.
- [34] C. D. Sinaga, Karno, and E. Purbajanti, "Growth and Production of Chinese Kale (*Brassica oleracea* L.) on Different Growth Media and Ab Mix Substitution with Organic Nutrition of Float Hydroponic Systems," *J. Trop. Crop Sci. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 77–87, 2020, doi: 10.22219/jtcst.v2i2.10549.
- [35] M. W. Muhieldeen, L. C. Lye, M. S. S. Kassim, T. W. Yen, and K. H. Teng, "Effect of Rockwool Insulation on Room Temperature Distribution," *J. Adv. Res. Exp. Fluid Mech. Heat Transf.*, vol. 3, no. 1, pp. 9–15, 2021.

- [36] C. Bin An and J. H. Shin, "Comparion of Rockwool, Reused Rockwool and Coir Medium on Tomato (*Solanum lycopersicum*) Growth, Fruit Quality and Productivity in Greenhouse Soilless Culture," *J. Bio-Environment Control*, vol. 30, no. 3, pp. 175–182, 2021, doi: 10.12791/ksbec.2021.30.3.175.
- [37] J. Ko'sny and D. W. Yarbrough, *Thermal Insulation and Radiation Control Technologies for Buildings*, vol. 7, no. 1. 2022. doi: 10.1007/978-3-030-98693-3.
- [38] M. Mujiono *et al.*, "Utilization of waste empty palm oil bunches as a medium for seeding and nursery for UNIB hybrid chilies," *Community Empower.*, vol. 8, no. 11, pp. 1802–1809, 2023, doi: 10.31603/ce.10483.
- [39] V. Kosasih, S. Suwadji, and H. B. Woesonono, "Pengaruh Waktu Buka-an Naungan terhadap Laju Pertumbuhan Tinggi Semai Eucalyptus Pellita di Baserah Central Nursery," *Agroforetech*, vol. 2, no. 2, pp. 866–871, 2024.
- [40] M. Yusuf, I. Dewi, and H. Susanti, "Pengaruh Media Semai Dan Kerapatan Populasi Benih Semaian Benih Padi Di Dapog Terhadap Kinerja Rice Transplanter Pada Lahan Sawah Pasang Surut Kabupaten Banjar The Effect of Seeding Media and Population Development of Rice Seed Seeds At Dapog on Rice Transplanter Performance on Updated Rice Land , Banjar Regency," vol. 01, no. 01, pp. 50–68, 2025.
- [41] P. Harahap, R. Handoko, B. Oktrialdi, and R. F. Siregar, "Comparison Analysis Of PLTS Monocrystalline And Polycrystalline To Sun Abortion Using Glass Film," no. November 2022, pp. 159–167, 2022.
- [42] N. M. Neli Lestari, I. N. Satya Kumara, and I. A. Dwi Giriantari, "Review Status Panel Surya Di Indonesia Menuju Realisasi Kapasitas Plts Nasional 6500 Mw," *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, p. 27, 2021, doi: 10.24843/spektrum.2021.v08.i01.p4.
- [43] P. P. A. Santoso, F. Nopriandy, I. F. B. Ningsih, L. D. Anjiu, and I. Kurniawan, "Pengaruh Bentuk Rangkaian Panel Surya Terhadap Kuat Arus, Tegangan dan Daya," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, p. 26, 2022, doi: 10.30588/jeemm.v6i1.996.
- [44] A. H. H. M. T. Amalia dita, "5187-Article Text-12825-1-10-20220531," *J. Elem. Politek. Caltek Riau*, vol. 8, no. 1, pp. 12–21, 2022.

- [45] Fianti, A. Y. Perdana, B. Astuti, and I. Akhlis, "Analysis of PWM- And MPPT-solar charge controller efficiency by simulation," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1918, no. 2, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1918/2/022004.
- [46] A. M. Rosli, N. Akmal, M. Jamail, and Q. E. Kamarudin, "Implementation of Solar Charge Controller for Uninterruptible Power Supply," vol. 4, no. 2, pp. 592–598, 2023.
- [47] N. F. Wahidin, E. Yadie, and M. A. Putra, "Analisis Perbandingan Solar Charging Controller (SCC) Jenis PWM Dan MPPT Pada Automatic Handwasher with Workstation Bertenaga Surya Politeknik Negeri Samarinda," *PoliGrid*, vol. 3, no. 1, p. 12, 2022, doi: 10.46964/poligrid.v3i1.1490.
- [48] Unang Achlison, Joseph Teguh Santoso, Khoirur Rozikin, and F. D. Silalahi, "Analisis Pengisian Baterai Aki Kendaraan Listrik Menggunakan Sumber Daya dari Panel Surya dan PLN," *Elkom J. Elektron. dan Komput.*, vol. 17, no. 2, pp. 622–625, 2024, doi: 10.51903/elkom.v17i2.2128.
- [49] S. Rais, B. Tjiroso, K. Umar, W. Hardi, and A. S. Pratama, "Pengujian Portable Solar Cell Kapasitas 100 WP Sebagai Energi Listrik Penggerak Blower Pengering Cengkeh 250 Watt," *PATRIA ARTHA Technol. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 188–185, 2022.
- [50] Hamdani, Z. Tharo, and S. Anisah, "Rancang Bangun Inverter Gelombang Sinus Termodifikasi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *J. Eval. Educ.*, vol. 16, no. 1, pp. 978–7297, 2020.
- [51] M. A. Syururi, B. S. Kaloko, and W. Cahyadi, "Rancang Bangun Inverter 600 Watt dengan Metode Sinusoidal Pulse Width Modulation," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 11, no. 3, pp. 147–154, 2022.
- [52] L. Halim and O. Sudjana, "PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI AWAL SOLAR INVERTER UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA OFF GRID," *J. Teknol.*, vol. 12, no. 1, pp. 31–38, 2020, doi: 10.24853/jurtek.12.1.31-38.
- [53] A. N. Walidi, "Akurasi Pengukuran kWh Meter Analog Terhadap Losses Energi Listrik," *Sutet*, vol. 11, no. 2, pp. 105–113, 2021, doi: 10.33322/sutet.v11i2.1577.

- [54] M. N. Hidayah, A. Riza, and A. Kunto, “Implementasi *Internet of Thing* untuk kontrol dan monitoring kwh meter pascabayar,” *J. Pendidik. Tek. Elektro Undiksha*, vol. 9, no. 3, pp. 161–170, 2020.
- [55] P. N. Gajera, K. S. Parikh, V. Gupta, and H. Gupta, “Development of DC Energy Meter for Renewable Energy Application,” *E3S Web Conf.*, vol. 182, pp. 4–7, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202018202008.
- [56] A. Othman and N. H. Zakaria, “Energy Meter based Wireless Monitoring System using Blynk Application via smartphone,” *IEEE Int. Conf. Artif. Intell. Eng. Technol. IICAIET 2020*, no. January, 2020, doi: 10.1109/IICAIET49801.2020.9257827.
- [57] N. Farhana, M. Husin, N. Akmal, and M. Jamail, “Miniature Circuit Breaker (MCB) Current Detector by using Microcontroller and Global System of Mobile (GSM),” *Evol. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 262–270, 2022, [Online]. Available: <http://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/eeee>
- [58] L. H. Quan, M. Z. Hasan, and N. S. Khalid, “Design of Remote Warning System for Miniature Circuit Breaker (MCB) Power Shortage via Internet of Things (IOT),” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2107, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2107/1/012015.
- [59] R. F. Siregar, Affandi, A. R. Nasution, and F. I. Pasaribu, *Sistem Mikrokontroler I*. 2024. [Online]. Available: [https://books.google.co.id/books?hl=id&lr=&id=oSI3EQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=sistem+mikrokontroler+1+umsu+&ots=PwWYMSiWqJ&sig=G1fJDDldET-xpJqTLfKe3EVCVuo&redir\\_esc=y#v=onepage&q=sistem mikrokontroler 1 umsu&f=false](https://books.google.co.id/books?hl=id&lr=&id=oSI3EQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=sistem+mikrokontroler+1+umsu+&ots=PwWYMSiWqJ&sig=G1fJDDldET-xpJqTLfKe3EVCVuo&redir_esc=y#v=onepage&q=sistem mikrokontroler 1 umsu&f=false)
- [60] A. Abu Sneineh and A. A. A. Shabaneh, “Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things,” *MethodsX*, vol. 11, no. June, p. 102401, 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102401.
- [61] Espressif Systems, “ESP32 Series,” *Esp32*, pp. 1–65, 2021, [Online]. Available:

[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2_datasheet_en.pdf)

- [62] R. F. Siregar, "Development of pH Sensing Devices Based on Optical Fluorescents with Rapid Measurement, Low Cost and Wireless Monitoring," *JAREE (Journal Adv. Res. Electr. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 87–93, 2020, doi: 10.12962/j25796216.v4.i2.126.
- [63] F. Istiqomah, Y. Y. Regitasari, A. N. Roshita, and J. Susila, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Otomatis Dan Monitoring pH Larutan Nutrisi Kebun Sayur Hidroponik Berbasis Android," *El Sains J. Elektro*, vol. 2, no. 1, 2020, doi: 10.30996/elsains.v2i1.3673.
- [64] K. Duangpakdee, G. Thananta, and S. Sukpancharoen, "IoT enhanced deep water culture hydroponic system for optimizing Chinese celery yield and economic evaluation," *Smart Agric. Technol.*, vol. 9, no. June, p. 100545, 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100545.
- [65] B. Oktrialdi, P. Harahap, M. Adam, and R. F. Siregar, "Analisis Sistem Monitoring Suhu Dan Kelembaban Berbasis ATmega8535," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 98–102, 2023, doi: 10.30596/rele.v5i2.13086.
- [66] P. S. Mahardika and A. A. N. Gunawan, "Modeling of water temperature in evaporation pot with 7 Ds18b20 sensors based on Atmega328 microcontroller," *Linguist. Cult. Rev.*, vol. 6, pp. 184–193, 2022, doi: 10.21744/lingcure.v6ns3.2123.
- [67] M. Bagus, R. Huda, and W. D. Kurniawan, "Sistem Pengendalian Temperatur Menggunakan Sensor DS18B20 Berbasis Arduino," *Jrm*, vol. 7, no. 02, pp. 18–23, 2022.
- [68] A. Susilawati, I. Kustiawan, D. Rochintaniawati, L. Hasanah, and Y. Lim, "Light Intensity Distribution in the Room Using Light Dependent Resistor: Through the Engineering Design Process," *Indones. J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 679–708, 2024, doi: 10.17509/ijost.v9i3.74410.
- [69] B. J. C. Ambrosio, N. Z. Simon, and N. P. Hermosa, "Characterizing a light dependent resistor (LDR) response to a laser diode using Malus' Law," *Proc. Samahang Pisika ng Pilipinas*, vol. 40, no. October, pp. 1–5, 2022, [Online].

Available: <https://www.researchgate.net/publication/364661613>

- [70] G. E. Adjovu, H. Stephen, D. James, and S. Ahmad, "Measurement of Total Dissolved Solids and Total Suspended Solids in Water Systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 14, pp. 1–43, 2023, doi: 10.3390/rs15143534.
- [71] F. Chuzaini and Dzulkiflih, "IoT Monitoring Kualitas Air dengan Menggunakan Sensor Suhu , pH , dan Total Dissolved Solids ( TDS )," *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 11, no. 3, pp. 46–56, 2022.
- [72] R. Sakroni and N. Az, "Rancang Bangun Sensor Tds ( Total Dissolved Solid ) Sebagai Elemen Umpan Balik Pada Sistem Otomatisasi," vol. 01, no. 01, pp. 27–37, 2025.
- [73] D. Hendryadi, J. Iryani, S. Komputer, and I. Teknologi dan Bisnis Bina Adinata, "Prototipe Alat Pemilah Buah Kopi Otomatis pada Panen Racutan (Stripping) Menggunakan Sensor Warna TCS34725 dan Modul Arduino," *Amm. J. Syst. Inf. Comput. Inst. Teknol. Dan Bisnis Bina Adinata* , vol. 2, no. 1, pp. 124–132, 2024.
- [74] A. N. Fitri, Marzuarman, Stephan, and W. M. Faizal, "Rancang Bangun Sistem Penyortiran Botol Menggunakan Sensor Warna TCS34725 Berbasis Arduino Mega," *Semin. Nas. Ind. dan Teknol.*, no. 24, pp. 209–215, 2023.