

**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL pH LARUTAN UNTUK
TANAMAN SELADA DALAM TEKNIK BUDIDAYA HIDROPONIK
VERTIKULTUR BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IoT)**

Skripsi

Oleh

**DINA AFRILIA
NPM 2117041011**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL pH LARUTAN UNTUK
TANAMAN SELADA DALAM TEKNIK BUDIDAYA HIDROPONIK
VERTIKULTUR BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IoT)**

Oleh

Dina Afrilia

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL pH LARUTAN UNTUK TANAMAN SELADA DALAM TEKNIK BUDIDAYA HIDROPONIK VERTIKULTUR BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IoT)

Oleh

DINA AFRILIA

pH merupakan parameter kritis dalam budidaya selada hidroponik yang mempengaruhi penyerapan nutrisi optimal. Kontrol pH manual yang umum dilakukan petani membutuhkan waktu dan tenaga besar, sehingga kurang efisien untuk era urbanisasi saat ini. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kontrol pH larutan otomatis untuk penanaman selada dengan menyesuaikan parameter operasional, khususnya rentang pH optimal yang sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan spesifik selada dalam budidaya hidroponik vertikultur berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem yang dikembangkan terdiri dari ESP-32, sensor pH-4502C, modul relay 2 *channel*, LCD I2C 16×2, dan dua pompa peristaltik 12V untuk pemberian larutan asam dan basa. Sistem diintegrasikan dengan instalasi hidroponik vertikultur berkapasitas 16 lubang tanam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu mempertahankan nilai pH dalam rentang optimal yaitu 6,0 hingga 7,0 serta implementasi IoT pada sistem ini yang juga memungkinkan monitoring dan kontrol jarak jauh melalui Blynk. Sistem kontrol pH otomatis yang dirancang terbukti efektif dalam menjaga stabilitas pH larutan nutrisi dan meningkatkan efisiensi produksi dengan mengurangi fluktuasi pH yang dapat mengganggu penyerapan nutrisi tanaman. Pengujian yang dilakukan menunjukkan peningkatan produktivitas selada terbesar terjadi pada rata-rata diameter batang (54,55%), diikuti jumlah daun (40%), dan lebar daun (38,46%) saat panen yang lebih tinggi dibandingkan hasil panen selada tanpa sistem kontrol otomatis.

Kata kunci: *Internet of things*, hidroponik vertikultur, kontrol pH otomatis, selada.

ABSTRACT

DESIGN OF pH SOLUTION CONTROL SYSTEM FOR LETTUCE PLANTS IN VERTICULTURE HYDROPONIC CULTIVATION TECHNIQUE BASED ON INTERNET OF THINGS (IOT)

By

DINA AFRILIA

pH is a critical parameter in hydroponic lettuce cultivation that affects optimal nutrient absorption. Manual pH control that is commonly done by farmers requires a lot of time and energy, making it less efficient for the current era of urbanization. This research aims to develop an automatic solution pH control system for lettuce cultivation by adjusting operational parameters, especially the optimal pH range that matches the characteristics and specific needs of lettuce in verticulture hydroponic cultivation based on the Internet of Things (IoT). The developed system consists of an ESP-32, a pH-4502C sensor, a 2-channel relay module, a 16×2 I2C LCD, and two 12V peristaltic pumps for acid and alkaline solution delivery. The system is integrated with a verticulture hydroponic installation with a capacity of 16 planting holes. The test results show that the designed system is able to maintain the pH value within the optimal range of 6.0 to 7.0 as well as the implementation of IoT in this system which also allows remote monitoring and control via Blynk. The designed automatic pH control system is proven to be effective in maintaining the pH stability of the nutrient solution and increasing production efficiency by reducing pH fluctuations that can interfere with the absorption of plant nutrients. Tests conducted showed that the largest increase in lettuce productivity occurred in the average stem diameter (54.55%), followed by number of leaves (40%), and leaf width (38.46%) at harvest, which was higher than the lettuce harvest without an automatic control system.

Keywords: Internet of things, hydroponic verticulture, automatic pH control, lettuce.

Judul Penelitian

**: RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL
pH LARUTAN UNTUK TANAMAN
SELADA DALAM TEKNIK BUDIDAYA
HIDROPONIK VERTIKULTUR BERBASIS
INTERNET OF THINGS (IOT)**

Nama Mahasiswa

: Dina Afrilia

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2117041011

Jurusan

: Fisika

Bidang Keahlian

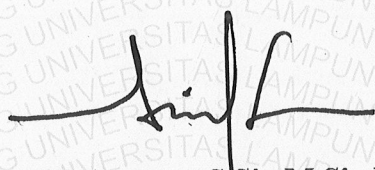
: Instrumentasi

Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing


Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP 197109092000121001


Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si.
NIP 199011252019032018

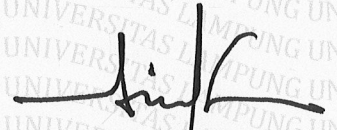
2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA


Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP 197109092000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Arif Surtoto S.Si., M.Si., M.Eng.



Sekretaris : Humairah Ratu Ayu S.Pd., M. Si



Penguji

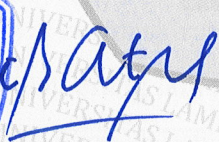
Bukan Pembimbing : Dr. Sri Wahyu Suciwati, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 20 Juni 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dina Afrilia
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041011
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung
Judul Skripsi : **RANCANG BANGUN SISTEM KONTROL pH
LARUTAN UNTUK TANAMAN SELADA
DALAM TEKNIK BUDIDAYA HIDROPONIK
VERTIKULTUR BERBASIS *INTERNET OF
THINGS* (IOT)**

Menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 26 Juni 2025



Dina Afrilia
NPM. 2117041011

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Dina Afrilia yang lahir pada tanggal 16 April 2003 di Purwodadi, dari pasangan Alm. Bapak Kuzairi dan Ibu Hasunah sebagai anak keempat dari lima bersaudara. Penulis menyelesaikan pendidikan di Taman Kanak-kanak (TK) Al-Ikhlas pada tahun 2009. Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDN 11 Metro Pusat pada tahun 2015. Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 3 Metro pada 2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 2 Metro pada 2021. Pada 2021, penulis diterima sebagai mahasiswa di Universitas Lampung, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Melalui Jalur SNMPTN.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) FMIPA Unila sebagai Sekertaris Biro Kesekretariatan dan Rumah Tangga Periode 2023. Penulis juga pernah menjadi asisten praktikum Fisika Dasar 1, Fisika Dasar 2, Metode Pengukuran, Elektronika Dasar, Fisika Komputasi, Fisika Eksperimen, Mikrokontroler, serta Sistem Akusisi dan Transmisi Data. Pada tahun 2024, penulis melaksanakan dua kegiatan akademik, yaitu Praktik Kerja Lapangan (PKL) dan Kuliah Kerja Nyata (KKN). PKL dilaksanakan di RSUD Dr. H. Abdul Moeloek Provinsi Lampung dengan judul "*Analisis Kerusakan dan Troubleshooting* pada Ultrasonografi di RSUD Dr. H. Abdul Moeloek Provinsi Lampung". Sementara itu, KKN dilaksanakan di Desa Catur Swako, Kecamatan Bumi Agung, Kabupaten Lampung Timur, Provinsi Lampung.

MOTTO

Hari ini lebih baik dari kemarin, besok lebih baik dari hari ini

“Betapapun sulitnya hidup tampak, selalu ada sesuatu yang bisa kamu lakukan dan berhasil. Yang penting adalah kamu tidak menyerah”

~Stephen Hawking~

Tidak ada dalam hidup yang harus ditakuti, hanya dipahami. Sekarang saatnya memahami lebih banyak, agar kita bisa lebih sedikit takut.

~Marie Curie~

PERSEMBAHAN

Segala puji bagi Allah SWT Tuhan seluruh Alam.

Saya persembahkan karya ini kepada:

Orang Tua Tercinta

Ibu Hasunah

Terimakasih atas doa dan seluruh dukungan yang telah diberikan tanpa henti sepanjang perjalanan studi ini. Dukungan ini menjadi kekuatan yang sangat berarti dalam menghadapi berbagai tantangan yang saya hadapi.

Bapak Ibu Guru serta Bapak Ibu Dosen

Terimakasih atas dedikasi dalam memberikan ilmu, arahan yang tepat, dan inspirasi yang memotivasi. Semoga ilmu ini dapat saya implementasikan untuk berkontribusi positif dan menjadi bekal berharga dalam menggapai cita-cita.

Kakak-kakak dan Adik Tersayang

Teteh Kiki Mariyam, Aa' Achamad Novan Habibi, Aa' Achamad Redha, Achmad Dani Adrian

Terimakasih atas segala semangat, bantuan yang selalu hadir tanpa diminta, serta dukungan yang mengalir di setiap momen perjuangan ini. Kehadiran kalian adalah kekuatan terbesar yang membuat saya mampu bertahan dan terus melangkah maju.

Rekan-rekan Fisika FMIPA Unila Angkatan 2021

Almamater Tercinta,
"UNIVERSITAS LAMPUNG"

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Rancang Bangun Sistem Kontrol pH Larutan Untuk Tanaman Selada Dalam Teknik Budidaya Hidroponik Vertikultur Berbasis *Internet of Things* (IoT)”** dengan lancar dan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Sains, serta mengembangkan kemampuan mahasiswa dalam berpikir analitis, sistematis, dan kritis serta melatih keterampilan dalam menuangkan gagasan secara ilmiah.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih terdapat berbagai kekurangan dan keterbatasan dalam penelitian ini, baik dari segi metodologi, analisis data, maupun pembahasan hasil penelitian. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat penulis harapkan demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua.

Bandar Lampung, 20 Juni 2025
Penulis,

Dina Afrilia

SANWACANA

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Kontrol pH Larutan Untuk Tanaman Selada Dalam Teknik Budidaya Hidroponik Vertikultur Berbasis *Internet Of Things* (IoT)” dengan baik.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains di Universitas Lampung. Penulis menyadari bahwa dalam proses penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, saran, dan kritik yang membangun dengan penuh kesabaran dan keikhlasan dalam penyusunan skripsi ini.
2. Humairoh Ratu Ayu S.Pd., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan masukan, saran, dan bimbingan yang sangat berharga dalam penyempurnaan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Sri Wahyu Suciwati S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan evaluasi yang konstruktif untuk meningkatkan kualitas skripsi ini.
4. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si., selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan akademik, motivasi, dan dukungan moral selama masa perkuliahan serta dalam proses penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

6. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, dan wawasan yang sangat bermanfaat selama masa perkuliahan.
7. Ibu, yang telah memberikan doa, dukungan, kasih sayang, dan pengorbanan yang tak terhingga dari awal hingga akhir baik secara moril maupun materil.
8. Kakak-kakak dan adik yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan kepada penulis.
9. Lulu Q.A., *support system* terbaik yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan penulisan skripsi ini dengan memberikan bantuan yang sangat berarti, motivasi, serta kesetiaan dalam mendampingi penulis.
10. Sahabat-sahabat seperjuangan saya Anis, Gusti, Inayah, Armel, Ega, Okka, Ketrin, Feby, Jaya, Fathan, dan Naufal yang telah memberikan motivasi, bantuan, dan kebersamaan di KBK Instrumentasi. Serta teman-teman seperjuangan di *Warrior Club* yang telah memberikan warna dalam perjalanan akademik penulis.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu dan mendukung penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

Bandar lampung, 20 Juni 2025
Penulis

Dina Afrilia

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>.....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
HALAMAN PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xivii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terkait.....	5
2.2 Studi Literatur.....	9
2.2.1 Selada	9
2.2.2 Hidroponik.....	11
2.2.3 Parameter Kualitas Larutan Nutrisi Hidroponik.....	15
2.2.4 Sensor pH	16
2.2.5 <i>Espressif Systems Platform 32-bit (ESP 32)</i>	20
2.2.6 Modul Relay	21
2.2.7 <i>Liquid Crystal Display (LCD)</i>	23

III. METODE PENELITIAN	26
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Prosedur Penelitian	28
3.3.1 Studi Literatur	29
3.3.2 Perancangan Perangkat Keras	29
3.3.3 Perancangan Perangkat Lunak	33
3.3.4 Kalibrasi Sensor pH	34
3.3.5 Pengujian Sistem dan Pengambilan Data	39
VI. HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Realisasi Alat	41
4.2 Pengujian Perangkat Keras	44
4.2.1 Kalibrasi Sensor pH-4502C	44
4.2.2 Pengujian Aktuator	47
4.2.3 Konektivitas Sistem Dengan Blynk	50
4.2.4 Pengujian Sistem Pada Instalasi Hidroponik	55
4.3 Pengaruh Sistem Kontrol pH terhadap Pertumbuhan Tanaman Selada ...	57
V. SIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Simpulan	61
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Sistem Kontrol pH pada Hidroponik NFT	5
2.2 Rancangan Instalasi Hidroponik DFT	6
2.3 Skema Peletakkan Sistem Kontrol.....	6
2.4 Gambaran Umum Hidroponik Vertikultur	7
2.5 Posisi Sensor pada Sistem.....	8
2.6 Desain Sistem Alat Pengontrolan pH.....	8
2.7 Selada	9
2.8 Tanaman hidroponik dalam netpot.....	10
2.9 Hidroponik Sistem Tetes	12
2.10 Hidroponik Sistem NFT.....	12
2.11 Aliran nutrisi pada sistem DFT	13
2.12 Model Aeroponik	13
2.13 Contoh Hidroponik Vertikultur	14
2.14 Skala Keasaman	16
2.15 Sensor pH 4502C	18
2.16 Skema Sistem Elektroda Kaca	18
2.17 Ilustrasi Proses Pertukaran Ion H^+	19
2.18 Pin-Pin ESP32.....	21
2.19 Modul Relay.....	21
2.20 Modul Relay 2 Channel	23
2.21 Modul I2C	24
2.22 Pin pada LCD 16×2	24
2.23 LCD 16×2	25
3.1 Diagram Alir Penelitian	28
3.2 Diagram Blok Penelitian.....	29

3.3	Skematik Rangkaian Keseluruhan Sistem	31
3.4	Instalasi Hidroponik Vertikultur.....	31
3.5	Desain Rangkaian Sistem.....	33
3.6	Posisi Sensor Pada Sistem	32
3.7	Diagram Alir Perancangan Perangkat Lunak.....	33
3.8	Proses Penimbangan	34
3.9	Proses Pengukuran Nilai ADC Sensor.....	35
3.10	Proses Pengukuran Menggunakan pH Meter.....	35
3.11	Contoh Grafik Hubungan pH dan ADC	37
4.1	Realisasi rangkaian elektronik	41
4.2	(a) Kotak panel tampak depan, (b) Kotak panel tampak belakang	42
4.3	Integrasi sistem kontrol pH dengan instalasi hidroponik.....	43
4.4	Grafik pengujian ADC keluaran sensor pH-4502C terhadap nilai pH pada pH Meter	45
4.5	Tampilan antarmuka sistem kontrol aplikasi Blynk.....	55
4.6	Hari pertama selada pindah tanam ke tower hidroponik.....	57
4.7	(a) Tanaman selada tanpa sistem kontrol pH (b) Tanaman selada dengan sistem kontrol pH	58
4.8	(a) Tebal batang selada tanpa menggunakan sistem kontrol, (b) Tebal batang selada dengan menggunakan sistem kontrol, (c) Lebar daun selada tanpa menggunakan sistem kontrol, (d) Lebar daun selada dengan menggunakan sistem kontrol.....	59

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Alat dan Bahan Penelitian	26
3.2 Perbandingan Nilai ADC Sensor pH dan Nilai pH Meter.....	37
3.3 Data Pengujian Sensor pH	38
3.4 Data Hasil Pengujian Pompa pH Up dan pH Down	39
3.5 Data Hasil Pengujian Sistem Kontrol pH Pada Instalasi Hidroponik	40
4.1 Hasil Pengujian Nilai ADC sensor pH-4502C dengan pH meter	45
4.2 Perbandingan Pembacaan Sensor pH-4502C dengan pH Meter.....	47
4.3 Hasil Pengujian Pompa Dosing Larutan pH Up dan pH Down	49
4.4 Hasil Pengujian Sistem pada Instalasi Hidroponik	56
4.5 Pengukuran Hasil Panen Tanaman Selada	59

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini Indonesia menghadapi fenomena urbanisasi yang cukup signifikan, berdasarkan data hasil proyeksi dari Badan Pusat Statistik (BPS) mengenai presentase penduduk daerah perkotaan 2010 - 2035 menunjukkan peningkatan dari angka 49.8% pada tahun 2010 menjadi 68.9% pada tahun 2035 (BPS, 2020). Seiring dengan pertumbuhan populasi di wilayah perkotaan yang pesat ini membawa berbagai tantangan, terutama dalam hal ketahanan pangan dan ketersediaan lahan pertanian di wilayah urban (Aprilani, 2024; Mahdalena, 2024). Sementara kebutuhan pangan yang terus meningkat, lahan pertanian produktif di kawasan perkotaan semakin terbatas akibat tingginya laju pembangunan infrastruktur dan pemukiman (Vyshnavi dkk., 2023).

Menghadapi tantangan dalam hal ketahanan pangan dan ketersediaan lahan pertanian, sistem pertanian vertikal dengan teknik hidroponik hadir sebagai solusi rekayasa yang menjanjikan dalam meningkatkan produktivitas per area dengan memperluas budidaya tanaman ke dimensi vertikal (Eigenbrod dan Gruda, 2015; Touliatos dkk., 2016). Metode ini memungkinkan optimalisasi pemanfaatan lahan terbatas melalui pengembangan dimensi vertikal, dimana dalam area 1 m² dengan tinggi tower 1,5 m dapat menghasilkan kapasitas lubang tanam dua kali lipat dibandingkan metode konvensional. Efisiensi penggunaan lahan ini menjadikan metode budidaya tanaman secara hidroponik vertikultur sebagai alternatif yang ideal untuk pengembangan *urban farming* di kawasan perkotaan yang padat dan dinamis (Putri A, dkk., 2023).

Tanaman selada (*Lactuca sativa L.*) dipilih sebagai objek penelitian ini berdasarkan beberapa pertimbangan bahwa tanaman ini termasuk sayuran favorit yang mudah

dibudidayakan secara hidroponik vertikultur, memiliki nilai ekonomi tinggi, waktu panen relatif singkat, serta permintaan pasar yang stabil. Selain itu, selada juga cukup rentan terhadap perubahan lingkungan dan kualitas larutan nutrisi, sehingga tanaman ini cocok untuk dijadikan objek penelitian untuk pengembangan sistem hidroponik berbasis teknologi (Nur dkk., 2024).

Implementasi sistem hidroponik vertikultur masih menghadapi tantangan dalam hal pengendalian beberapa parameter pertumbuhan tanaman, seperti kadar pH larutan, *electrical conductivity* (EC) larutan, cahaya, suhu, dan kelembaban. Tingkat keasaman (pH) larutan nutrisi pada hidroponik memainkan peran penting dalam proses penyerapan nutrisi oleh tanaman. Ketika pH larutan berada di bawah 6,0 maka, tanaman akan mengalami kesulitan dalam penyerapan unsur hara makro seperti kalsium, magnesium, dan fosfor yang berdampak pada pertumbuhan tanaman dan penurunan produktivitas. Di sisi lain, pH di atas 7,0 menghambat tanaman untuk menyerap unsur hara mikro seperti tembaga, mangan, seng, dan besi, yang dapat mengakibatkan defisiensi nutrisi sehingga berakhir dengan kematian tanaman (Ibadarrohman dkk., 2018).

Penelitian terdahulu oleh Putri dkk. (2023a), telah mengembangkan sistem kontrol otomatis berbasis IoT untuk pengendalian pH pada budidaya pakcoy secara hidroponik vertikultur. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem kontrol otomatis dapat mempertahankan pH larutan. Namun, pada penelitian tersebut terbatas pada jenis tanaman yang diteliti yaitu pakcoy. Sedangkan, setiap jenis tanaman memiliki karakteristik dan kebutuhan nutrisi yang berbeda-beda. Begitu juga dengan selada, memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap perubahan pH. Berdasarkan penelitian (Muriyatmoko dkk., 2023), selada membutuhkan rentang pH yang spesifik yaitu 6,0 – 7,0 untuk pertumbuhan optimal dan menghasilkan produktivitas maksimal. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut dari sistem kontrol pH yang telah ada untuk menyesuaikan dengan kebutuhan spesifik tanaman selada.

Kemajuan teknologi saat ini telah membawa efektivitas, efisiensi, dan kemudahan dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk dalam sektor pertanian. Integrasi *Internet of Things* (IoT) dalam sektor pertanian modern memungkinkan

pemantauan dan pengendalian parameter pertumbuhan tanaman secara *real-time* dan jarak jauh. Teknologi ini membuka peluang untuk mengembangkan solusi *smart farming* yang lebih adaptif terhadap kebutuhan masyarakat perkotaan yang dinamis (Junaidi dan Ramadhani, 2024).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengoptimalkan sistem kontrol otomatis berbasis *Internet of Things* untuk pengendalian pH pada budidaya selada secara hidroponik vertikultur. Pengembangan sistem dilakukan dengan mengontrol parameter operasional, khususnya rentang pH optimal sebesar 6,0 – 7,0 yang disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan spesifik selada. Implementasi sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan produktivitas budidaya selada secara hidroponik vertikultur, sekaligus memberikan kontribusi pada pengembangan database sistem kontrol pH untuk berbagai jenis tanaman hidroponik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol otomatis berbasis IoT untuk mengendalikan pH larutan pada budidaya selada dengan sistem hidroponik vertikultur?
2. Bagaimana pengaruh pengendalian pH otomatis terhadap pertumbuhan dan produktivitas selada pada sistem hidroponik vertikultur?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol otomatis berbasis IoT untuk mengendalikan pH larutan pada budidaya selada dengan sistem hidroponik vertikultur.
2. Menganalisis pengaruh pengendalian pH otomatis terhadap pertumbuhan dan produktivitas selada pada sistem hidroponik vertikultur.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan solusi praktis dalam pengelolaan hidroponik vertikultur yang lebih efisien.
2. Menghasilkan sistem kontrol otomatis untuk mengatur nilai pH larutan nutrisi pada metode budidaya hidroponik vertikultur.

1.5 Batasan Masalah

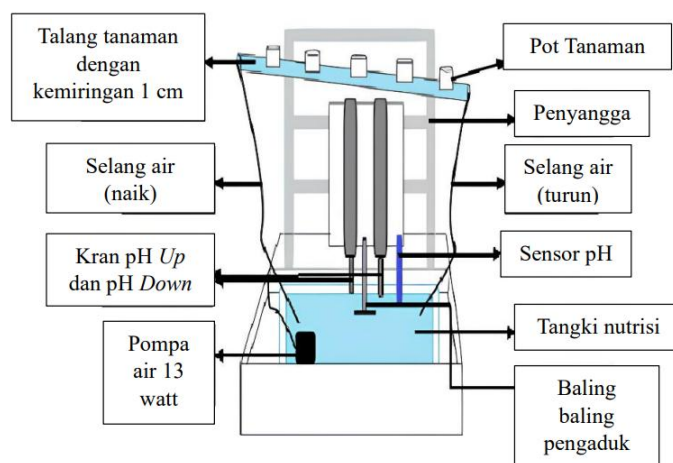
Adapun batasan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini membatasi diri pada jenis tanaman selada keriting hijau.
2. Fokus penelitian hanya pada kontrol nilai pH larutan nutrisi pada budidaya hidroponik vertikultur.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian Putra dan Pambudi (2017), mengenai sistem kontrol otomatis pH larutan nutrisi tanaman bayam pada hidroponik *Nutrient Film Technique* (NFT) menghasilkan sebuah alat pengatur pH secara otomatis berbasis arduino nano dan sensor pH dengan metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Sistem ini dirancang menggunakan 2 buah aktuator motor servo yang dimodifikasi dengan kran/*ball valve* dan input berupa sensor analog pH DF-ROBOT (SEN0169). Sistem yang dirancang dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.

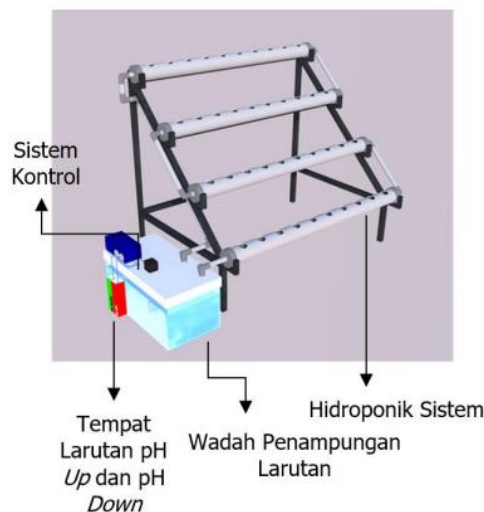


Gambar 2.1 Sistem Kontrol pH pada Hidroponik NFT (Putra dan Pambudi, 2017)

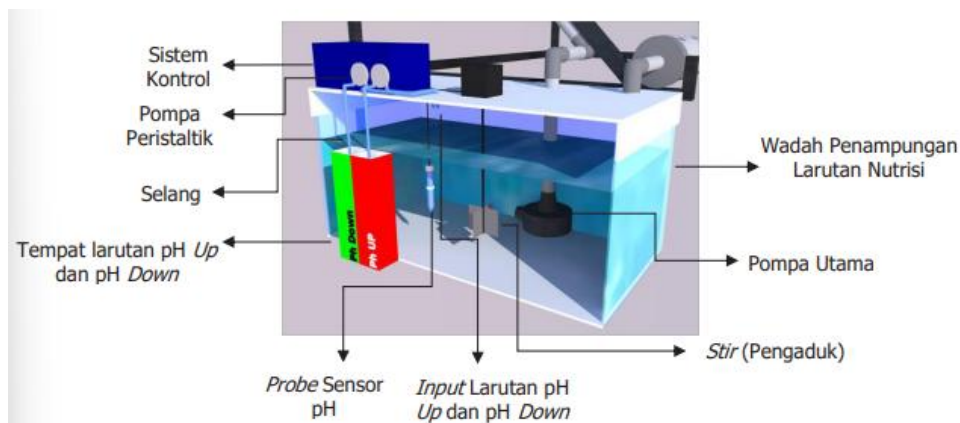
Metode *Fuzzy Logic Controller* yang diimplementasikan pada rancangan ini mampu mempertahankan nilai pH dengan rentang 6,6 - 7,6 dan menghasilkan pertumbuhan bayam setinggi 24,8 cm dan banyak daun 13 helai selama 14 hari. Hasil respon terbaik dari implementasi *Fuzzy Logic Controller* terdapat pada sistem

yang memiliki pembukaan sudut servo 60 (buka sedikit) dengan *rise time* 40 detik dan *time settling* pada waktu ke 126 detik untuk menaikkan pH. Sedangkan untuk menurunkan pH, *rise time* diperoleh selama dua kali yaitu selama 61 detik dan aktifitas sistem yang kedua selama 4 detik dan *time settling* pada waktu 125 detik.

Penelitian Putri dkk. (2023b), mengenai pengembangan sistem otomatisasi pH larutan nutrisi pada hidroponik sistem *Deep Flow Technique* (DFT) berbasis IoT dalam budidaya kangkung menghasilkan sebuah sistem kendali yang dapat mengontrol nilai pH larutan dengan sensor pH sebagai pendeteksi nilai pH larutan, Arduino Uno sebagai mikrokontroler, modul ESP 8266 sebagai modul wifi, dan aplikasi Blynk sebagai platform IoT dan kontrol PID. Rancangan instalasi dari sistem ini ditunjukkan pada **Gambar 2.2** dengan skema peletakan sistem kontrol seperti pada **Gambar 2.3**.



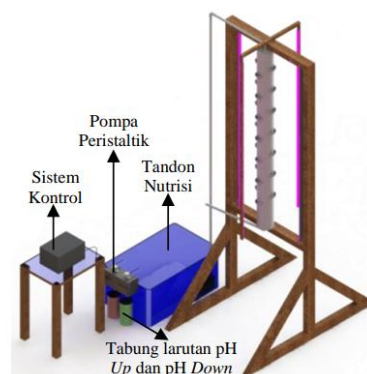
Gambar 2.2 Rancangan Instalasi Hidroponik DFT (Putri dkk., 2023b)



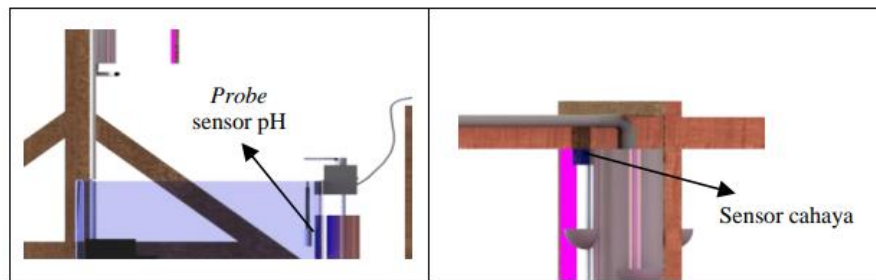
Gambar 2.3 Skema Peletakkan Sistem Kontrol (Putri dkk., 2023b)

Berdasarkan hasil uji yang dilakukan, sistem otomasi pH larutan nutrisi untuk tanaman hidroponik dengan menggunakan sistem DFT berbasis IoT mampu mengendalikan nilai pH larutan berdasarkan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Pengontrol PID sistem ini adalah $K_p = 2.1$; $K_i = 0,05$; dan $K_d = 0,03$. Dengan pemeriksaan kondisi pabrik di 60 tanaman (30 kangkung dengan sistem kendali dan 30 kangkung tanpa sistem kendali). Pengamatan pada 18 hari setelah tanam menunjukkan bahwa kangkung dengan sistem kontrol memiliki tinggi batang 40,50 cm dan 18 helai daun serta hasil 1,064 kg, sedangkan kangkung tanpa sistem kontrol memiliki tinggi batang 35,66 cm dan 16 helai daun. Monitoring hasil pembacaan sensor juga dapat diakses melalui platform IoT yaitu *Blynk App* dengan nilai *setpoint* sebesar 5,5-6,5 yang sesuai dengan kebutuhan tanaman kangkung dalam proses pertumbuhan dan perkembangannya

Putri dkk. (2023a), melakukan rancang bangun sistem kontrol pH larutan nutrisi dan pencahayaan berbasis *Internet of Things* (IoT) pada hidroponik vertikultur dalam budidaya tanaman pakcoy. Gambaran umum dari vertikultur sistem hidroponik yang dibangun ditunjukkan pada **Gambar 2.4** dengan posisi sensor yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**. Berdasarkan hasil rancangannya didapat akurasi yang cukup baik, dengan pembacaan sensor pH larutan dan sensor BH1750 yang mendekati nilai sesungguhnya yaitu 1. Hasil kalibrasi dari sensor pH *Probe* PH-4502C mendapatkan nilai R^2 sebesar 0,9947 dan sensor BH1750 mendapatkan R^2 sebesar 0,9994. Rata-rata hasil analisis regresi dari ketepatan pembacaan sensor pH dan sensor BH1750 didapatkan R^2 berturut-turut sebesar 0,9948 dan 0,9913. Penjadwalan *on/off* lampu LED *growing light* juga berjalan sesuai dengan *setpoint* yang telah ditentukan.



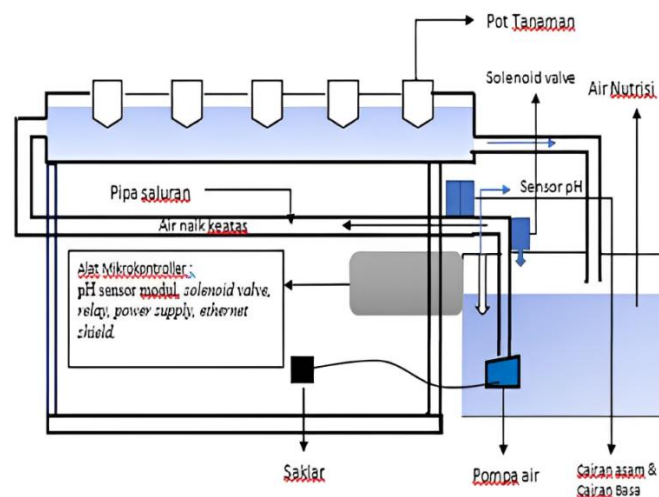
Gambar 2.4 Gambaran Umum Hidroponik Vertikultur (Putri dkk., 2023a)



Gambar 2.5 Posisi Sensor pada Sistem (Putri dkk., 2023a)

Dari hasil pengamatan pada pertumbuhan tanaman pakcoy didapatkan rata-rata tinggi tanaman sebesar 19,6 cm, jumlah daun sebanyak 12,7 helai, lebar daun sebesar 8,1 cm, dan beratnya sebesar 29,5 g.

Penelitian yang dilakukan Muriyatmoko dkk. (2023), menghasilkan sebuah sistem monitoring jarak jauh untuk kontrol pH tanaman selada dengan media hidroponik. Pada penelitiannya menggunakan beberapa alat utama meliputi, sensor pH 4502C sebagai sensor pendeteksi nilai pH larutan, selenoid valve sebagai alat untuk menyalurkan cairan asam dan basa, relay sebagai pengatur arus masuk listrik dan *ethernet shield* sebagai media untuk menghubungkan arduino ke web server dengan desain alat yang dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Desain Sistem Alat Pengontrolan pH (Muriyatmoko dkk., 2023)

Dari hasil uji coba yang dilakukan sistem penetralisir pH secara otomatis dapat berjalan sesuai dengan rancangan dengan mengalirkan cairan basa dari selenoid valve ketika nilai $\text{pH} < 5,00$ dan dapat mengalirkan cairan asam dari selenoid valve ketika nilai $\text{pH} > 7,00$. Selain itu, sistem yang dibuat mampu memonitoring jarak

jauh dengan *wire* LAN hasil dari penetralisir pH pada tanaman selada hidroponik dengan menampilkan data nilai pH, waktu yang telah terdeteksi oleh sensor, serta menampilkan grafik nilai pH pada halaman website.

2.2 Studi Literatur

2.2.1 Selada

Tanaman selada (*Lactuca sativa L.*) merupakan sayuran daun yang tergolong dalam family Asteraceae dan berasal dari lembah Mediterrania Timur. Selada merupakan tanaman beriklim tropis maupun sedang yang berasal dari Mediterania dan Asia Barat sering digunakan sebagai campuran sandwich, hamburgers, dan salad. Tanaman ini mengandung betakaroten yang berfungsi untuk mengurangi resiko kanker, penyakit jantung, serta mempertahankan kesehatan rambut, kuku, dan kulit. Selain itu, mengkonsumsi selada juga berkhasiat untuk mencegah sembelit (Prasetio, 2015). Selada yang kaya akan vitamin A, antioksidan, dan potasium lebih cocok dibudidayakan dalam suhu yang relatif rendah. Hal ini dilakukan untuk mencegah pertumbuhan mengarah ke generatif seperti tumbuhnya bunga atau pembentukan biji saat proses pertumbuhan selada. Pada budidaya selada menghindari daerah dengan suhu yang cukup tinggi, karena suhu tinggi diketahui memicu pertumbuhan bunga. Namun, suhu ekstrem dingin pun tidak cocok karena dapat menghambat pertumbuhan dan merusak daun terluar (Syariefa dkk., 2014). Terdapat beberapa jenis selada seperti, selada keriting hijau, selada keriting merah, *lettuce romaine* dan lainnya. Jenis selada keriting memiliki karakteristik berwarna hijau cerah serta memiliki bentuk daun yang lebar dan bergelombang (Prasetio, 2015). Bentuk fisik selada keriting dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7 Selada (Dokumentasi Pribadi)

Pertumbuhan optimal tanaman selada mensyaratkan kondisi lingkungan tertentu. Suhu yang sesuai untuk pertumbuhan selada berkisar antara 15 °C sampai 20 °C, dengan intensitas pencahayaan matahari berlangsung antara 8 hingga 12 jam/hari. Sementara itu, untuk kelembaban udara yang baik untuk tanaman selada yaitu 80 – 90% (Santosa dkk., 2024)

Secara garis besar terdapat beberapa tahapan yang dilakukan dalam penanaman selada menggunakan metode hidroponik yaitu, tahap semai, tahap pindah tanam dan pembesaran, serta tahap panen. Pada tahap semai, bibit selada disemai menggunakan media seperti *rockwool* selama 7-10 hari. Setelah muncul daun sejati (daun ketiga dan seterusnya) maka tahap selanjutnya yaitu memindahkan tanaman ke instalasi hidroponik untuk tahap pembesaran dengan bantuan *netpot* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8**. Setiap varietas atau jenis selada mempunyai umur panen yang berbeda (Nugroho, 2024). Pertumbuhan dari selada dewasa sendiri dapat mencapai 65-130 hari setelah tanam. Namun, waktu panen selada biasanya dilakukan saat selada masih relatif muda. Hal ini dilakukan karena semakin tua umur selada maka akan menghasilkan rasa pahit sehingga kurang bisa dinikmati (Syariefa dkk., 2014).



Gambar 2.8 Tanaman hidroponik dalam netpot (Nugroho, 2024)

Salah satu faktor terpenting dalam budidaya tanaman selada menggunakan metode hidroponik adalah kualitas pH larutan. Nilai pH mempengaruhi ketersediaan nutrisi dalam larutan dan menentukan kemampuan akar dalam menyerap unsur hara. Sehingga untuk mengoptimalkan hasil dan kualitas tanaman selada sistem hidroponik vertikultur dibutuhkan sistem otomasi agar dapat mempermudah pembudidayaan tanaman hidroponik (Santosa dkk., 2024)

2.2.2 Hidroponik

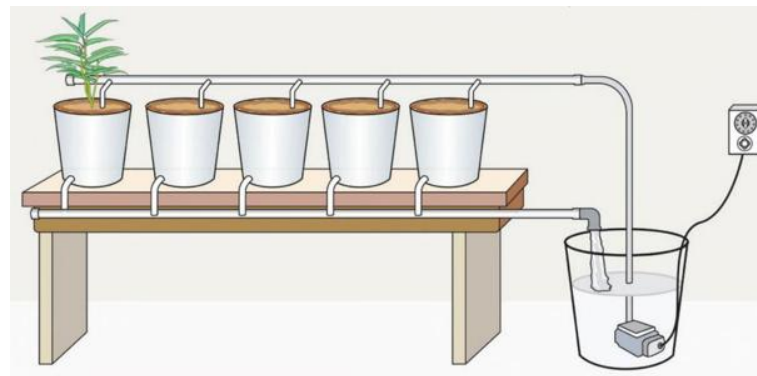
Menurut bahasanya, istilah “hidroponik” berasal dari bahasa Yunani, yaitu “*hydro*” yang berarti air, dan “*ponos*” yang berarti daya atau kerja. Secara sederhana, hidroponik adalah suatu pengerjaan atau pengelolaan air sebagai media tumbuh tanaman tanpa menggunakan unsur hara mineral yang dibutuhkan dari nutrisi yang dilarutkan dalam air. Hidroponik juga dikenal sebagai *soilless culture* atau budidaya tanaman tanpa menggunakan media tanam dari tanah (Melfia, 2023). Teknik ini pertama kali dikembangkan oleh Dr. W. F. Gericke seorang agronomis dari Universitas California, USA, pada tahun 1936 untuk hasil uji cobanya berupa tanaman tomat setinggi 3 m yang penuh buah dan ditanam dalam bak berisi mineral sebagai penyempurnaan dari teknik budidaya menggunakan air yang telah dilakukan sejak tahun 1900-an (Lingga, 1984).

Pertanian hidroponik merupakan metode berbudidaya yang melibatkan penanaman tanaman tanpa menggunakan tanah, melainkan dengan memanfaatkan larutan air yang kaya nutrisi sebagai gantinya. Pada prinsipnya, sistem hidroponik tidak melibatkan media tumbuh, tetapi merendam akar dalam larutan nutrisi yang diangin-anginkan (Herwibowo dan Budiana, 2021).

Terdapat dua metode budidaya secara hidroponik, yaitu hidroponik substrat dan hidroponik non-substrat. Pada hidroponik substrat tidak menggunakan air sebagai media, tetapi memakai media padat yang dapat menyerap atau menyediakan nutrisi, air, dan oksigen, serta sedikit mengandung bahan organik. Seperti arang sekam, kerikil, perlite, vermikulit, dan pasir. Sedangkan pada hidroponik non-substrat, model budidayanya dilakukan dengan meletakkan akar tanaman pada aliran air dangkal yang tersirkulasi dan mengandung nutrisi sesuai dengan kebutuhan tanaman. Akar akan berkembang di dalam larutan nutrisi (Halim, 2016). Dalam budidaya hidroponik, semua kebutuhan nutrisi diupayakan tersedia dalam jumlah yang tepat dan mudah diserap oleh tanaman. Nutrisi itu diberikan dalam bentuk larutan yang mengandung unsur hara makro dan mikro (Tusi, 2016).

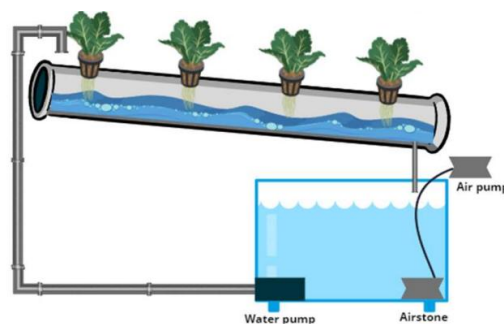
Terdapat beberapa jenis sistem hidroponik yang umum digunakan, diantaranya sistem tetes, *Nutrient Film Technique* (NFT), *Deep Flow Technique* (DFT), dan Aeroponik. Pada sistem irigasi tetes bekerja dengan cara mengalirkan larutan

nutrisi dari bak penampung melalui pipa utama, pipa percabangan, dan *stick drip* dalam bentuk tetesan yang mengenai akar dan diserap oleh akar. Aliran air pada sistem ini diatur menggunakan *timer* dengan frekuensi pemberian nutrisi 3-6 kali sehari sesuai dengan jenis tanaman (Isnain, 2020). Hidroponik sistem tetes ditunjukkan pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Hidroponik Sistem Tetes (Isnain, 2020)

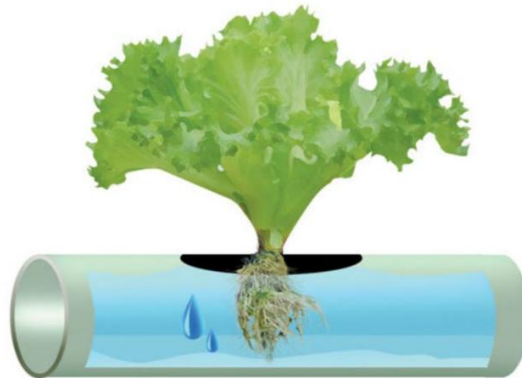
Pada hidroponik sistem *Nutrient Film Technique* (NFT) bekerja dengan cara mengalirkan larutan nutrisi dari bak penampungan ke bak tanam berupa aliran air yang tipis (ketebalan larutan nutrisi sekitar 2-3 mm) secara terus-menerus. Aliran air tipis ini tercipta karena adanya kemiringan pada sistem dengan tingkat kemiringan ideal 4-5%. Sehingga pada sistem ini air yang ada di perakaran akan cepat turun kembali ke wadah penampungan nutrisi karena adanya kemiringan sistem (Isnain, 2020). Hidroponik sistem *Nutrient Film Technique* dapat diilustrasikan seperti **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10 Hidroponik Sistem NFT (Wulandari dkk., 2023)

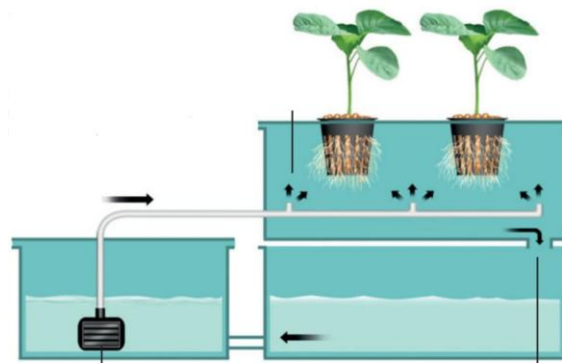
Pada perkembangannya, sistem NFT dimodifikasi menjadi sistem *Deep Flow Technique* (DFT). Secara garis besar prinsip kerja sistem DFT sama dengan sistem

NFT, hanya saja aliran nutrisi pada sistem DFT lebih tebal seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 2.11** dibandingkan dengan aliran air pada NFT, yaitu $\frac{1}{2}$ - 1 inci saja. Hal ini dapat terjadi karena pada sistem terdapat ‘penghalang’ atau pembatas aliran air pada pipa atau talang air sehingga tercipta genangan air. Sistem ini memiliki keunggulan dibandingkan NFT, karena tanaman akan tetap memperoleh nutrisi dari genangan air di instalasi ketika mati listrik (Isnain, 2020).



Gambar 2.11 Aliran nutrisi pada sistem DFT (Syariefa dkk., 2014)

Sistem hidroponik lain yang umum digunakan yaitu aeroponik. Sistem ini bekerja dengan cara menyemprotkan (*spray*) nutrisi ke akar tanaman dalam bentuk kabut yang sangat kecil molekulnya agar mudah menempel dan diserap akar tanaman (Isnain, 2020). Hidroponik sistem aeroponik ditunjukkan pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2.12 Model Aeroponik (Syariefa dkk., 2014)

Vertikultur merupakan suatu pengembangan dari sistem hidroponik yang memanfaatkan ruang secara vertikal untuk meningkatkan kapasitas produksi (Touliatos dkk., 2016). Istilah vertikultur berasal dari dua kata dalam bahasa Inggris, yaitu “*vertical*” yang berarti tegak lurus dan “*culture*” berarti pemeliharaan.

Sehingga, vertikultur dalam bidang pertanian dapat diartikan sebagai teknik pemeliharaan atau pembudidayaan tanaman dengan memanfaatkan pola vertikal atau tegak lurus (Santosa dkk., 2024).

Prinsip kerja dari hidroponik vertikultur sendiri seperti air mancur, dimana pompa di dalam tangki penampungan akan memompa larutan nutrisi melalui pipa kecil hingga ke bagian atas stuktur. Saat larutan sampai di puncak, maka larutan akan memancar dan berpencar ke bawah melalui sistem distribusi nutrisi sehingga larutan tersebut akan mengenai akar tanaman dan diserap untuk pertumbuhan tanaman (Apriyanti, 2015).

Menurut Putri, A, dkk. (2023), hidroponik dengan sistem vertikultur memiliki keunggulan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan lahan, dimana pada luas 1 m² dengan ketinggian tower 1,5 m dapat menanam 50-80 tanaman, sedangkan pada metode biasa hanya diperoleh 25-30 batang tanaman. Maka secara kuantitas, teknik bercocok tanam secara vertikultur lebih menguntungkan dari pada metode konvensional (Sukma, 2021). Contoh instalasi hidroponik dengan sistem vertikultur ditunjukkan pada **Gambar 2.13**.



Gambar 2.13 Contoh Hidroponik Vertikultur (Sukma, 2021)

Dalam konteks penelitian ini, sistem hidroponik vertikultur digunakan karena menghadirkan alternatif yang layak dengan mengoptimalkan efisiensi penggunaan ruang tanam, sehingga menghasilkan lebih banyak tanaman per satuan luas (Touliatos dkk., 2016) dan kemampuannya untuk diintegrasikan dengan sistem kontrol otomatis. Pengendalian pH menjadi lebih kritis dalam sistem vertikultur karena adanya gradien nutrisi dari atas ke bawah yang dapat mempengaruhi pH

larutan pada setiap tingkat strukturnya. Sistem kontrol otomatis memberikan keunggulan dalam pemberian takaran pH yang tepat sesuai dengan kebutuhan tanaman dan pengontrolan jarak jauh (Karoba dkk., 2015)

2.2.3 Parameter Kualitas Larutan Nutrisi Hidroponik

Salah satu parameter yang menentukan seberapa basa atau asam suatu larutan adalah pH-nya. Nilai ini berkisar antara 0 hingga 14, yang menggambarkan hubungan antara jumlah ion bebas H dan OH yang ada dalam larutan. Komposisi spesiasi unsur, dan bioavailabilitas larutan nutrisi semuanya dipengaruhi oleh perubahan pH. Menurut De Rijck dan Schrevens (1998), “spesiasi” mengacu pada distribusi unsur di antara berbagai bentuk kimia dan fisiknya, seperti pasangan ion, kompleks terlarut, ion bebas, kelat, fase padat dan gas, dan berbagai keadaan oksidasi. Setiap nutrisi bereaksi secara berbeda terhadap variasi pH larutan nutrisi. NH hanya bergabung dengan H untuk membentuk kompleks dalam larutan nutrisi. NH₃ sepenuhnya hadir sebagai NH₄⁺ dalam kisaran pH 2-7. Berdasarkan penelitiannya De Rijck dan Schrevens (1998), menemukan bahwa ketika pH naik di atas 7, maka konsentrasi NH₄⁺ akan turun dan konsentrasi NH₃ meningkat. Ketersediaan nutrisi tanaman ditentukan oleh pH karena, metode hidroponik memiliki kapasitas penyangga yang lebih kecil maka perlu untuk menyesuaikannya setiap hari.

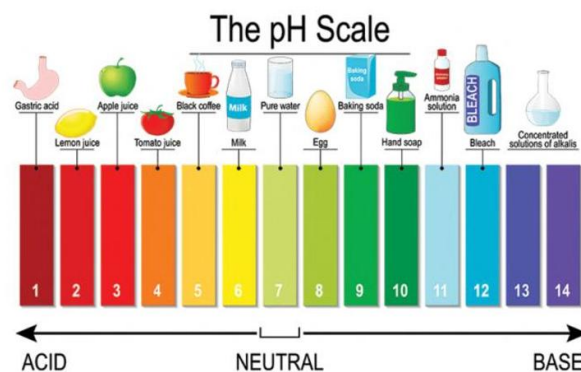
Nutrisi hidroponik terdiri dari dua kategori utama unsur hara yaitu: unsur hara makro dan mikro. Unsur hara makro meliputi nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), magnesium (Mg), sulfur (S), kalsium (Ca), yang dibutuhkan dalam jumlah relatif besar dibandingkan unsur hara mikro. Sedangkan unsur hara mikro seperti besi (Fe), boron (B), mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu), dan klorida (Cl⁻). Kisaran penggunaan beberapa unsur mikro dalam larutan nutrisi sendiri sangat sempit. Contohnya adalah boron, beberapa ppm menandai perbedaan antara kekurangan dan toksisitas. Diketahui tanaman dapat menyerap sejumlah nutrisi melalui daunnya. Oleh karena itu, semprotan sering digunakan untuk memperbaiki kekurangan unsur mikro (Schwarz, 2012).

Terdapat korelasi erat antara pengaruh pH larutan nutrisi dan kemampuan tanaman menyerap nutrisi. Apabila pH larutan tidak sesuai dengan kebutuhan maka, tanaman tidak dapat menyerap nutrisi dari larutan sehingga tanaman akan layu karena nutrisi makro dan mikro tidak masuk. Dengan $\text{pH} > 7,5$ akan mengurangi ketersediaan zat besi, magnesium, tembaga dan boron. Sedangkan, $\text{pH} < 6$ berdampak pada menurunnya daya larut terhadap asam pospat, kalsium, magnesium dan pH 3-5 di atas suhu $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ menyebabkan pertumbuhan dan penyebaran penyakit yang disebabkan oleh jamur (Syariefa dkk., 2014).

Selada membutuhkan kondisi lingkungan tumbuh yang spesifik untuk mencapai pertumbuhan dan produktivitas optimal. Syarat tumbuh ideal pada selada meliputi suhu kisaran $15 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, kelembaban udara sekitar $81 - 90\%$, paparan cahaya yang cukup dengan ketinggian tempat 500-2000 mdpl (Pracaya dan Kartika, 2016). Pada penelitiannya Wijaya dan Fajriani (2022), menemukan bahwa tanaman ini memerlukan nutrisi seimbang dengan konsentrasi larutan nutrisi. Dimana pada konsentrasi nutrisi 1000 ppm meningkatkan bobot segar pertanaman 9,1%. Jumlah daun 6,3% dan panjang akar 9,6% dibandingkan konsentrasi nutrisi 750 ppm.

2.2.4 Sensor pH

pH atau *potensial of hidrogen* adalah suatu parameter yang digunakan untuk mengetahui derajat keasaman atau alkalinitas suatu cairan. Nilai pH sendiri berkisar antara 1 sampai 14. pH normal memiliki nilai sebesar 7, sedangkan di bawah angka tersebut tergolong asam dan di atas angka tersebut tergolong basa, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.14**.



Gambar 2.14 Skala Keasaman (Widiasmadi, 2023)

Ion hidrogen (H^+) dan hidroksida (OH^-) yang terkandung di dalam air konsentrasinya sangat kecil sehingga agar memudahkan penulisan digunakan besaran lain. Kimiawan Denmark Soren Peder lauritz Sorensen (1868-1939), mengusulkan konsep pH untuk memudahkan dalam pengukuran konsenttrasi ion H^+ dan perubahannya dalam suatu larutan. Menurut Sorensen, pH merupakan fungsi logaritma negatif dari konsentrasi ion H^+ dalam suatu larutan:

$$pH = -\log[OH^-] = \log \frac{1}{[H^+]} \quad (2.1)$$

Dengan menggunakan analogi yang sama, maka nilai konsentrasi ion OH^- dalam larutan:

$$pOH = -\log[OH^-] = \log \frac{1}{[OH^-]} \quad (2.2)$$

(Sari, 2024)

Penurunan dan peningkatan pH larutan nutrisi dapat dilakukan melalui penambahan larutan asam (HNO_3 , H_3PO_4 , atau H_2SO_4) atau penambahan larutan basa (KOH) ke larutan nutrisi (Pancawati dan Yulianto, 2016). Sedangkan untuk mengetahui derajat keasaman dari suatu larutan dapat dilakukan dengan menggunakan kertas lakmus, dimana kertas lakmus akan dicelupkan ke dalam larutan sampel dan akan berubah warna sesuai dengan kadar pH dari larutan sampel (Pratama dkk., 2022).

Selain menggunakan kertas lakmus, dalam pengukuran derajat keasaman suatu larutan juga dapat dilakukan menggunakan alat ukur pH meter, yaitu sebuah alat elektronik yang digunakan untuk mengukur pH (derajat keasaman atau kebasaan) dari suatu larutan. Alat ukur ini biasanya terdiri dari probe pengukuran yang terhubung pada suatu alat elektronik yang mengukur dan menampilkan nilai pH (Barus dkk., 2018).

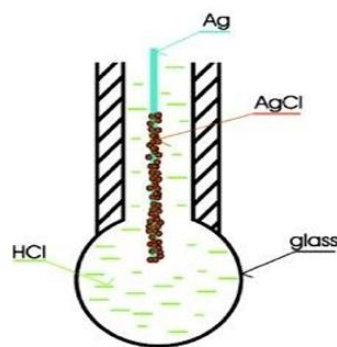
Pada penelitian ini menggunakan sensor pH 4502C yang terdiri dari modul pH 4502C dan probe elektroda seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.15**. Modul pH meter sensor, merupakan modul yang berfungsi untuk mendeteksi tingkat pH air yang dimana outputnya berupa tegangan analog. Modul ini memiliki range output tegangan analog sebesar 0 - 3V DC dengan inputan *power supply* 3,3 – 5,5 V DC. Sehingga untuk mengonversi nilai pembacaan harus dimasukan ke dalam persamaan fungsi transfer di kode program yang dibuat (Saputra, 2024). Pengukur

pH bekerja dengan cara mengukur perbedaan potensial listrik antara elektroda pH dan elektroda referensi. Elektroda pH berada pada bagian ujung yang memiliki bentuk bulat yang berfungsi sebagai tempat terjadinya pertukaran ion positif (H^+). Sedangkan elektroda referensi (Widiasmadi, 2023).



Gambar 2.15 Sensor pH 4502C (Dokumentasi Pribadi)

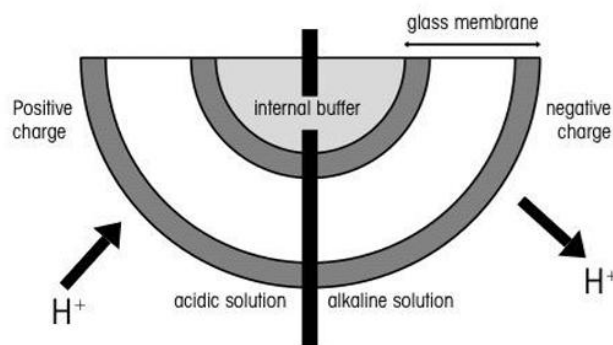
Prinsip kerja utama dari sensor pH ini berada pada bagian *probe* dengan material yang terbuat dari elektroda kaca yaitu sebuah lapisan kaca dengan tebal 0,1 mm yang berbentuk bulat (*bulb*), dimana pada elektroda kaca tersebut terdapat larutan HCl yang berada di bagian ujung *probe*. Di dalam Larutan HCl tersebut terendam sebuah kawat elektroda panjang berbahan perak yang pada permukaannya terbentuk senyawa setimbang AgCl. Skema sistem pada elektroda kaca ditunjukkan pada **Gambar 2.16**. Elektroda sensor pada sensor pH ini terbentuk dari bahan lapisan kaca yang sensitif dengan impedansi yang kecil, oleh karena itu dapat menghasilkan suatu pembacaan dan penilaian yang stabil (Pratama dkk., 2022).



Gambar 2.16 Skema Sistem Elektroda Kaca (Desmira dkk., 2018)

Permukaan *bulb* kaca merupakan inti dari sensor pH yang memiliki kemampuan untuk bertukar ion positif (H^+) dengan larutan terukur seperti yang ditunjukkan

pada **Gambar 2.17**. Membran kaca ini bukanlah kaca biasa, melainkan kaca khusus yang telah dimodifikasi komposisinya agar memiliki sensitivitas tinggi terhadap ion H^+ , kaca ini tersusun dari silikia (SiO_2) sebagai komponen utamanya. Pada saat permukaan *bulb* kaca sensor pH ini mengenai suatu larutan, permukaan ini bereaksi dengan air membentuk lapisan tipis yang disebut lapisan gel. Reaksi yang terjadi adalah struktur kaca ($Si-O-Si$) bertemu dengan air (H_2O) dan berubah menjadi $Si-OH$ yang disebut gugus silanol. Reaksi ini menghasilkan lapisan gel setebal 10-100 nanometer dengan struktur yang lebih terbuka dibandingkan *bulb* kaca dan mengandung gugus silanol yang bersifat amfoter, artinya dapat berperan sebagai donor maupun akseptor proton tergantung pada kondisi larutan. Ketika larutan bersifat asam (banyak ion H^+), gugus silanol akan menangkap ion H^+ dan berubah menjadi $Si-OH_2^+$. Sebaliknya, ketika larutan bersifat basa (sedikit ion H^+), gugus silanol akan melepaskan ion H^+ dan berubah menjadi $Si-O^-$.



Gambar 2.17 Ilustrasi Proses Pertukaran Ion H^+ (Desmira dkk., 2018)

Proses pertukaran ion H^+ pada *bulb* merupakan mekanisme *electrochemical* yang terjadi pada saat permukaan *bulb* kaca berinteraksi dengan suatu larutan. Dimana reaksi hidrasi $SiO + H_3O^+ \rightarrow HSiO^+ + H_2O$ membentuk suatu lapisan “gel” pada permukaan kaca seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.17** yang berfungsi sebagai tempat pertukaran ion. Jika larutan bersifat asam, ion H^+ akan terikat ke permukaan *bulb* sehingga terjadi akumulasi muatan positif pada lapisan gel dan menghasilkan potensial positif. Sedangkan pada larutan yang bersifat basa, ion H^+ dari lapisan gel akan terlepas ke larutan sehingga muatan negatif terakumulasi pada dinding *bulb* dan menghasilkan potensial negatif. Keseimbangan pertukaran ion yang terjadi antara sisi dalam dan luar *bulb* kaca ini menciptakan beda potensial yang berbanding lurus dengan perbedaan konsentrasi ion H_3O^+ antara larutan sampel

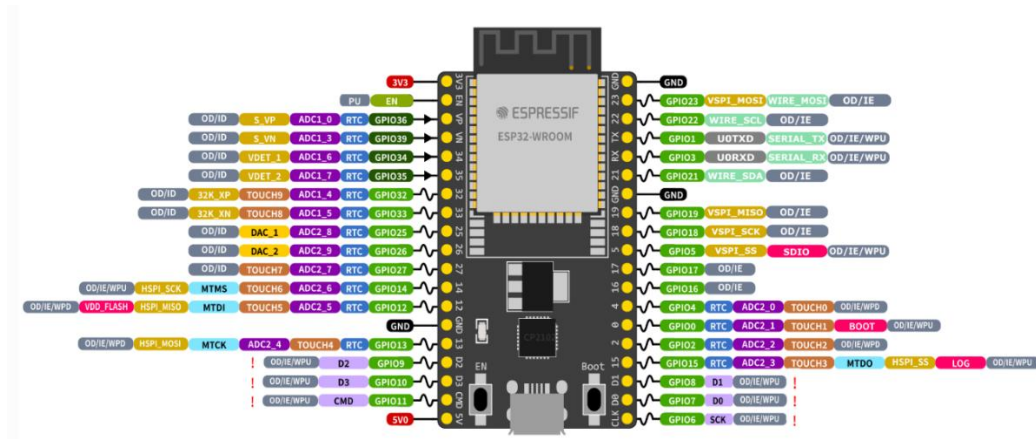
dan larutan buffer internal. Hal ini memungkinkan *bulb* kaca berfungsi sebagai transduser *electrochemical* yang mengubah aktivitas kimia (kontrasi H^+) menjadi sinyal listrik (beda potensial) yang dapat diukur dan diinterpretasi sebagai nilai pH untuk mengetahui tingkat keasaman atau kebasaan larutan (Desmira dkk., 2018)

2.2.5 Espressif Systems Platform 32-bit (ESP 32)

Awalnya, chip ESP dengan modul pendukung pengontrol jaringan IEEE 802.11 b/g/n digunakan sebagai pengontrol berbiaya rendah kedua untuk menyediakan kemampuan Wi-Fi dan akses jaringan untuk pengontrolan lain melalui port serial. Namun, semakin banyak proyek mulai menggunakan daya pemrosesan cadangan dari chip ini untuk menyediakan kontrol I/O umum, sehingga dalam banyak kasus tidak memerlukan prosesor kontrol tambahan.

Hal ini mendorong Espressif, produsen chip tersebut, untuk mengeluarkan chip generasi berikutnya yaitu ESP32, yang berisi modul fungsional tambahan dan inti pemrosesan yang lebih bertenaga. Chip ESP32 sangat kompleks dan tidak dapat digunakan sendiri dengan mudah, sehingga tersedia beberapa papan pengembang yang menggabungkan chip ESP32 dan perangkat keras terkait untuk menyederhanakan tugas pengembangan proyek seperti, NodeMCU-32, ESP32 Dev-KitC, dan lainnya (Senouci dkk., 2021).

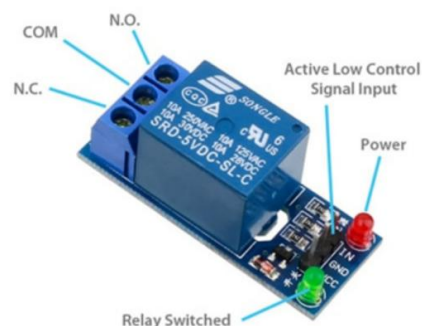
Pada penelitian ini menggunakan ESP32 sebagai pusat pengontrolan sistem yang dibuat. ESP32 merupakan penerus dari ESP8266 yang memberikan beberapa perbaikan di semua lini. Mikrokontroler ini tidak hanya memiliki dukungan konektivitas Wifi, namun juga *Bluetooth Low Energy* (BLE) yang membuat ESP32 menjadi lebih serbaguna. CPU yang dimiliki ESP32 hampir mirip dengan yang dimiliki ESP8266 yaitu mikroprosesor *dual-core* Tensilica Xtensa LX6 dengan desain 32-bit, namun pada ESP32 memiliki kelebihan karena terdapat inti ganda. ESP32 juga memiliki 36 pin GPIO seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.18**, ROM 128KB dan SRAM 416K, juga *Flash Memory* yang berguna untuk menyimpan program dan data sebesar 64MB (Prafanto dkk., 2021).



Gambar 2.18 Pin Layout ESP32 (*Datasheet ESP32*, 2023)

2.2.6 Modul Relay

Modul relay tersusun dari satu atau beberapa relay yang berperan sebagai komponen inti. Relay merupakan sakelar yang dioperasikan secara elektrik dengan menggunakan elektromagnet untuk membuka atau menutup kontaknya secara mekanis. Hal tersebut dikendalikan dari rangkaian driver elektronik berupa transistor. Relay memanfaatkan teknologi elektromagnet untuk memindahkan saklar dari posisi *Normally Close* (NC) ke posisi *Normally Open* (NO) (Budijanto dkk., 2021). Relay ini digunakan untuk mengendalikan perangkat berdaya tinggi atau bertegangan tinggi, seperti motor, lampu, pemanas, atau peralatan dengan menggunakan sinyal kontrol berdaya rendah. Modul relay biasanya memiliki input kontrol yang memungkinkan koneksi ke mikrokontroler, arduino, atau sirkuit digital lainnya. Input ini biasanya mencangkup pin sinyal dan pin *ground* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.19**, yang menerima sinyal kontrol untuk mengaktifkan atau menonaktifkan relay (Mamta, 2023).



Gambar 2.19 Modul Relay (*Datasheet Relay Module*, 2021)

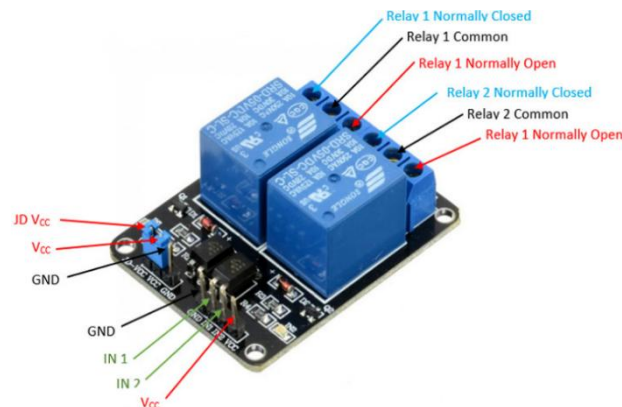
Relay memiliki beberapa terminal utama berupa, *Normally Closed* (N.C.) yang akan tertutup secara default saat relay tidak aktif, *Normally Open* (N.O.) yang akan terbuka secara default saat relay tidak aktif, dan *Common* (COM) yaitu terminal umum yang terhubung ke NC atau NO tergantung kondisi relay. Pada modul relay terdapat dua macam pemicu yaitu, *low level trigger* dimana relay akan bekerja (aktif) jika diberi kondisi *LOW* dan *high level trigger* yang akan bekerja jika diberi kondisi *HIGH* (Hangkawidjaja, 2023). Selain itu, terdapat pin VCC sebagai masukan daya bagi relay sebesar 5V, pin GND sebagai *ground*, dan pin IN1 dan IN2 sebagai masukan dari mikrokontroler (Adam dkk., 2024).

Terdapat banyak jenis relay yang tersedia di pasaran yang digunakan untuk berbagai aplikasi (IoT, industri, otomotif, dll). Beberapa di antaranya adalah relay elektromagnetik, relay kait, relay non-kait, relay *solid-state*, relay *reed*, relay sinyal kecil, relay tunda waktu, relay termal, relay frekuensi, relay terpolarisasi, dan lainnya. Masing-masing dari jenis relay tersebut memiliki jenis mekanisme kerja yang berbeda (Vasudevan dkk., 2022).

Relay memegang peranan penting dalam mengaktifkan dan mematikan pompa yang akan mengalirkan larutan pH *Up* dan pH *Down* pada sistem kontrol pH larutan. Relay akan bertindak sebagai antarmuka elektromagnetik yang menghubungkan mikrokontroler dengan pompa. Secara sederhana relay adalah sebuah perangkat seperti saklar yang memungkinkan perangkat arus rendah seperti mikrokontroler ESP-32 untuk mengendalikan perangkat dengan kebutuhan arus yang tinggi, seperti pompa air. Relay bekerja dengan menggunakan saklar elektromagnetik untuk mengalihkan dan menyediakan isolasi listrik antara pompa air dan catu daya. Modul relay bekerja dari sinyal 12V dan menggunakan transistor untuk menghidupkan relay sehingga dapat langsung dihubungkan ke pin mikrokontroler. Relay digunakan untuk menghubungkan subsistem penginderaan dengan unit mikrokontroler. Modul relay dapat mengontrol arus beban tinggi hingga 250V, 10A (Mihovska dan Raut, 2021).

Dalam sistem kontrol pH larutan pada penelitian ini menggunakan relay *2 channel* yang ditunjukkan pada **Gambar 2.20**, sehingga memungkinkan pengontrolan dua pompa secara independen. Modul ini berperilaku mirip dengan kontrol saluran

ganda (Singh dkk., 2022). Modul relay 2 *channel* juga bekerja seperti saklar yang berfungsi untuk memutus dan menyambungkan aliran listrik (James dkk., 2019).

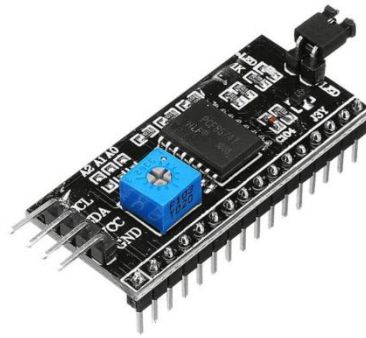


Gambar 2.20 Modul Relay 2 *Channel* (*Datasheet Relay Module*, 2021)

2.2.7 Liquid Crystal Display (LCD)

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan sebuah alat yang digunakan untuk menampilkan suatu ukuran besaran atau angka, sehingga dapat dilihat melalui tampilan layar kristalnya (Suhartono dkk., 2021). Setiap karakter biasanya terdiri dari matriks titik 5×8 , yang memungkinkan tampilan huruf, angka, dan simbol dasar. Dimana layarnya dikontrol oleh sirkuit antarmuka yang berkomunikasi dengan LCD melalui serangkaian sinyal listrik. LCD memiliki ukuran yang beragam seperti 16×2 , 16×4 , 20×2 , dan 20×4 . Kontras layar LCD dikontrol dengan potensiometer $10\text{ k}\Omega$. LCD ini dapat dilengkapi dengan modul I2C atau dikenal juga sebagai *Inter Integrated Circuit* (IIC) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.21**. Komponen ini digunakan untuk komunikasi antara mikrokontroler dengan perangkat lain seperti LCD (Cameron, 2019).

I2C merupakan standar komunikasi serial dua arah menggunakan dua saluran yang didesain khusus untuk mengirim atau menerima data. I2C pertama dikembangkan oleh Philips pada tahun 1982. Dengan modul pelengkap tersebut, penggunaan LCD hanya memerlukan 2 pin pengontrolan pada pengendali mikro yaitu SDA (*Serial Data*) dan SCL (*Serial Clock*) (Susanthi dan Andrianto, 2024).



Gambar 2.21 Modul I2C (*Datasheet I2C 16×2 LCD, 2021*)

Pada penelitian ini menggunakan LCD dengan 16×2 karakter (16 karakter dalam 2 baris) yang akan menampilkan nilai pH yang terdeteksi oleh sensor secara *real-time*. LCD jenis ini memiliki 16 nomor pin seperti pada **Gambar 2.22** dengan dimensi lebar 80 mm dan tinggi 36 mm, serta jangkauan tegangan operasi yang digunakan sebesar +3VDC sampai +5VDC (Khakim, 2023). Tampilan LCD 16×2 dapat dilihat pada **Gambar 2.23**.



Gambar 2.22 Pin pada LCD 16×2 (*Datasheet I2C 16×2 LCD, 2021*)

Beberapa pin *out* umum untuk LCD karakter 16×2 yaitu, VSS (GND) sebagai pin yang terhubung dengan ground mikrokontroler, VDD sebagai pin yang terhubung dengan VCC mikrokontroler, VO (Kontras) sebagai pin yang berfungsi untuk menyesuaikan kontras tampilan menggunakan resistor variabel. RS (*Register Select*) sebagai pin untuk register data. RW (*Read/Write*) yang berfungsi untuk memilih antara membaca (*HIGH*) atau read (*LOW*) dari data ke LCD, E (Aktifkan) yang akan mengaktifkan LCD untuk membaca data atau perintah pada tepi naik sinyal, D0 sampai D7 sebagai pin data yang digunakan untuk mengirim data atau perintah ke LCD dalam konfigurasi mode 4-bit, biasanya hanya D4 hingga D7 yang

digunakan, A (*Anode*) yang akan dihubungkan ke mikrokontroler VCC, dan K (*Katode*) yang akan terhubung ke *ground* mikrokontroler (Agustin dkk., 2022).



Gambar 2.23 LCD 16×2 (Dokumentasi Pribadi)

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Perancangan dan pembuatan alat serta pengambilan data dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Dasar dan Instrumentasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung. Penelitian ini dilakukan sejak bulan Desember 2024.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

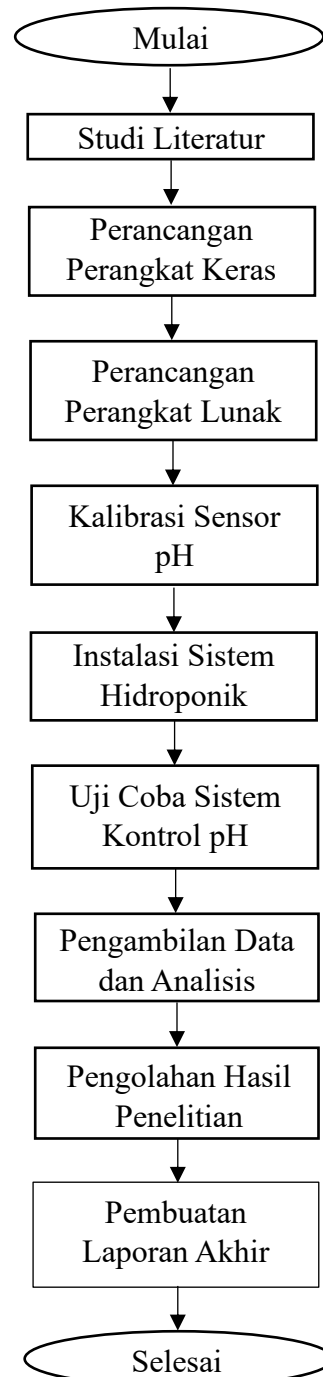
Tabel 3.1 Alat dan Bahan Penelitian

No	Nama Alat	Fungsi
1.	Pipa PVC 4 inch	Digunakan sebagai tempat utama untuk menanam tanaman secara vertikal.
2.	Pipa PVC 1 inch	Digunakan sebagai lubang tanam pada instalasi hidroponik vertikultur.
3.	Pipa EC ½ inch	Digunakan sebagai pipa yang menyalurkan larutan nutrisi dari pompa ke puncak tower.
4.	<i>Aquarium Submersible Pump</i>	Digunakan untuk mendorong larutan nutrisi dari penampungan ke seluruh instalasi hidroponik.
5.	Pompa Dosing Peristaltik	Digunakan untuk mengalirkan larutan pH <i>Up</i> dan pH <i>Down</i> sesuai dengan perintah dari mikrokontroler.
6.	Wadah Larutan Nutrisi	Digunakan sebagai wadah penampung utama larutan nutrisi hidroponik.
7.	Sensor pH 4502C	Digunakan untuk pengukur kadar pH pada larutan nutrisi hidroponik secara <i>real-time</i> .

No.	Alat dan Bahan	Fungsi
8.	ESP-32	Digunakan sebagai pusat kontrol yang penerima data dari sensor, mengolahnya, dan memberikan perintah untuk menstabilkan pH.
9.	Modul Relay 2 Channel	Digunakan sebagai saklar elektronik yang mengendalikan pompa.
10.	Adaptor 5V 2A	Digunakan sebagai sumber tegangan untuk modul relay 2 channel.
11.	Adaptor 5V 3A	Digunakan sebagai sumber tegangan untuk ESP32.
12.	Adaptor 12V 2A	Digunakan sebagai sumber tegangan untuk pompa.
13.	LCD 16×2	Digunakan untuk menampilkan hasil pembacaan sensor pH.
14.	Kabel Data Micro USB	Digunakan untuk mengunggah program (<i>firmware</i>) ke mikrokontroler dari komputer.
15.	PCB Double Layer	Digunakan untuk menghubungkan rangkaian elektronik.
16.	Jack DC	Digunakan untuk sebagai konektor antara adaptor dengan komponen.
17.	pH Meter	Untuk mengukur nilai pH larutan dan memverifikasi akurasi sensor pH dan membantu kalibrasi ulang sensor jika terjadi penyimpangan.
18.	Selang Silikon	Digunakan untuk mengaliri larutan pH <i>Up</i> dan pH <i>Down</i> .
19.	Larutan pH <i>Up</i> dan pH <i>Down</i>	Sebagai larutan yang akan menstabilkan nilai pH.
20.	Rockwool	Sebagai media tanam yang digunakan saat tahap penyemaian.
21.	Benih Selada	Komponen utama yang akan di budidayakan dalam penelitian ini.
22.	Nutrisi AB Mix	Memberikan unsur hara yang dibutuhkan oleh selada.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian secara umum dapat ditunjukkan dalam diagram alir penelitian pada **Gambar 3.1**.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

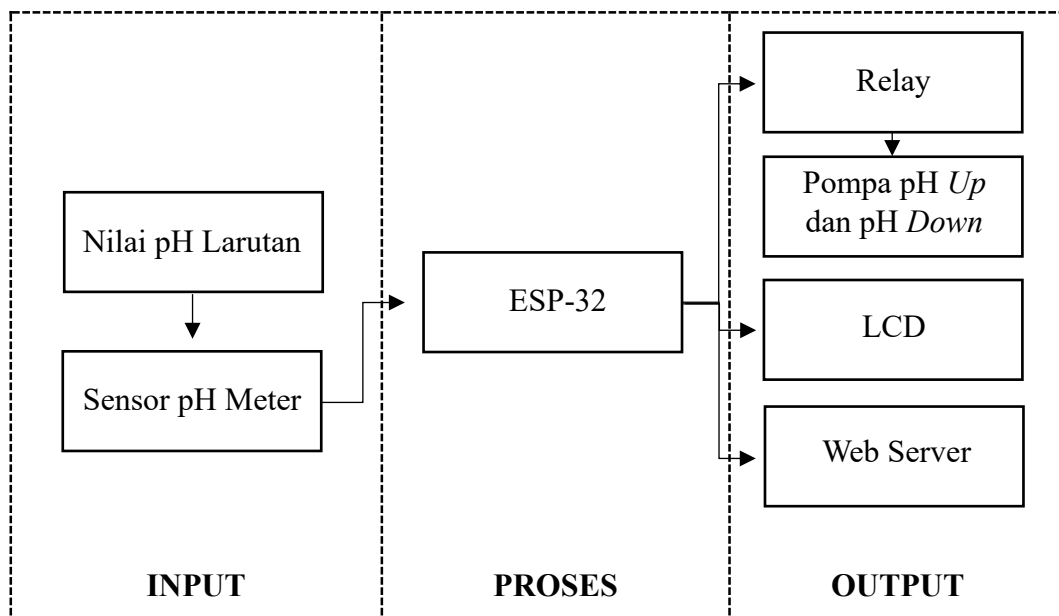
Prosedur penelitian yang ditunjukkan melalui digram alir pada **Gambar 3.1** dapat dijelaskan secara lebih rinci yang mencakup tahapan kerja keseluruhan sistem sebagai berikut.

3.3.1 Studi Literatur

Studi Literatur dilakukan untuk mengetahui konsep-konsep dasar yang menunjang penelitian ini. Melibatkan pencarian dan telaah secara menyeluruh terhadap berbagai referensi dan literatur ilmiah. Literatur yang dikaji pada penelitian ini mencakup pembahasan mengenai budidaya hidroponik khususnya hidroponik vertikultur, sistem kontrol otomatis, dan sensor pH meter.

3.3.2 Perancangan Perangkat Keras

Desain atau perancangan sistem kontrol pH larutan terdiri dari dua tahap yaitu perancangan perangkat keras dan perancangan perangkat lunak. Perancangan perangkat keras ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Diagram Blok Penelitian

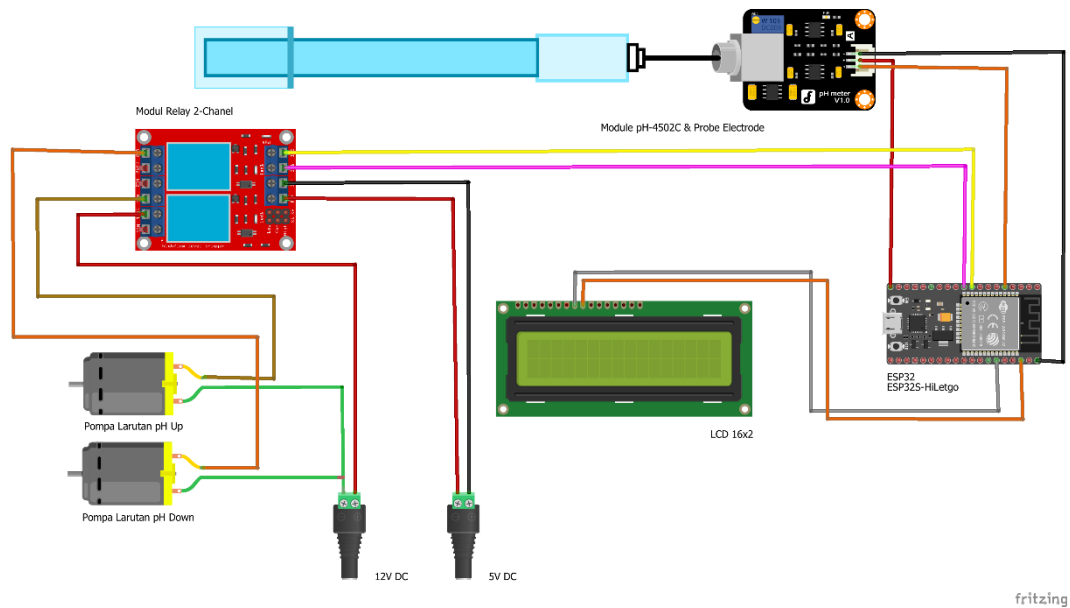
Perancangan perangkat keras sistem kontrol pH larutan secara garis besar terdiri dari tiga tahapan yaitu input, proses, dan output. Sistem ini dimulai dari sensor pH meter yang mengukur nilai pH, lalu data tersebut diterima oleh modul

mikrokontroler ESP32. ESP32 akan memproses data pH dan mengirimkannya ke perangkat. Dalam ESP32 data berupa nilai pH yang dikirimkan dari sensor akan diolah, dimana data tersebut akan di analisis. Dari hasil analisis tersebut ESP32 akan memberikan perintah kepada relay yang nantinya mengaktifkan atau menonaktifkan aktuator berupa pompa, sehingga pompa dapat mengalirkan larutan pH *Up* atau pH *Down* dan mengembalikan nilai pH sesuai dengan rentang nilai yang ditetapkan. Modul relay pada penelitian ini digunakan sebagai mekanisme saklar dalam sistem kontrol pengendali pH larutan otomatis. Modul ini akan menghidupkan atau mematikan pompa, tergantung pada sinyal yang diterima.

Sakelar relay digunakan karena ESP-32 tidak dapat mengendalikan perangkat bertegangan tinggi secara langsung. ESP-32 digunakan untuk mengendalikan relay, yang selanjutnya akan mengendalikan pompa yang akan mengalirkan larutan pH *Up* dan pH *Down* yang terhubung ke catu daya eksternal 12V. ESP-32 diprogram untuk mengaktifkan pompa pH *Up* saat nilai pH < 6 dan mengaktifkan pompa larutan pH *Down* saat nilai pH > 7. Jika salah satu dari dua kondisi tersebut tidak terpenuhi, ESP-32 diprogram untuk mematikan relay pada ke dua channel.

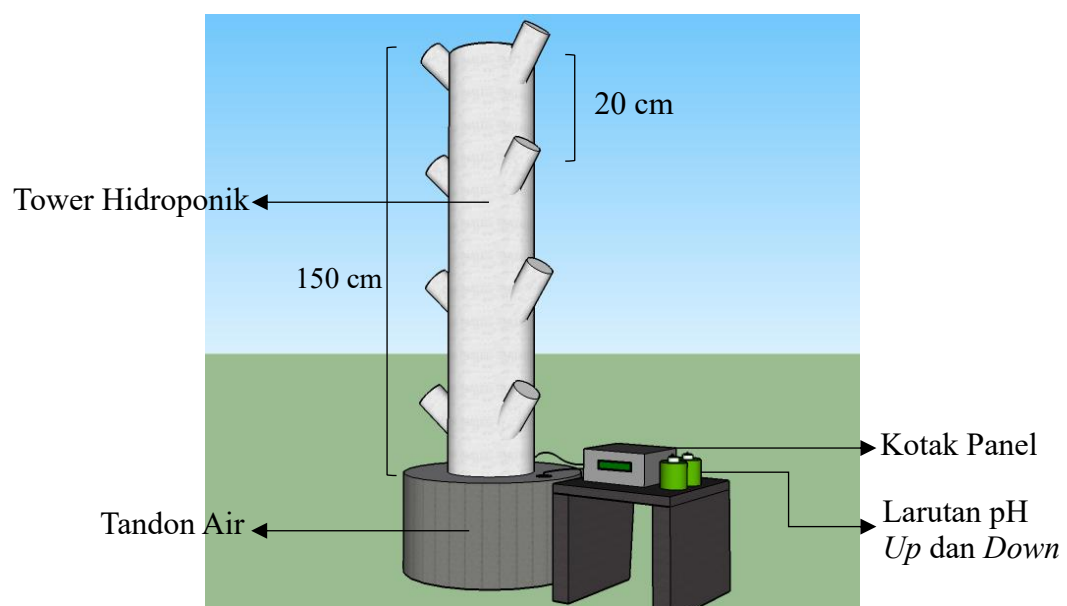
Selain aktuator, output dari sistem ini juga berupa tampilan LCD dan web server yang menampilkan hasil pembacaan sensor secara *real time* sehingga pengguna dapat memantau dan mengontrol proses pengaturan pH secara jarak jauh melalui antarmuka web. Sehingga, keseluruhan sistem ini bekerja secara terintegrasi untuk mengelola dan menjaga nilai pH larutan agar tetap stabil.

Setting port ESP32 pada sistem ini berupa, pompa dosing akan dirangkai dengan modul relay melalui pin NO dan COM. Selanjutnya pin IN1 dan IN2 modul relay dihubungkan dengan pin GPIO25 dan GPIO26 pada ESP32. Konfigurasi pin sensor pH dengan ESP32 terletak pada pin VCC yang dihubungkan dengan 5V ESP32, pin GND sensor dihubungkan dengan pin GND ESP32, dan pin Vout sensor pH dihubungkan dengan pin GPIO34 ESP32. Kemudian untuk pin SDA dan SCL pada LCD 16×2 dihubungkan dengan pin GPIO21 dan GPIO22 ESP32. Skematik rangkaian alat secara keseluruhan pada sistem kontrol pH larutan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



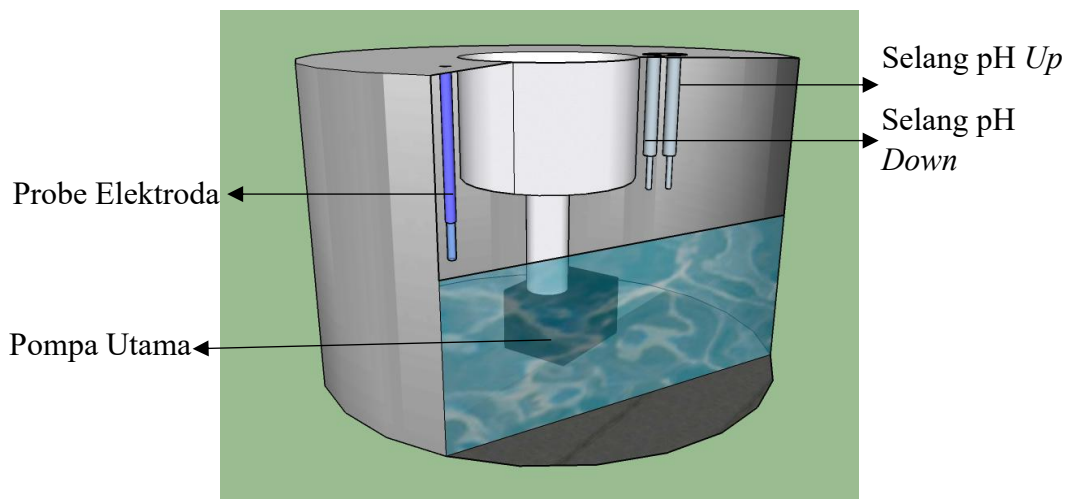
Gambar 3.3 Skematik Rangkaian Keseluruhan Sistem

Prototipe yang dirancang pada penelitian ini terdiri dari satu tower utama dengan tinggi 1,2 m. Dimana tanaman selada akan ditanam pada dinding tower dengan jarak tanam 20 cm arah vertikal. Sepanjang dasar sampai puncak tower terdapat pipa yang akan menyalurkan air nutrisi ke tanaman. Dasar tower dilengkapi dengan tandon air yang berisi larutan nutrisi untuk tanaman selada. Perancangan perangkat keras pada sistem ini secara garis besar meliputi tower hidroponik, tandon air, dan kotak panel seperti pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Instalasi Hidroponik Vertikultur

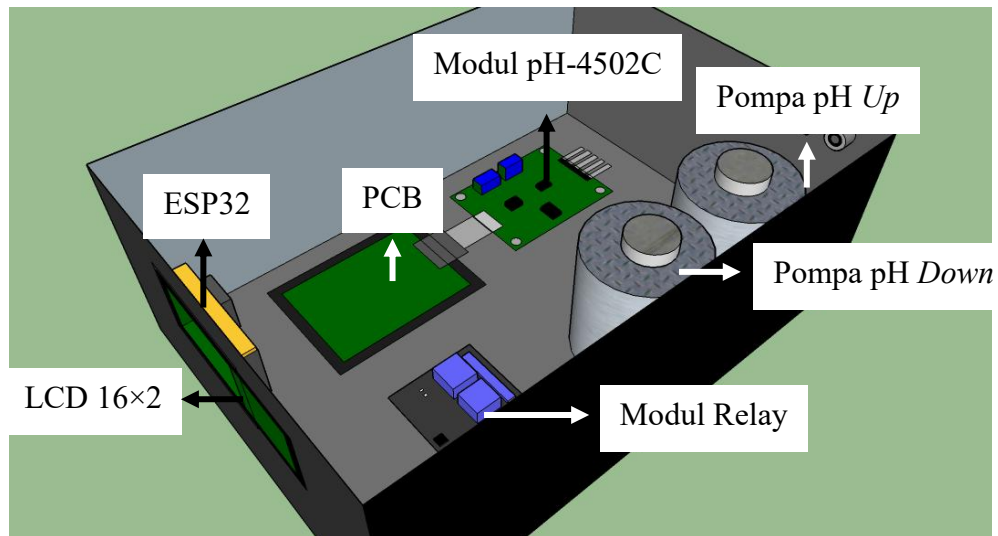
Bagian dalam tandon air terdapat pompa utama yang berfungsi untuk menaikkan larutan nutrisi dari wadah ke puncak tower hidroponik, sehingga larutan tersebut dapat menghasilkan percikan dan mengenai setiap akar tanaman yang berada di lubang tanam pada instalasi hidroponik vertikultur. Kemudian *probe* elektroda sensor pH meter akan diletakkan di dalam tandon air untuk membaca nilai pH larutan. Posisi *probe* elektroda sensor dapat ditunjukkan pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Posisi Sensor Pada Sistem

Pada wadah penampung larutan nutrisi juga dilengkapi dengan selang larutan pH *Up* dan pH *Down* yang terhubung dengan pompa dosing sebagai pengendali kadar nilai pH pada sistem ini. Selang yang digunakan terbuat dari bahan silikon dengan diameter selang yang disesuaikan dengan output pompa dosing yaitu sebesar 2×4 mm.

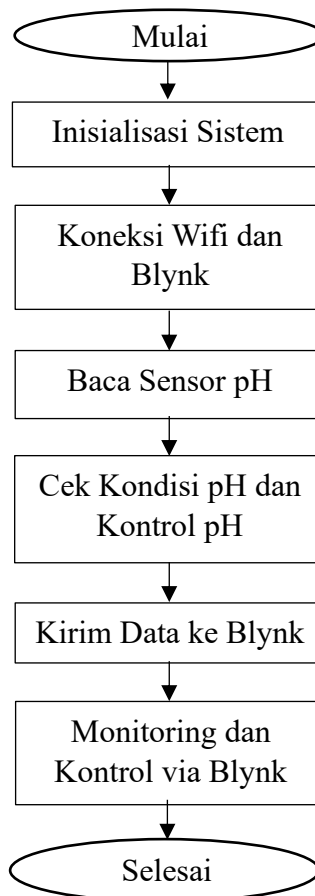
Probe elektroda dalam tandon air akan terhubung dengan modul 4502C sensor pH yang berada di dalam kotak panel. Kotak panel yang digunakan berukuran 21,5 × 14,5 × 8,5 cm yang di dalamnya terdapat rangkaian ESP32, modul pH meter 4502C, modul relay 2 channel, dua buah pompa dosing, serta PCB *Double Layers*. Pada bagian luar kotak dilengkapi dengan LCD yang akan menampilkan nilai pH dari pembacaan sensor. Peletakan komponen-komponen yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Desain Rangkaian Sistem

3.3.3 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dalam sistem ini di tunjukkan melalui diagram alir pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Diagram Alir Perancangan Perangkat Lunak

Berdasarkan diagram alir pada **Gambar 3.7**, perancangan perangkat lunak pada sistem ini terdiri dari beberapa tahapan utama sebagai berikut.

1. Inisialisasi sistem

Tahap awal dalam persiapan sistem kontrol pH larutan dilakukan dengan mempersiapkan seluruh alat dan bahan yang dibutuhkan. Selanjutnya, melakukan konfigurasi awal perangkat dan memastikan semua komponen siap.

2. Koneksi Wifi dan Blynk

Tahap ini dilakukan dengan membuat koneksi internet menggunakan Wifi dan melakukan autentikasi ke platform Blynk. Secara sederhana, tahap ini dilakukan untuk membangun komunikasi dengan server IoT.

3. Membaca Sensor

Sistem akan membaca nilai pH larutan melalui probe sensor pH yang berada di dalam tandon larutan. Kemudian mentransformasi data analog menjadi nilai pH yang terukur. Data tersebut diolah dan dianalisis oleh ESP32 yang selanjutnya menentukan aksi yang harus diambil berdasarkan kondisi pH yang terdeteksi.

4. Kirim Data ke Blynk

Pada tahap ini, data hasil pembacaan sensor akan dikirimkan ke Blynk sehingga dapat menampilkan informasi secara *real-time*.

5. Monitoring dan Kontrol via Blynk

Selain digunakan untuk memonitoring hasil pembacaan sensor secara *real-time*, sistem ini memanfaatkan aplikasi Blynk untuk memberikan opsi kontrol melalui antarmuka Blynk. Sehingga pengguna dapat mengaktifkan dan menonaktifkan sistem sesuai kebutuhan.

3.3.4 Kalibrasi Sensor pH

Kalibrasi sensor dilakukan untuk mengetahui keakuratan dari pembacaan sensor terhadap objek dan mengukur error yang dihasilkan dari data *output*. Sensor pH akan dikalibrasi menggunakan dua belas sampel larutan dengan kadar pH yang berbeda-beda. Sampel larutan kalibrasi ini dibuat menggunakan metode pengenceran bertahap untuk memastikan akurasi dan konsistensi nilai pH pada setiap tingkatan. Metode ini dipilih karena dapat menghasilkan larutan dengan gradasi pH yang teratur dan dapat direproduksi dengan mudah.

Tahap pertama dalam prosedur ini adalah pembuatan larutan stok yang akan menjadi dasar untuk semua pengenceran selanjutnya. Sebelum proses pelarutan dilakukan penimbangan terhadap asam sitrat monohidrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dan natrium hidroksida (NaOH) yang ditunjukkan seperti pada **Gambar 3.8**. Larutan stok asam dibuat dengan melarutkan 2,1 g asam sitrat monohidrat ke dalam 100 mL air aquadest, yang akan menghasilkan larutan dengan pH sekitar 2. Sementara itu, larutan stok basa dibuat dengan melarutkan 0,4 g natrium hidroksida (NaOH) ke dalam 100 mL air aquadest, yang akan menghasilkan larutan dengan pH sekitar 13.



Gambar 3.8 Proses Penimbangan

Setelah larutan stok terbentuk, dilakukan pengenceran bertahap untuk menghasilkan larutan dengan pH yang lebih rendah dari larutan stok asam. Larutan pH 3 dibuat dengan mengambil 30 mL larutan stok pH 2 dan menambahkan 70 mL air aquadest, kemudian diaduk hingga homogen. Selanjutnya, larutan pH 4 dibuat dengan mengambil 10 mL larutan pH 3 dan menambahkan 90 mL air aquadest. Prosedur yang sama dilakukan untuk membuat larutan pH 5 dan 6, yaitu dengan mengambil 10 mL larutan pH sebelumnya dan menambahkan 90 mL air aquadest.

Untuk rentang pH basa, pengenceran dilakukan secara bertahap mulai dari larutan stok pH 13. Larutan pH 12 dibuat dengan mengambil 10 mL larutan stok pH 13 dan menambahkan 90 mL air aquadest. Larutan pH 11 dibuat dengan mengambil 10 mL larutan pH 12 dan menambahkan 90 mL air aquadest. Prosedur ini dilanjutkan secara berurutan untuk membuat larutan pH 10, pH 9, dan pH 8, dimana masing-masing dibuat dengan mengambil 10 mL dari larutan pH sebelumnya dan menambahkan 90 mL air aquadest. Setiap pengenceran menggunakan rasio 1:10

yang konsisten. Sedangkan larutan pH 7 diperoleh dengan menggunakan larutan buffer 7,00 untuk memastikan akurasi yang lebih tinggi.

Setelah semua larutan sampel dibuat, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian untuk memvalidasi kinerja sensor pH dengan membandingkan nilai ADC sensor terhadap pembacaan pH meter. Proses pengukuran nilai ADC sensor ditunjukkan pada **Gambar 3.9**, sedangkan pengukuran nilai pH dari pH meter ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.9 Proses pengukuran nilai ADC sensor



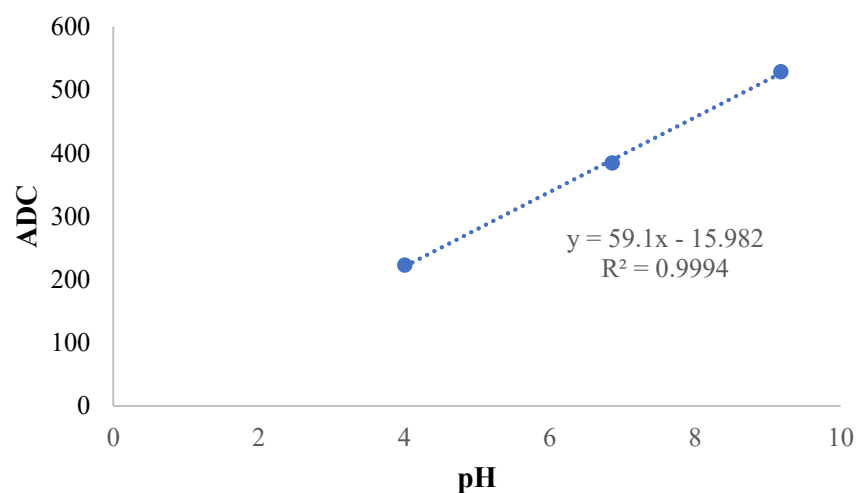
Gambar 3.10 Proses pengukuran menggunakan pH meter

Proses kalibrasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil ukur nilai ADC yang dibaca sensor pH dengan hasil ukur nilai pH dari pH meter pada masing-masing sampel. Tahap ini dilakukan dengan melakukan komparasi terhadap nilai pembacaan ADC dari sensor pH dan nilai pH meter. Hasil pengukuran nilai ADC dan tegangan dari sensor pH dan pembacaan nilai pH pada pH meter ditunjukkan pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Perbandingan Nilai ADC Sensor pH dan Nilai pH Meter

No	Sampel Larutan	pH Meter (pH)	Sensor pH-4502C (ADC)
1	Larutan Asam Sitrat (Stok)		
2	Pengenceran Asam Sitrat 1 (3:7)		
3	Pengenceran Asam Sitrat 2 (1:9)		
4	Pengenceran Asam Sitrat 3 (1:9)		
5	Pengenceran Asam Sitrat 4 (1:9)		
6	Netral		
7	Pengenceran NaOH 5 (1:9)		
8	Pengenceran NaOH 4 (1:9)		
9	Pengenceran NaOH 3 (1:9)		
10	Pengenceran NaOH 2 (1:9)		
11	Pengenceran NaOH 1 (1:9)		
12	Larutan NaOH (Stok)		

Berdasarkan data pada **Tabel 3.2**, untuk menganalisis hubungan antara nilai ADC dengan nilai pH, dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik seperti pada **Gambar 3.11**. Grafik ini bertujuan untuk memvisualisasikan korelasi antara kedua variabel tersebut dan menentukan persamaan regresi linear yang dapat digunakan untuk kalibrasi sensor pH.

**Gambar 3.11** Contoh Grafik Hubungan pH dan ADC (Saputra, 2024)

Sampel Larutan	pH Meter	Sensor pH-4502C			Rata-rata Sensor	Akurasi (%)
		1	2	3		
Larutan Asam Sitrat (Stok)						
Pengenceran Asam Sitrat 1 (3:7)						
Pengenceran Asam Sitrat 2 (1:9)						
Pengenceran Asam Sitrat 3 (1:9)						
Pengenceran Asam Sitrat 4 (1:9)						
Netral						
Pengenceran NaOH 5 (1:9)						
Pengenceran NaOH 4 (1:9)						
Pengenceran NaOH 3 (1:9)						
Pengenceran NaOH 2 (1:9)						
Pengenceran NaOH 1 (1:9)						
Larutan NaOH (Stok)						
Rata-rata						

3.3.5 Pengujian Sistem dan Pengambilan Data

Pengujian yang dilakukan pada sistem kontrol pH larutan dilakukan dalam dua tahap yaitu, pengujian pompa pH *Up* dan pH *Down* serta pengujian sistem kontrol pada instalasi Hidroponik. Pengujian pompa pH *Up* dan pH *Down* bertujuan untuk memastikan bahwa larutan pH *Up* dan pH *Down* yang dialirkan melalui pompa dosing dapat berjalan dengan baik. Dalam pengaturan *on/off* pompa dilakukan dengan mengkombinasikannya pada modul relay yang terhubung dengan ESP32.

Pada penelitian ini menggunakan 2 buah pompa dosing dan modul relay 2 *channel*. Untuk mengaktifkan pompa, digunakan *power supply* yang memiliki tegangan 12V. Hal ini dilakukan karena ESP32 hanya memiliki 5V dan 3.3V, sehingga dayanya tidak mencukupi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beberapa jenis larutan dari asam dan basa. Hasil pengujian pompa pH *Up* dan pH *Down* ditunjukkan pada **Tabel 3.4**.

Tabel 3.4 Data Hasil Pengujian Pompa pH *Up* dan pH *Down*

Pengujian ke-	pH Awal	Siklus ke-	Pompa pH <i>Up</i>	Pompa pH <i>Down</i>	Hasil Akhir pH Air	Status
1						
2						
3						
4						
5						

Pengujian sistem kontrol pH secara keseluruhan dilakukan pada instalasi hidroponik tanaman selada. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa sistem dapat berjalan dengan baik sesuai dengan rancangan. Pada pengujian ini dilakukan beberapa perlakuan pada larutan yang berada di dalam tandon. Hasil pengujian ini dapat dianalisis, sehingga menghasilkan kesimpulan mengenai efektifitas sistem yang dirancang untuk mempertahankan pH larutan dalam tandon hidroponik. Data hasil pengujian dan pengamatan nilai pH pada instalasi hidroponik vertikultur disajikan pada **Tabel 3.5**.

Tabel 3.5 Data Hasil Pengujian Sistem Kontrol pH Pada Instalasi Hidroponik

No.	Tanggal	Waktu Pengambilan	Kondisi Larutan		Pompa		Pompa		Hasik Akhir
			(Sebelum/Setelah Penambahan Air Larutan Nutrisi)	pH Awal	pH Up	pH Down	pH		
								ON	
Larutan									

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Sistem kontrol pH otomatis berbasis IoT berhasil dirancang menggunakan ESP32, sensor pH-4502C, relay 2 channel, pompa dosing peristaltik, dan LCD I2C. Sistem mampu mempertahankan pH larutan dalam rentang optimal 6,0-7,0 dengan monitoring dan kontrol jarak jauh melalui Blynk, sehingga meningkatkan efisiensi pengelolaan budidaya selada hidroponik vertikultur.
2. Sistem kontrol otomatis menghasilkan peningkatan signifikan pada kualitas selada dibanding kontrol manual dengan jumlah daun rata-rata 40% lebih tinggi, lebar daun 38,46%, dan diameter batang 54,55%, serta warna hijau yang lebih pekat. Stabilitas pH optimal mendukung penyerapan nutrisi yang efisien, menghasilkan pertumbuhan selada yang seragam dan berkualitas tinggi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan, terdapat beberapa aspek yang memerlukan pengembangan lebih lanjut, antara lain:

1. Mengimplementasikan sistem kontrol pH larutan otomatis pada berbagai jenis tanaman dengan karakteristik fisiologis yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem terhadap kebutuhan pH spesifik setiap jenis tanaman, sehingga dapat mengoptimalkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman secara universal.
2. Mengintegrasikan parameter kontrol multivariabel dalam teknik budidaya hidroponik vertikultur agar dapat memaksimalkan pengaruh sistem kontrol yang dirancang terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman selada.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, E. N., Ridwan, A. F. B., dan Fauzan, M. N. (2024). *Building The Future* (R. Ai, Ed.). Bandung: Penerbit Buku Pedia.
- Agustin, H. P., De Oliveira, A. M., Anistyasari, Y., Ueda, K., Wardhono, A., dan Rahayu, I. A. T. (2022). *Proceedings of the International Joint Conference on Science and Engineering 2022 (IJCSE 2022)*. Dordrecht: Atlantis Press International BV.
- Aprilani, P. (2024). Urban Farming Sebagai Upaya Ketahanan Pangan Keluarga. *JURNAL ANGGREK HITAM*, 1(1), 18–22.
- Apriyanti, R. N. (2015). *Hidroponik Perkotaan*. Jakarta: Trubus Swadaya.
- Badan Pusat Statistik. (2020). *Persentase Penduduk Daerah Perkotaan Hasil Proyeksi Penduduk menurut Provinsi, 2015 - 2035*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MTI3NiMx/persentase-penduduk-daerah-perkotaan-hasil-proyeksi-penduduk-menurut-provinsi--2015---2035.html>.
- Barus, E. E., Pingak, R. K., dan Louk, A. C. (2018). Otomatisasi Sistem Kontrol pH Dan Informasi Suhu Pada Akuarium Menggunakan Arduino Uno dan Raspberry PI 3. *Jurnal Fisika: Fisika Sains Dan Aplikasinya*, 3(2), 117–125.
- Budijanto, A., Winardi, S., dan Susilo, K. E. (2021). *Interfacing ESP32*. Surabaya: Scopindo Media Pustaka.
- Cameron, N. (2019). Liquid Crystal Display. In *Arduino Applied* (pp. 79–100). Apress.
- De Rijck, G., dan Schrevens. (1998). Cationic Speciation in Nutrient Solutions as a Function of pH. *Journal of Plant Nutrition*, 21(5), 861–870.
- Desmira, Aribowo, D., dan Pratama, R. (2018). Penerapan Sensor pH Pada Area Elektrolizer Di PT. Sulfindo Adiusaha. *Jurnal PROSISKO*, 5(1), 9–12.
- Eigenbrod, C., dan Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 483–498.
- Espressif. (2023). *ESP32 Series Datasheet*.
- Hadi, S., Labib, R. P. M. D., dan Widayaka, P. D. (2022). Perbandingan Akurasi Pengukuran Sensor LM35 dan Sensor DHT11 Untuk Monitoring Suhu Berbasis Internet of Things. *Jurnal STRING*, 6(3), 269-278.

- Halim, J. (2016). *6 Teknik Hidroponik*. Jakarta: Penebar Swadaya Grup.
- Handson Technology. (2021). *User guide I2C Serial Interface 1602 LCD Module*.
- Hangkawidjaja, A. D. (2023). *NodeMCU ESP8266-12 untuk Internet of Things (IoT)* (E. M. Sartika, Ed.). Yogyakarta: Zahir Publishing
- Herwibowo, K., dan Budiana, N. (2021). *Hidroponik Bertanam Sayur Tanpa Tanah*. Jakarta: Penebar Swadaya Grup.
- Ibadarrohman, Salahuddin, N. S., dan Kowanda, A. (2018). Sistem Kontrol dan Monitoring Hidroponik berbasis Android. *Konferensi Nasional Sistem Informasi 2018 STMIK Atma Luhur Pangkalpinang*, 177–182.
- Isnain, M. (2020). *Hidroponik Bertanam Sayuran Tanpa Tanah*. Jakarta: Agromedia.
- James, J. P., Doo-Soon, P., Young-Sik, J., dan Yi, P. (2019). *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing*. Singapore: Springer Nature.
- Junaidi, J., dan Ramadhani, K. (2024). Efektivitas Internet of Things (IoT) Pada Sektor Pertanian. *Jurnal Teknisi*, 4(1), 12.
- Karoba, F., Suryani, dan Nurjasmi, R. (2015). Pengaruh Perbedaan pH Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kailan (*Brassica oleracea*) Sistem Hidroponik NFT (Nutrient Film Technique). *Jurnal Ilmiah Respati Pertanian*, 7(2), 529–534.
- Khakim, L. (2023). *Buku Ajar Mikrokontroler ATmega 328* (M. Nasrudin, Ed.). Jawa Tengah: Penerbit NEM.
- Lingga, P. (1984). *Hidroponik Bercocok Tanam Tanpa Tanah*. Jakarta: Penebar Swadaya Grup.
- Mahdalena. (2024). Berdaya Tani di Perkotaan Implementasi Budidaya Hidroponik Tanaman Sayur untuk Kemandirian Pangan di Perumahan Sempaja Lestari Indah, Samarinda. *Jurnal Anggrek Hitam*, 1(2), 48–50.
- Mamta, P. (2023). *Monitoring and Control of Substation Parameters Using GSM Module*. India: Archers dan Elevators Publishing House.
- Melfia, Y. (2023). *Hidroponik di Rumah Tangga*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Mihovska, A. D., dan Raut, R. (2021). *Examining the Impact of Deep Learning and IoT on Multi-Industry Applications*. AS: IGI Global.
- Muriyatmoko, D., Kurnia, R., Utama, S. N., dan Mustafa, A. (2023). Sistem Monitoring Jarak Jauh Kontrol pH Tanama Selada Dengan Media Hidroponik. *Jurnal Teknologi Terpadu*, 11(1), 95–102.
- Nugroho, B. W. (2024). *Hidroponik Rumahan*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Nur, M., Ernita, Maizar, dan Agara, O. (2024) Pengaruh Ketinggian Talang dan Media Tanam Secara Hidroponik Vertikultur Terhadap Pertumbuhan Selada Chris Green (*Lactuca sativa* L.). *Jurnal Dinamika Pertanian*, 40(3), 209-218.

- Pancawati, D., dan Yulianto, A. (2016). Implementasi Fuzzy Logic Controller Untuk Mengatur pH Nutrisi Pada Sistem Hidroponik Nutrient Film Technique (NFT). *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 5(2), 278–289.
- Pracaya, dan Kartika. (2016). *Bertanam 8 Sayuran Organik*. Jakarta: Penebar Swadaya.
- Prafanto, A., Budiman, E., Widagdo, P. P., Putra, G. M., dan Wardhana, R. (2021). Pendeteksi Kehadiran Menggunakan ESP 32 Untuk Sistem Pengunci Pintu Otomatis. *Jurnal Teknologi Terapan*, 7(1), 37–43.
- Prasetio, U. (2015). *Panen Sayuran Hidroponik Setiap Hari*. Jakarta: Agromedia Pustaka.
- Pratama, I. P. Y. P., Wibawa, K. S., dan Suarjaya, I. M. A. D. (2022). Perancangan pH Meter Dengan Sensor pH Air Berbasis Arduino. *Jurnal Ilmiah Teknologi Dan Komputer*, 3(2), 1034-1042.
- Putra, A. Y. H., dan Pambudi, W. S. (2017). Sistem Kontrol Otomatis pH Larutan Nutrisi Tanaman Bayam Pada Hidroponik NFT (Nutrient Film Technique). *Jurnal Ilmiah Mikrotek*, 2(4), 11–20.
- Putri, R. E., A, A., dan Hasan, A. (2023). Rancang Bangun Sistem Kontrol pH Larutan Nutrisi dan Pencahayaannya Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Hidroponik Vertikultur. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 12(1), 41–50.
- Putri, R. E., B, A., dan Andasuryani. (2023). Pengembangan Sistem Otomatisasi pH Larutan Nutrisi pada Hidroponik Sistem DFT (Deep Flow Technique) Berbasis IoT. *Jurnal AgriTECH*, 43(3), 259–268.
- Santosa, Putri, I., dan Alkawi, L. H. (2024). *Vertikultur Berbasis Internet of Things*. Jawa Timur: Uwais Inspirasi Indonesia.
- Saputra, A. (2024). Karakterisasi Sensor TDS Sen-0244 Dan Sensor pH-4502C Dalam Implementasinya Pada Penanaman Hidroponik. *Conference Proceedings*. 12(1), 145-150.
- Sari, S. A. (2024). *Buku Ilustrasi Kimia Analitik*. UMSU Press: Medan.
- Schwarz, M. (2012). *Soilless Culture Management*. New York: Springer Berlin Heidelberg.
- Senouci, M. R., Boudaren, M. E. Y., Sebbak, F., dan Mataoui, M. (2021). *Advances in Computing Systems and Applications: Proceedings of the 4th Conference on Computing Systems and Applications*. London: Springer Nature.
- Singh, A., Kumar, D., dan Mor, R. S. (2022). *AGRI-FOOD 4.0: Innovations, Challenges and Strategies*. Bingley: Emerald Publishing Limited.
- Suhartono, Chamidy, T., dan Prayoga, E. (2021). *Desain Prototipe Reaktor Plasma*. Lamongan: Academia Publication.
- Sukma, A. (2021). *Vertikultur: Solusi Berkebun di Lahan Sempit*. Yogyakarta: DIVA Press.

- Susanthi, Y., dan Andrianto, H. (2024). *Mesin Pembuat Minuman Kopi Otomatis Menggunakan Pengendali Mikro ESP32 dan Smartphone Android*. Yogyakarta: Zahir Pusblishing.
- Syarief, E., Duryatmo, S., Angkasa, S., Apriyanti, R. N., Raharjo, A. A., Rizkika, K., Rahimah, D. S., Titisari, A., Setyawan, B., Vebriansyah, R., Fadhillah, R., Nugroho, H., dan Awaluddin, M. (2014). *Hidroponik Praktis*. Jakarta: Trusmi Swadaya.
- Touliatos, D., Dodd, I. C., dan McCain, M. (2016). Vertical Farming Increases Lettuce Yield Per Unit Area Compared to Conventional Horizontal Hydroponics. *Food and Energy Security*, 5(3), 184–191.
- Tusi, A. (2016). *Teknik Hidroponik Seri Teknologi Hidroponik #1: Teknik Dasar Budidaya dan Sistem Hidroponik*. Jakarta: Inspirasi Books.
- Vasudevan, S. K., Juluru, A., dan Murugesu, T. S. (2022). *Let's Get IoT-fied!* Boca Raton: CRC Press.
- Vyshnavi, Asha, S., Sanjana, A., Chinmay, J., dan Harshit, D. (2023). Hydroponic Farming. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 5(2), 1-12.
- Widiasmadi, N. (2023). *Smart Agriculture* (1st ed.). Jawa Barat: Penerbit ADAB.
- Wijaya, A., dan Fajriani, S. (2022). Pertumbuhan dan Hasil Selada (*Lactuca sativa* L.) Pada Metode Hidroponik Sistem Sumbu Dengan Kerapatan Naungan dan Konsentrasi Nutrisi Yang Berbeda. *Jurnal Produksi Tanaman*, 10(10), 541–548.
- Wulandari, R. D., Sani, S. A., Anggraeni, N. P., Mashithoh, N. N., Prihandono, T., dan Mahmudi, K. (2023). Analisis Konsep Fluida Pada Sistem Perairan Hidroponik NFT (Nutrient Film Engineering). *Jurnal Sains Riset*, 13(3), 832–838.
- Zambak, M. F. (2022). *Monitoring Pemakaian Listrik Berbasis Mikrokontroler* (M. Arifin, Ed.). Medan: UMSU Press.