

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Perkembangan teknologi pertanian mendorong penerapan sistem budidaya yang mampu mengelola air dan nutrisi secara lebih tepat berdasarkan kebutuhan tanaman dan kondisi lingkungan. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah fertigasi melalui irigasi tetes, yaitu pemberian air dan pupuk secara bersamaan melalui jaringan irigasi menuju daerah perakaran tanaman. Penelitian oleh Susila et al. menjelaskan bahwa fertigasi melalui irigasi tetes merupakan salah satu penerapan teknologi pertanian presisi karena pemberian nutrisi dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman. Pada penelitian tersebut, penerapan fertigasi melalui irigasi tetes pada tanaman cabai menghasilkan hasil panen yang lebih tinggi dibandingkan pemberian pupuk secara konvensional, meskipun perlakuan fertigasi *split* dan fertigasi tetes tidak menunjukkan perbedaan hasil yang signifikan. Penelitian tersebut juga menggunakan beberapa sumber nitrogen, termasuk pupuk NPK 16-16-16, sehingga menunjukkan bahwa fertigasi melalui irigasi tetes dapat diterapkan untuk mendukung pengelolaan air dan nutrisi pada tanaman hortikultura[8].

Perkembangan fertigasi selanjutnya mengarah pada pemanfaatan sistem yang mampu menyesuaikan pemberian air dan nutrisi berdasarkan kondisi aktual tanaman. Penelitian oleh Odone et al. mengembangkan sistem *smart fertigation* pada tanaman tomat dengan algoritma yang mempertimbangkan volume air irigasi dan kandungan unsur hara yang tersedia untuk menentukan tambahan nutrisi yang diperlukan tanaman. Sistem tersebut dirancang untuk memberikan makronutrien sesuai kebutuhan tanaman berdasarkan tahap pertumbuhan[9]. Sementara itu, penelitian oleh Lindawati et al. mengembangkan sistem fertigasi berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor kelembapan tanah, suhu, konsentrasi nutrisi, dan ketinggian larutan dalam tangki dengan ESP32. Data sensor diproses menggunakan *fuzzy logic* untuk mengendalikan irigasi dan dikirimkan ke platform *monitoring* sehingga kondisi sistem dapat dipantau secara *real-time*. Hasil penelitian

menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan air sebesar 30% dan peningkatan hasil tanaman sebesar 25% dibandingkan irigasi manual[10].

Penelitian yang lebih mendekati aspek pengendalian nutrisi berbasis kondisi tanah dilakukan oleh Ismail et al. melalui pengembangan sistem *Smart Precision Farming* berbasis IoT untuk pembibitan kentang. Sistem tersebut menggunakan ESP32 dan sensor NPK dengan komunikasi RS485 Modbus untuk memperoleh data unsur hara tanah secara *real-time*. Data tersebut digunakan dalam strategi fertigasi adaptif menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani, sedangkan sistem juga dilengkapi dengan pengendalian aktuator dan *monitoring* melalui Node-RED serta Grafana. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor NPK memiliki nilai MAPE sebesar 2,62%, respons aktuator memiliki latensi kurang dari 500 ms, dan penerapan kendali fertigasi adaptif mampu mengurangi penggunaan pupuk hingga 30,3% dibandingkan metode pemberian pupuk berbasis jadwal[11].

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, pengembangan sistem irigasi dan fertigasi telah bergerak dari pemberian air dan pupuk secara konvensional menuju sistem yang memanfaatkan irigasi tetes, sensor, mikrokontroler, serta metode kendali otomatis. Penelitian Susila et al. menunjukkan penerapan fertigasi melalui irigasi tetes pada tanaman hortikultura, lalu penelitian oleh Odone et al. menunjukkan pengaturan nutrisi berdasarkan kebutuhan tanaman, penelitian oleh Lindawati et al. menunjukkan integrasi sensor, ESP32, *fuzzy logic*, dan IoT, sedangkan penelitian oleh Ismail et al. menunjukkan penggunaan sensor NPK berbasis RS485 dan Fuzzy Logic Mamdani untuk pengendalian fertigasi adaptif. Berdasarkan perkembangan tersebut, penelitian ini diarahkan pada pengembangan sistem distribusi air dan nutrisi menggunakan *Pressure Compensating Dripper* (PCJ) dengan kelembapan tanah dan kandungan nitrogen sebagai parameter kondisi aktual. Pengendalian nutrisi dilakukan menggunakan *Fuzzy Logic*, sedangkan pengendalian air menggunakan metode *threshold*. Sistem dirancang untuk mengintegrasikan pembacaan sensor, pengambilan keputusan, pengoperasian aktuator, distribusi air dan nutrisi, serta *monitoring* kondisi sistem secara *real-time*.

Sebagai dasar analisis yang digunakan maka, penulis merangkum referensi tersebut dalam Tabel 2.1 yang memuat judul penelitian, metode, hasil penelitian, serta keterbatasan penelitian.

Tabel 2.1. Tinjauan Pustaka

No.	Penelitian dan Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
1	Susila et al. (2020) " <i>Fertigation Methods and N Source on Chili through Drip Irrigation</i> "	Penerapan fertigasi <i>split</i> dan fertigasi tetes menghasilkan total dan hasil panen yang lebih tinggi dibandingkan pemupukan konvensional. Penggunaan sumber nitrogen, termasuk NPK 16-16-16, juga menunjukkan bahwa pemilihan metode fertigasi dan sumber N dapat memengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman.	Penelitian berfokus pada perbandingan metode fertigasi dan sumber nitrogen terhadap hasil tanaman, sehingga belum membahas pengendalian fertigasi secara otomatis berdasarkan pembacaan kondisi tanah secara <i>real-time</i> .
2	Odone et al. (2024) " <i>A Novel Smart Fertigation System for Irrigation with Treated Wastewater: Effects on Nutrient Recovery, Crop and Soil</i> "	Sistem <i>smart fertigation</i> mampu menentukan pemberian tambahan nutrisi dengan mempertimbangkan kebutuhan tanaman serta kandungan nutrisi yang telah diberikan melalui air irigasi. Pendekatan tersebut memungkinkan pemberian nutrisi dilakukan secara lebih terkontrol sesuai kebutuhan tanaman.	Penelitian berfokus pada smart fertigation menggunakan air limbah terolah dan pengelolaan keseimbangan nutrisi pada tanaman tomat, sehingga konfigurasi sistem dan kondisi penerapannya berbeda dengan sistem distribusi fertigasi pada lahan penelitian ini.

No.	Penelitian dan Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
3	Lindawati et al. (2025) “ <i>Fertigation Monitoring and Control System for Home Chili Cultivation Based on Internet of Things (IoT)</i> ”	Sistem fertigasi mampu melakukan pemantauan beberapa kondisi tanaman secara <i>real-time</i> dan mengendalikan proses irigasi secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan air sebesar 30% dan peningkatan hasil tanaman sebesar 25% dibandingkan irigasi manual.	Penelitian lebih berfokus pada budidaya cabai skala rumah dan pengendalian irigasi, sehingga pengendalian pemberian nutrisi berdasarkan kandungan nitrogen tanah belum menjadi fokus utama sistem.
4	Ismail et al. (2026) “Optimalisasi Pembibitan Kentang di Greenhouse dengan Teknologi IoT Berbasis Sensor NPK”	Sistem mampu melakukan pemantauan unsur hara tanah dan menerapkan fertigasi adaptif. Hasil pengujian menunjukkan sensor NPK memiliki nilai MAPE sebesar 2,62%, latensi sistem kurang dari 500 ms, serta penerapan Fuzzy Mamdani mampu mengurangi konsumsi pupuk hingga 30,3% dibandingkan metode <i>schedule based</i> .	Penelitian diterapkan pada pembibitan kentang di greenhouse dan berfokus pada optimalisasi fertigasi adaptif. Konfigurasi distribusi air dan nutrisi serta penerapannya pada lahan terbuka dengan PCJ berbeda dengan penelitian ini.

Oleh karena itu, proses kerja sistem dimulai dari pembacaan sensor sebagai *input* yang kemudian diproses oleh metode *Fuzzy Logic* untuk menentukan durasi pengoperasian *valve*. Sistem menerapkan mekanisme kerja secara bergantian antara *valve* air dan *valve* nutrisi. *Valve* nutrisi hanya dapat diaktifkan setelah proses penyiraman melalui *valve* air selesai dilakukan. Selama *valve* air masih dalam kondisi bekerja, *valve* nutrisi tidak diperbolehkan untuk aktif. Mekanisme tersebut diterapkan untuk mencegah kedua *valve* beroperasi secara bersamaan sehingga

proses distribusi air dan nutrisi dapat berlangsung secara teratur sesuai dengan urutan kerja sistem.

2.2 Irigasi

Irigasi merupakan suatu sistem yang digunakan untuk mengatur, mengalirkan, dan mendistribusikan air ke lahan pertanian secara terkontrol untuk memenuhi kebutuhan air tanaman. Pengelolaan irigasi tidak hanya berkaitan dengan penyediaan air, tetapi juga mencakup pengaturan jumlah dan waktu pemberian air agar penggunaannya dapat dilakukan secara efektif. Penerapan teknologi pada sistem irigasi dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi kehilangan air selama proses pemberian air [12].

Salah satu bentuk penerapan teknologi dalam sistem irigasi adalah penggunaan irigasi tetes (*drip irrigation*). Irigasi tetes merupakan metode pemberian air dengan menyalurkan air secara langsung menuju area perakaran melalui pipa atau selang yang dilengkapi dengan titik keluaran air. Metode tersebut memungkinkan air diberikan pada area yang membutuhkan sehingga distribusi air dapat dilakukan secara lebih terarah. Irigasi tetes juga termasuk salah satu teknologi irigasi modern yang dapat membantu mengurangi kehilangan air dibandingkan dengan metode irigasi yang distribusinya kurang terkontrol[13].

Efektivitas pemberian air pada sistem irigasi juga dipengaruhi oleh kondisi kelembapan tanah. Kelembapan tanah dapat digunakan sebagai parameter untuk mengetahui kondisi ketersediaan air pada media sehingga pemberian air dapat disesuaikan dengan kondisi aktual. Pemantauan kelembapan tanah menggunakan sensor yang terintegrasi dengan sistem irigasi memungkinkan proses penyiraman dilakukan ketika kondisi tanah membutuhkan air dan membantu menghindari pemberian air secara berlebihan maupun kekurangan air. Penggunaan sensor kelembapan juga dapat mendukung pengaturan waktu irigasi secara otomatis berdasarkan batas kelembapan yang telah ditentukan[14].

Selain metode irigasi yang digunakan, karakteristik tanah juga perlu diperhatikan karena setiap jenis tanah memiliki kemampuan yang berbeda dalam menyimpan dan mempertahankan air. Tanah dengan dominasi fraksi pasir memiliki karakteristik yang lebih porous dan kemampuan menahan air yang relatif rendah.

Penelitian mengenai sifat fisika dan kimia tanah menunjukkan bahwa tanah dengan fraksi pasir yang tinggi memiliki kemampuan memegang air yang rendah, sedangkan peningkatan fraksi debu dan liat dapat meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air[14]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik media tanah perlu dipertimbangkan dalam menentukan metode dan pengaturan pemberian air.

Berdasarkan prinsip tersebut, penerapan irigasi pada media tanah dengan kemampuan menahan air yang rendah memerlukan pemberian air secara terkontrol agar distribusinya dapat dilakukan secara tepat. Kombinasi irigasi tetes dengan pemantauan kelembapan tanah dapat digunakan untuk mengatur pemberian air berdasarkan kondisi media, sehingga nilai kelembapan dapat dijadikan dasar untuk menentukan apakah proses penyiraman perlu dilakukan. Apabila kelembapan tanah berada di bawah batas yang telah ditentukan, sistem dapat mengaktifkan pompa dan *solenoid valve* air untuk memberikan air melalui jaringan irigasi, sedangkan ketika nilai kelembapan telah mencapai batas yang ditetapkan, proses penyiraman dihentikan. Pada penelitian ini, pemberian air dilakukan menggunakan irigasi tetes dengan *dripper* sebagai titik keluaran air untuk mendistribusikan air secara langsung melalui jaringan irigasi menuju media tanah. Pengendalian penyiraman menggunakan metode ambang (*threshold*) berdasarkan nilai kelembapan tanah, sehingga proses penyiraman dapat disesuaikan dengan kondisi aktual media. Penerapan tersebut sejalan dengan konsep irigasi modern yang memanfaatkan sensor kelembapan tanah untuk membantu mengoptimalkan waktu dan penggunaan air.

2.3 Fertigasi

Fertigasi merupakan metode pemberian pupuk melalui sistem irigasi dengan melarutkan unsur hara ke dalam air yang kemudian dialirkan menuju daerah perakaran tanaman. Pada sistem irigasi tetes, metode ini memungkinkan air dan nutrisi diberikan secara langsung dan terarah pada zona perakaran sehingga kebutuhan tanaman dapat dipenuhi secara lebih efisien. Sistem fertigasi secara umum terdiri atas sumber air dan pompa, perangkat pemberian larutan pupuk, serta

jaringan distribusi berupa pipa, lateral, dan *emitter* yang berfungsi menyalurkan air dan nutrisi menuju tanaman[15].

Penerapan fertigasi membutuhkan pupuk yang dapat larut dalam air agar unsur hara dapat didistribusikan bersama aliran irigasi. Pemilihan pupuk perlu mempertimbangkan tingkat kelarutan serta karakteristik larutan karena interaksi antara pupuk dan air dapat memengaruhi proses distribusi pada jaringan irigasi[15]. Salah satu unsur hara yang banyak diperhatikan dalam fertigasi adalah nitrogen (N), karena ketersediaannya berperan dalam pemenuhan kebutuhan nutrisi tanaman dan dapat diberikan secara bertahap melalui sistem irigasi.

Penggunaan fertigasi tetes memungkinkan pemberian air dan nutrisi dilakukan secara bersamaan dan lebih dekat dengan daerah perakaran. Kondisi tersebut dapat mengurangi kehilangan air dan unsur hara sekaligus mendukung penyerapan nutrisi oleh tanaman. Hasil meta-analisis oleh Li et al. menunjukkan bahwa penerapan *drip fertigation* meningkatkan hasil tanaman sebesar 12,0%, produktivitas air sebesar 26,4%, dan efisiensi penggunaan nitrogen sebesar 34,3% dibandingkan praktik irigasi dan pemupukan konvensional[16].

Perkembangan teknologi memungkinkan sistem fertigasi diintegrasikan dengan sensor dan mikrokontroler sehingga kondisi tanaman dan media tanam dapat dipantau sebagai dasar pengaturan pemberian air maupun nutrisi. Penelitian Lindawati et al. menerapkan sistem fertigasi berbasis IoT dengan memanfaatkan sensor untuk memantau kelembapan tanah, suhu, konsentrasi nutrisi, dan ketinggian larutan dalam tangki secara *real time*[10]. Berdasarkan konsep tersebut, fertigasi pada penelitian ini digunakan untuk menyalurkan larutan nutrisi melalui jaringan irigasi tetes dengan kandungan nitrogen tanah sebagai parameter dalam menentukan kebutuhan pemberian nutrisi.

2.4 Sensor NPK

Sensor pembacaan nitrogen, fosfor, dan kalium dalam tanah atau sensor NPK merupakan perangkat yang sesuai untuk mendeteksi kandungan unsur hara dalam tanah. Sensor ini dilengkapi dengan *probe* yang berbahan baja tahan karat yang memungkinkan pemasangan di dalam tanah dalam jangka waktu panjang karena memiliki ketahanan terhadap efek elektrolisis, paparan garam, serta korosi akibat

kondisi tanah yang bersifat asam maupun basa[17]. Perangkat ini mampu menghasilkan data secara *real time* dengan tingkat presisi $\pm 2\%$ *full scale* dengan waktu respons ≤ 1 detik, dan beroperasi pada tegangan 5V serta, menggunakan protokol komunikasi berbasis RS485 sebagai keluaran data[18]. Pada tabel 2.2 menjelaskan mengenai spesifikasi sensor NPK dan gambar 2.1 merupakan sensor NPK.



Gambar 2. 1 Sensor NPK [17]

Tabel 2. 2 Spesifikasi Sensor NPK

Spesifikasi	
Tegangan <i>input</i>	5 – 30 VDC
Rentang pengukuran	1 – 1999 mg/kg (mg/L)
Akurasi	$\pm 2\%$ <i>full scale</i>
Waktu respon	≤ 1 detik
Suhu Operasi	0°C – 55°C
Protokol Komunikasi	RS485 (Modbus RTU)
Dimensi (P x L)	45 × 15 × 123 mm

2.5 Sensor Kelembapan Tanah

Sensor kelembapan tanah merupakan sensor yang mampu mendeteksi tingkat kelembapan pada suatu tanah. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan tingkat sensitifitas sebuah konduktor terhadap muatan listrik yang terdapat pada media tanah[19]. Nilai resistansi yang terbaca oleh sensor akan diubah menjadi data digital atau analog sebagai indikator kadar air dalam tanah[20]. Semakin banyak air yang terkandung dalam tanah akan mempermudah pembacaan sensor karena

resistansinya kecil, sedangkan tanah yang kering akan sulit menghantarkan listrik karena resistansinya yang besar. Bentuk fisik dari sensor ditampilkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 *soil moisture sensor* [19]

Pada penelitian ini menggunakan DFRobot *capacitive soil moisture sensor* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2 karena memiliki akurasi pembacaan yang baik serta sudah dilengkapi fitur *waterproof* sehingga aman jika terkena air. Pada tabel 2.3 menjelaskan spesifikasi sensor kelembapan tanah yang digunakan.

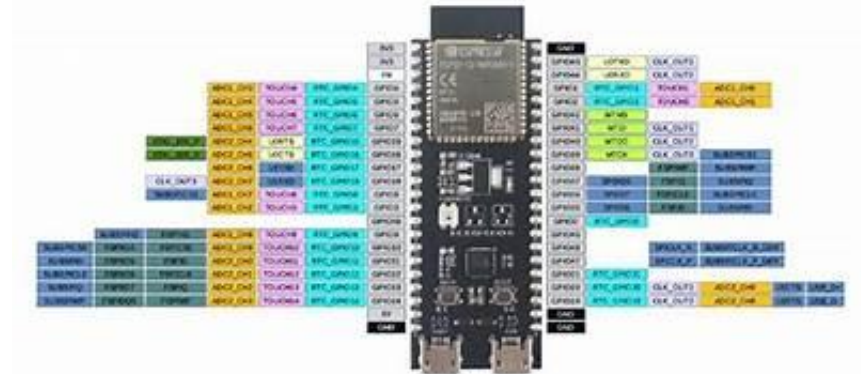
Tabel 2. 3 Spesifikasi Sensor Kelembapan Tanah

Spesifikasi	
Tegangan <i>input</i>	3.3 – 5.5 VDC
<i>Interface</i>	3 pin (2.54 mm)
Tegangan <i>output</i>	0 – 3 VDC (Analog)
Panjang kabel	1.5 Meter
Dimensi (P x L)	175 x 30 mm

2.6 Mikrokontroler ESP32 WROOM S3

ESP32-S3 memiliki keunggulan utama berupa integrasi konektivitas Wi-Fi dan *Bluetooth Low Energy* (BLE) dalam satu chip, sehingga perangkat dapat terhubung secara nirkabel tanpa memerlukan modul tambahan. Hal ini memberikan kemudahan dalam pengembangan sistem *Internet of Things* (IoT). Jika dibandingkan dengan ESP8266 yang hanya mendukung Wi-Fi, ESP32-S3 menawarkan fitur yang lebih lengkap karena dilengkapi *Bluetooth* serta peningkatan kinerja sistem. Mikrokontroler ini menggunakan prosesor *dual-core*

Xtensa® LX7 32-bit dengan kecepatan hingga 240 MHz, sehingga mampu menjalankan berbagai proses komputasi secara efisien. Selain itu, keberadaan *Ultra Low Power* (ULP) coprocessor memungkinkan perangkat tetap beroperasi dengan konsumsi daya yang rendah, terutama saat berada dalam mode sleep[21]. Pada gambar 2.3 memperlihatkan *schematic* dari ESP32 WROOM S3.



Gambar 2. 3 Skematik pin ESP32 WROOM S3 [20]

ESP32-S3 menyediakan banyak GPIO serta berbagai periferal seperti ADC, PWM, UART, I2C, SPI, dan I2S yang mendukung integrasi dengan beragam sensor dan aktuator dalam sistem kendali. Dukungan USB OTG juga menambah fleksibilitas dalam komunikasi data. Dengan kombinasi kemampuan tersebut, ESP32-S3 широко dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi seperti otomasi, smart home, sistem *monitoring* berbasis IoT, hingga kontrol jarak jauh. Stabilitas koneksi nirkabel serta performa pemrosesan yang tinggi menjadikannya sebagai salah satu mikrokontroler yang banyak dipilih dalam pengembangan sistem embedded modern[22]. Tabel 2.4 menjelaskan mengenai spesifikasi ESP32 WROOM S3

Tabel 2. 4 Spesifikasi ESP32 WROOM S3

Spesifikasi	
Mikrokontroler	Xtensa® <i>dual core</i> 32-bit
Frekuensi CPU	240 Mhz
ROM	384KB
Standart WiFi	802.11 b/g/n
Tegangan <i>input</i>	5 – 12 V
ADC	20 <i>channels</i>
Tegangan operasi	3,3 V
GPIO	40 pin

2.7 Power Supply 24 VDC

Catu daya atau power supply adalah perangkat elektronika yang berperan sebagai penyedia energi listrik bagi sistem atau rangkaian lain. Secara umum, catu daya merupakan suatu rangkaian yang mengubah tegangan bolak-balik (AC) menjadi tegangan searah (DC) melalui proses penyearahan dan penyaringan agar diperoleh keluaran yang stabil. Pada penelitian ini, power supply 24V difungsikan sebagai sumber utama energi listrik untuk sistem *fertigation* berbasis ESP32. Tegangan DC sebesar 24volt yang dihasilkan digunakan untuk mensuplai seluruh komponen yang terintegrasi, dengan memanfaatkan proses konversi yang mencakup penyearahan, filtering, serta switching frekuensi tinggi sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang stabil. Bentuk fisik catu daya dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Power Supply 24V [19]

Penggunaan power supply tipe switching pada sistem 24V DC memberikan tingkat perlindungan yang lebih baik terhadap rangkaian. Hal ini sangat penting terutama saat terjadi lonjakan arus awal (*inrush current*) pada beban induktif ketika pertama kali diaktifkan. *Power supply* jenis ini umumnya telah dilengkapi dengan berbagai mekanisme proteksi, seperti *overvoltage protection* (OVP), *overcurrent protection* (OCP), *short circuit protection* (SCP), dan *over temperature protection* (OTP), yang berfungsi untuk menjaga keamanan sistem dari potensi kerusakan. Penggunaan power supply ini bertujuan untuk memberikan tegangan input kepada

komponen yang digunakan. Untuk spesifikasi dari catu daya dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Spesifikasi dari catu daya 24V

Parameter	Spesifikasi
Tegangan keluaran	24 VDC
Arus keluaran	20 A
Daya keluaran	480 W
Tegangan masukan	100–120 VAC / 200–240 VAC
Frekuensi masukan	50–60 Hz
Pendinginan	Kipas DC internal
Dimensi	238 × 124 × 65 mm
Berat	1,35 kg

Berdasarkan hubungan antara tegangan, arus, dan daya, kebutuhan daya suatu beban listrik dapat ditentukan berdasarkan hasil perkalian antara tegangan kerja dan arus beban. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan (2.1)

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

dengan:

P = daya listrik (W)

V = tegangan kerja beban (V)

I = arus beban (A)

Persamaan tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengetahui kebutuhan daya dari komponen atau aktuator yang menggunakan sumber tegangan DC. Pada penelitian ini, perhitungan daya digunakan untuk mengetahui kebutuhan daya beban yang terhubung pada sistem dan selanjutnya dibandingkan dengan kemampuan *power supply* yang digunakan.

2.8 LCD I2C

LCD (*Liquid Crystal Display*) merupakan perangkat output yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk teks maupun karakter secara visual. Dalam sistem berbasis mikrokontroler, LCD sering digunakan sebagai media untuk

menampilkan data hasil pembacaan sensor maupun status sistem secara real-time. Salah satu jenis LCD yang umum digunakan adalah LCD dengan antarmuka I2C (*Inter Integrated Circuit*), yang memungkinkan komunikasi data menggunakan dua jalur utama, yaitu SDA (*Serial Data*) dan SCL (*Serial Clock*)[23]. LCD I2C umumnya menggunakan modul LCD karakter seperti 16x2 atau 20x4 yang dilengkapi dengan modul backpack I2C berbasis IC seperti PCF8574. Modul ini berfungsi sebagai ekspander I/O yang mengubah komunikasi paralel menjadi komunikasi serial, sehingga hanya memerlukan dua pin komunikasi dari mikrokontroler. Selain itu, LCD I2C memiliki tegangan kerja sekitar 5V dan dapat dihubungkan dengan berbagai mikrokontroler seperti Arduino maupun ESP32[20]. Penggunaan LCD I2C ini sebagai media *monitoring* untuk menampilkan kondisi pembacaan dari sensor, seperti kelembapan tanah, kondisi nutrisi, serta status penyiraman dan pemberian nutrisi. Dengan adanya LCD ini, memudahkan petani untuk mengetahui kondisi tanah ketika berada di lahan pertanian. Bentuk dari LCD I2C dan spesifikasinya ditampilkan pada gambar 2.5 dan tabel 2.6.



Gambar 2. 5 LCD I2C [22]

Tabel 2. 6 Spesifikasi LCD I2C

Spesifikasi	
Tegangan <i>Input</i>	5 Vdc
Kontras	<i>Adjustable</i>
Jumlah karakter	16 x 2 baris
<i>Interface</i>	Pin VCC
	Pin GND
	Pin SCL
	Pin SDA
View Area	66 x 16 mm

2.9 Relay 5V

Relay merupakan komponen elektromekanis yang berfungsi sebagai saklar otomatis yang dikendalikan oleh sinyal listrik bertegangan rendah. Prinsip kerja relay didasarkan pada kumparan elektromagnetik yang akan menarik kontak saklar ketika dialiri arus listrik, sehingga memungkinkan pengendalian beban bertegangan lebih tinggi menggunakan mikrokontroler. Pada dasarnya relay terbagi menjadi 4 komponen dasar yaitu *coil electromagnetic*, *armature*, *switch contact point* (saklar), *spring*. Umumnya relay memiliki tegangan kerja pada sisi kontrol sebesar 5V dan mampu mengendalikan beban dengan tegangan lebih tinggi, seperti 12V hingga 220V tergantung jenis dari relay. Titik kontak relay terbagi menjadi 2 jenis yaitu *Normally Close* (NC) dan *Normally Open* (NO)[24]. pada penelitian ini, penggunaan relay bertujuan untuk menghubungkan dan memutus arus aliran Listrik ke aktuator secara otomatis berdasarkan pengolahan data yang dibaca oleh sensor. Bentuk fisik dari relay terlihat dari gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Relay 5V [23]

2.10 Pompa Booster Shimizu PB-228 bit

Pompa *booster* Shimizu PB-228 BIT merupakan pompa air listrik otomatis yang digunakan untuk meningkatkan tekanan dan mengalirkan air pada sistem perpipaan. Berdasarkan petunjuk penggunaan yang diberikan oleh produsen, pompa PB-228 BIT dirancang untuk berbagai kebutuhan yang memerlukan tekanan air tinggi dan dilengkapi dengan *flow switch* sebagai bagian dari sistem operasi otomatis. *Flow switch* berfungsi mendeteksi adanya aliran air sehingga pompa dapat bekerja secara otomatis ketika kondisi aliran memenuhi batas kerja yang ditentukan. Pompa ini digunakan untuk mengalirkan air dari sumber atau

penampungan menuju jaringan perpipaan dan dapat diterapkan pada kebutuhan distribusi air pada bangunan maupun sistem perpipaan lainnya.

Prinsip kerja pompa PB-228 BIT diawali ketika air masuk melalui bagian *suction/inlet* dan kemudian dipindahkan oleh impeller sehingga menghasilkan tekanan untuk mendorong air menuju bagian *discharge/outlet*. Pada pengoperasian otomatis, *flow switch* mendeteksi kondisi aliran pada sisi keluaran pompa dan memberikan kondisi kerja kepada sistem pompa. Berdasarkan manual, *flow switch* pada model ini memiliki batas aliran sekitar 3 L/menit. Pompa juga dilengkapi *thermal protector* yang berfungsi sebagai perlindungan terhadap kondisi panas berlebih pada motor. Apabila motor mengalami kenaikan temperatur, *thermal protector* dapat menghentikan operasi pompa dan pompa dapat kembali bekerja setelah temperatur motor menurun[25]. Bentuk dari pompa ditampilkan pada gambar gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Pompa Shimizu PB 228 BIT [24]

Pada penelitian ini seperti pada Gambar 2.7, pompa Shimizu PB-228 BIT digunakan sebagai sumber tekanan dan penggerak aliran air pada jaringan irigasi. Air yang dipompa kemudian dialirkan melalui jaringan perpipaan menuju *dripper* untuk proses penyiraman. Penggunaan pompa ini memungkinkan sistem menghasilkan aliran air yang diperlukan untuk mendistribusikan air pada beberapa jalur irigasi. Berdasarkan spesifikasi pada manual, pompa memiliki kapasitas maksimum 40 L/menit dan tinggi tekan maksimum 33 m, dengan ukuran

sambungan pipa *suction* dan *discharge* masing-masing 25 mm (1 inci). Spesifikasi pompa Shimizu PB-228 BIT ditampilkan pada tabel 2.7.

Tabel 2. 7 spesifikasi pompa

Parameter	Spesifikasi
Merek	Shimizu
Model	PB-228 BIT
Tegangan	220 V AC, 50 Hz
Arus	1,8 A
Kapasitor	16 μ F / 370 V
Putaran motor	2.900 rpm
Kapasitas maksimum	40 L/menit
Tinggi tekan maksimum	33 m
Diameter <i>suction/inlet</i>	25 mm (1")
Diameter <i>discharge/outlet</i>	25 mm (1")
<i>Flow switch</i>	ON pada 3 L/menit
Tingkat perlindungan	IPX4
Suhu air maksimum	40 °C

2.11 Solenoid Valve

Solenoid valve merupakan salah satu jenis katup yang digunakan untuk mengatur aliran fluida dengan memanfaatkan energi listrik. Katup ini dilengkapi dengan kumparan elektromagnetik yang berfungsi menggerakkan mekanisme katup sehingga aliran fluida dapat dibuka atau ditutup sesuai dengan kondisi pengoperasian. *Solenoid valve* dapat dioperasikan menggunakan sumber tegangan listrik AC maupun DC dan banyak digunakan sebagai aktuator pada sistem pengendalian aliran fluida secara otomatis [26].

Penggunaan solenoid valve sebagai aktuator pada sistem pengendalian aliran air telah diterapkan dalam penelitian Stifvani dkk. (2025). Pada penelitian tersebut, solenoid valve digunakan untuk mengatur aliran air secara otomatis berdasarkan

kondisi yang dideteksi oleh sistem kontrol. Solenoid valve berfungsi menutup aliran air ketika sistem mendeteksi adanya kondisi kebocoran pada saluran pipa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa solenoid valve dapat bekerja sebagai aktuator untuk mengubah kondisi aliran air berdasarkan perintah dari sistem kontrol [26].

Pada penelitian ini digunakan *solenoid valve* seri 2W dengan model 2W160-15 sebagai aktuator untuk mengatur aliran air pada sistem, seperti pada gambar 2.8. Berdasarkan datasheet, model 2W160-15 merupakan *2/2way solenoid valve* dengan mekanisme pengoperasian menggunakan diafragma (*diaphragm*) dan memiliki konfigurasi *Normally Closed* (NC). Katup tersebut memiliki ukuran *orifice* sebesar 16 mm dan ukuran sambungan pipa sebesar 1/2 inci. Model 2W160-15 dapat digunakan untuk media udara, air, dan minyak dengan viskositas fluida di bawah 20 cSt.



Gambar 2. 8 *Solenoid Valve* [24]

Prinsip kerja *solenoid valve* 2W160-15 seperti pada gambar 2.8 didasarkan pada perubahan kondisi katup akibat pemberian dan penghentian energi listrik pada kumparan elektromagnetik. Ketika kumparan memperoleh tegangan listrik, medan elektromagnetik yang terbentuk menyebabkan mekanisme internal katup bergerak sehingga kondisi jalur aliran berubah dan fluida dapat mengalir. Ketika tegangan pada kumparan dihentikan, mekanisme katup kembali menuju kondisi awal sehingga aliran fluida dihentikan. Pada konfigurasi *Normally Closed* (NC), kondisi awal katup berada dalam keadaan tertutup dan katup akan berubah kondisi ketika

kumparan mendapatkan energi listrik. Mekanisme tersebut memungkinkan *solenoid valve* digunakan sebagai aktuator untuk mengendalikan aliran fluida berdasarkan perintah dari sistem kontrol. Penggunaan *solenoid valve* sebagai aktuator pengendalian aliran air juga ditunjukkan pada penelitian Stifvani dkk. (2025), yang menggunakan katup tersebut untuk melakukan pengaturan aliran air secara otomatis berdasarkan kondisi sistem. [24]

Pada penelitian ini, *solenoid valve* yang digunakan bekerja menggunakan sumber tegangan 12 VDC yang sesuai dengan salah satu pilihan tegangan standar pada datasheet seri 2W, yaitu DC12V, selain DC24V dan beberapa pilihan tegangan AC. *Solenoid valve* yang digunakan juga memiliki karakteristik non-polaritas, sehingga pemasangan kabel catu daya DC tidak bergantung pada orientasi kutub positif dan negatif. Berdasarkan datasheet, model 2W160-15 memiliki tekanan kerja untuk media air pada rentang 0-0,5 MPa, sedangkan untuk udara berada pada rentang 0–0,7 MPa. Katup seri 2W menggunakan bodi berbahan kuningan (*brass*) dan *oil seal* berbahan NBR atau VITON. Karakteristik dari *solenoid valve* tercantum pada tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Spesifikasi Solenoid Valve

Parameter	Spesifikasi
Model	2W160-15
Jenis katup	<i>2/2 Way Solenoid Valve</i>
Mekanisme operasi	<i>Diafragma (Diaphragm)</i>
Kondisi awal	<i>Normally Closed (NC)</i>
Ukuran <i>orifice</i>	16 mm
Ukuran <i>port</i>	1/2 inci
Media	Udara, air, minyak
Tekanan kerja air	0-0,5 MPa
Tegangan operasi	12 VDC
Polaritas	Non-polaritas

2.12 Check valve

Check valve atau katup satu arah merupakan komponen dalam sistem perpipaan yang berfungsi untuk mengatur aliran fluida agar hanya mengalir dalam satu arah. Komponen ini dirancang untuk mencegah terjadinya aliran balik (*backflow*) yang dapat merusak sistem atau mengganggu proses distribusi fluida. Prinsip kerjanya didasarkan pada perbedaan tekanan di kedua sisinya, yaitu sisi *inlet* (masuk) dan sisi *outlet* (keluar). Ketika fluida mengalir melalui sisi *inlet* menuju sisi *outlet*, maka *valve* akan terbuka karena tekanan fluida yang lebih besar dari sisi *inlet*. Namun, saat fluida mencoba mengalir dari sisi *outlet* menuju sisi *inlet*, *valve* akan menutup secara otomatis karena adanya perbedaan tekanan[27]. Bentuk fisik dari *Check valve* terlihat seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 *Check Valve* [25]

2.13 Step Down LM2596

LM2596 merupakan salah satu jenis DC-DC *step down* (*buck converter*) yang banyak digunakan untuk menurunkan tegangan DC dari level yang lebih tinggi ke level yang lebih rendah secara efisien. IC ini bekerja dengan prinsip *switching regulator*, yaitu mengubah tegangan menggunakan komponen utama seperti transistor *switching*, dioda, induktor, dan kapasitor. Secara operasional, LM2596 bekerja dengan cara mengatur duty cycle dari sinyal *switching* internalnya. Ketika saklar internal aktif (ON), energi disimpan dalam induktor, dan ketika saklar mati (OFF), energi tersebut dilepaskan ke beban melalui dioda. Proses ini berlangsung secara kontinu dengan frekuensi tetap, sehingga menghasilkan tegangan output yang stabil. Modul LM2596 umumnya dilengkapi dengan potensiometer untuk

mengatur tegangan output sesuai kebutuhan. Komponen *stepdown* LM2596 seperti gambar 2.10.



Gambar 2. 10 *Step Down LM2596* [19]

spesifikasi utama dari LM2596 antara lain: tegangan input berkisar antara 4 V hingga 40 V, dengan tegangan output yang dapat diatur dari 1,25 V hingga 37 V. IC ini mampu menyediakan arus output hingga 3 A, serta bekerja pada frekuensi switching sekitar 150 kHz. Selain itu, LM2596 juga memiliki fitur proteksi seperti thermal shutdown dan current limiting. Penggunaan modul ini pada penelitian bertujuan untuk menurunkan tegangan dari power supply yang nantinya digunakan untuk memberikan *supply* kepada ESP32 dan relay. Tabel 2.6 menunjukkan spesifikasi untuk LM2596 serta gambar 2.9 menampilkan bentuk dari modul LM2596.

Tabel 2. 9 Spesifikasi *Step Down LM2596*

Spesifikasi	
Tipe Converter	Buck (<i>Step Down</i>)
Tegangan Masukan	4 – 40 V
Tegangan Keluaran	3.3 – 37 (<i>adjustable</i>)
Arus Maksimal	3
Efisiensi	Hingga 90%

2.14 PCJ *Dripper*

PCJ *dripper* (*Pressure Compensating Dripper*) merupakan jenis *emitter* pada sistem irigasi tetes yang dirancang untuk menghasilkan debit aliran air yang relatif

konstan meskipun terjadi variasi tekanan dalam sistem. Prinsip kerja PCJ dripper didasarkan pada mekanisme kompensasi tekanan menggunakan membran elastis di dalam *emitter*. Ketika tekanan meningkat, membran akan menyesuaikan bukaan aliran sehingga debit tetap stabil, sedangkan pada tekanan rendah, bukaan akan diperbesar untuk mempertahankan aliran[28]. Penelitian menunjukkan bahwa *emitter* dengan mekanisme *pressure compensating* memiliki nilai koefisien variasi debit yang rendah serta mampu menjaga stabilitas aliran dalam rentang tekanan tertentu sehingga distribusi air yang tidak merata dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman yang tidak optimal[29]. Bentuk PCJ *dripper* dapat dilihat pada gambar 2. 11.



Gambar 2. 11 PCJ Dripper [27]

Dalam penelitian ini, penggunaan PCJ dripper seperti pada gambar 2.11, berfungsi sebagai media mendistribusikan air dan nutrisi dari sistem irigasi tetes ke tanaman secara merata. Karakteristik dari *pressure compensating junior* (PCJ *dripper*) seperti pada tabel 2.10 yaitu mampu menjaga debit aliran tetap stabil meskipun terjadi variasi tekanan akibat perbedaan panjang pipa atau ketinggian posisi tanam, dengan sistem yang dikontrol menggunakan *fuzzy logic* keputusan pemberian nutrisi dan durasi penyiraman yang dihasilkan oleh ESP32 harus diterjemahkan menjadi distribusi fluida yang konsisten di setiap titik tanaman.

Tabel 2. 10 Spesifikasi PCJ Dripper

Parameter	Spesifikasi
Jenis <i>dripper</i>	<i>Pressure Compensating (PCJ)</i>
Debit aliran	2,0 L/jam
Tekanan kerja	0,5-4,0 bar
Dimensi saluran air	1,03 × 0,75 × 35 mm
<i>Water passage</i>	<i>TurboNet™ labyrinth</i>

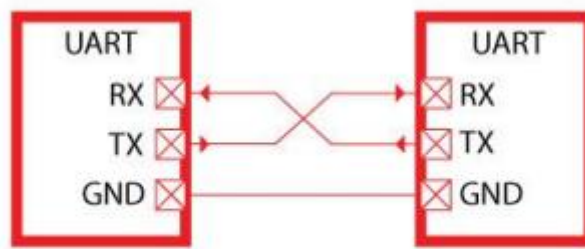
2.15 Protokol Komunikasi

Protokol komunikasi adalah seperangkat aturan yang mengatur proses pertukaran data antar perangkat dalam sistem digital, sehingga informasi dapat dikirim dan diterima dengan tepat serta efisien. Dalam sistem embedded maupun IoT, protokol komunikasi memiliki peran penting dalam memastikan integrasi antar komponen dapat berjalan dengan baik. Beberapa protokol komunikasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), I2C (*Inter Integrated Circuit*), Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*), HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*)

2.15.1 UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*)

UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) merupakan salah satu metode komunikasi data yang paling umum digunakan dalam sistem elektronik. Protokol ini bekerja secara serial dan bersifat asinkron, yang berarti proses pengiriman data tidak memerlukan sinyal *clock* tambahan. Agar komunikasi dapat berlangsung dengan baik, kedua perangkat yang terhubung cukup menyamakan kecepatan transfer data atau baud rate. Kesederhanaan mekanisme ini menjadikan UART sebagai solusi komunikasi yang efisien dan mudah diimplementasikan. Bentuk dari arsitektur komunikasi UART terlihat pada gambar

2.12

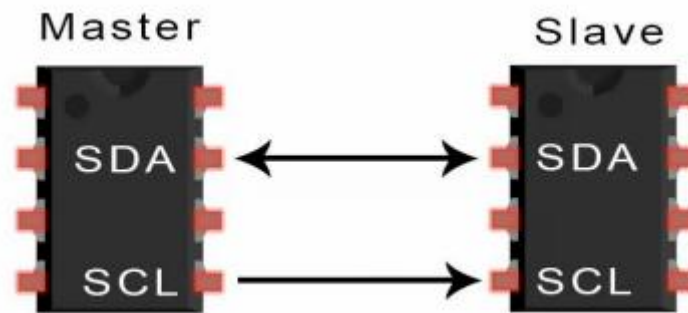


Gambar 2. 12 Komunikasi UART [20]

UART menggunakan dua jalur utama seperti gambar 2.12, yaitu TX (transmit) untuk mengirimkan data dan RX (receive) untuk menerima data. Data dikirimkan secara berurutan dalam bentuk bit, diawali dengan bit start, dilanjutkan dengan data utama, dan diakhiri oleh bit stop. Dalam penelitian ini, UART digunakan pada komunikasi antara mikrokontroler dan modul MAX485 untuk mengirimkan data dari sensor NPK. Pengiriman data dari mikrokontroler menggunakan pin TX (*transmit*) dan RX (*receive*) untuk berkomunikasi dengan MAX485. Sensor NPK umumnya mengirimkan data menggunakan standar RS485, sehingga diperlukan MAX485 sebagai konverter yang mengubah sinyal diferensial RS485 menjadi sinyal UART yang dapat diproses oleh ESP32. Sensor NPK berbasis RS485 umumnya menggunakan *baud rate* standar sebesar 9600 bps, meskipun beberapa tipe sensor dapat dikonfigurasi ke nilai lain seperti 4800 atau 19200 bps tergantung spesifikasi. *Baud rate* ini harus disamakan antara sensor, MAX485, dan ESP32 agar komunikasi berjalan dengan benar. Kelebihan dari komunikasi UART adalah implementasinya yang mudah karena hanya memerlukan dua kabel, serta sudah banyak didukung oleh berbagai jenis mikrokontroler salah satunya yaitu ESP32.

2.15.2 I2C (*Inter-Integrated Circuit*)

I2C (*Inter-Integrated Circuit*) adalah sebuah protokol komunikasi serial yang dirancang untuk memungkinkan komunikasi antar perangkat dalam suatu sistem elektronik menggunakan hanya dua kabel, yaitu SDA (*Serial Data Line*) dan SCL (*Serial Clock Line*) seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Komunikasi I2C [20]

Protokol ini bekerja dengan prinsip *master slave* seperti gambar 2.12, di mana satu perangkat master dapat mengendalikan satu atau lebih perangkat slave. I2C sangat efisien untuk digunakan dalam aplikasi yang memerlukan penghubungan beberapa perangkat dengan kebutuhan jalur kabel yang minimal, seperti dalam sistem sensor atau modul pada mikrokontroler. Kecepatan transfer data I2C bisa mencapai 400 kHz dalam mode standar, dan hingga 3.4 MHz dalam mode kecepatan tinggi. Pada penelitian ini penggunaan I2C terdapat pada komunikasi antara mikrokontroler dengan LCD.

2.15.3 Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*)

Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) merupakan protokol komunikasi serial yang banyak digunakan pada sistem instrumentasi dan otomasi industri. Modbus RTU menggunakan format data biner sehingga proses pertukaran data dapat dilakukan secara lebih ringkas. Dalam implementasinya, komunikasi dilakukan melalui mekanisme *request-response*, yaitu perangkat *master* mengirimkan permintaan kepada perangkat *slave*, kemudian perangkat *slave* memberikan respons sesuai dengan permintaan tersebut. Setiap perangkat memiliki alamat tertentu yang digunakan untuk mengidentifikasi tujuan komunikasi, sedangkan pemeriksaan kesalahan data dilakukan menggunakan *Cyclic Redundancy Check* (CRC). Modbus RTU dapat digunakan pada jaringan komunikasi RS485 dan mendukung pertukaran data seperti pembacaan maupun penulisan register pada perangkat. Penelitian Mulyadi et al. menunjukkan bahwa

implementasi komunikasi Modbus RTU melalui RS485 berbasis mikrokontroler dapat berjalan dengan baik berdasarkan pengujian menggunakan Modbus *Analyzer*.

Pada penelitian ini, Modbus RTU digunakan sebagai protokol komunikasi antara ESP32 dan sensor NPK untuk memperoleh data kandungan unsur hara tanah. ESP32 berperan sebagai *master* yang mengirimkan permintaan pembacaan data, sedangkan sensor NPK berperan sebagai *slave* yang memberikan respons berupa data kandungan nitrogen, fosfor, dan kalium. Komunikasi antara ESP32 dan sensor NPK menggunakan antarmuka RS485 melalui modul *transceiver* MAX485. Dengan demikian, Modbus RTU berfungsi sebagai protokol yang mengatur proses pertukaran data, sedangkan RS485 digunakan sebagai antarmuka komunikasi fisiknya.

2.15.4 HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*)

HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) merupakan protokol komunikasi pada lapisan aplikasi yang digunakan untuk melakukan pertukaran data antara *client* dan *server* melalui jaringan. Komunikasi HTTP menggunakan mekanisme *request-response*, yaitu *client* mengirimkan permintaan (*request*) kepada *server*, kemudian *server* memberikan respons (*response*) terhadap permintaan tersebut. Mekanisme ini banyak digunakan pada aplikasi berbasis web karena memungkinkan perangkat atau aplikasi *client* meminta data maupun layanan yang tersedia pada *server*. Pada penerapan *Internet of Things* (IoT), HTTP dapat digunakan untuk mengirimkan data dari perangkat seperti ESP32 menuju *server* atau layanan berbasis web. Penggunaan HTTP pada perangkat ESP32 juga umum diterapkan dalam sistem IoT untuk pertukaran data sensor dan kebutuhan *monitoring* [30].

Pada penelitian ini, HTTP digunakan sebagai protokol komunikasi untuk mendukung sistem *monitoring* berbasis web. Data hasil pembacaan sensor dan status sistem yang telah diproses oleh ESP32 dikirimkan melalui jaringan menggunakan mekanisme HTTP sehingga dapat diterima dan ditampilkan pada antarmuka *monitoring*. Dengan demikian, HTTP berperan dalam proses pertukaran data antara ESP32 dan sistem *monitoring* berbasis web, sedangkan proses pembacaan sensor dan pengendalian aktuator dilakukan oleh ESP32. Penerapan

ESP32 dengan HTTP untuk mengirimkan data sensor dan menampilkannya pada sistem *monitoring* berbasis web telah digunakan pada berbagai sistem IoT[31].

2.16 Buck Converter XL4016

Buck converter merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang digunakan untuk menurunkan tegangan searah (*Direct Current*) dari tingkat tegangan yang lebih tinggi menjadi tegangan yang lebih rendah. Penggunaan *buck converter* pada sistem elektronika diperlukan ketika tegangan sumber yang tersedia lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan kerja komponen yang digunakan. Proses penurunan tegangan dilakukan melalui mekanisme *switching* sehingga energi listrik dari sisi masukan dapat diatur sebelum diteruskan menuju sisi keluaran.

XL4016 merupakan IC *fixed-frequency PWM buck DC/DC converter* yang dirancang untuk aplikasi penurunan tegangan DC. IC ini menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) dengan frekuensi *switching* tetap sebesar 180 kHz. XL4016 memiliki kemampuan menghasilkan arus keluaran hingga 12 A serta memiliki efisiensi hingga 96%. Selain itu, XL4016 dilengkapi dengan *thermal shutdown*, *current limit*, dan *output short protection* untuk memberikan perlindungan terhadap kondisi operasi yang dapat menyebabkan gangguan pada rangkaian[32]. Berdasarkan karakteristik tersebut, XL4016 dapat digunakan sebagai pengendali pada rangkaian catu daya yang membutuhkan tegangan keluaran lebih rendah dari tegangan masukan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14.



Gambar 2. 14 XL4016

Prinsip kerja *buck converter* XL4016 diawali dengan masuknya tegangan DC melalui pin VIN yang kemudian diproses oleh rangkaian pengendali internal menggunakan sinyal PWM dengan frekuensi *switching* 180 kHz. Sinyal PWM mengatur kerja *power MOSFET* dengan mengendalikan lama waktu *switching* aktif sehingga energi dari sisi masukan dapat disalurkan secara terkontrol menuju rangkaian keluaran. Energi tersebut kemudian diteruskan melalui induktor dan dioda, sedangkan kapasitor pada sisi keluaran berfungsi membantu menghasilkan tegangan DC yang lebih stabil. Tegangan keluaran selanjutnya dideteksi melalui pin *feedback* dan dibandingkan dengan tegangan referensi internal sebesar 1,25 V. Hasil perbandingan tersebut digunakan oleh rangkaian pengendali untuk menyesuaikan sinyal PWM, sehingga proses *switching* dapat dikoreksi secara terus-menerus untuk mempertahankan tegangan keluaran sesuai nilai yang ditentukan.

XL4016 memiliki beberapa pin utama yang mendukung proses pengaturan tegangan, yaitu GND, FB, SW, VC, dan VIN. Pin VIN digunakan sebagai masukan tegangan DC, sedangkan pin GND digunakan sebagai referensi ground rangkaian. Pin SW merupakan titik keluaran *power switch* yang terhubung dengan rangkaian komponen daya pada sisi keluaran. Pin FB digunakan untuk mendeteksi tegangan keluaran melalui rangkaian pembagi tegangan dan memiliki tegangan referensi sebesar 1,25 V. Sementara itu, pin VC digunakan sebagai bagian dari rangkaian regulator internal. Konfigurasi pin tersebut memungkinkan XL4016 mengintegrasikan proses pengendalian *switching* dan pengaturan tegangan keluaran dalam satu IC.

Karakteristik XL4016 pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.11. Parameter yang dicantumkan meliputi tegangan masukan, rentang tegangan keluaran, kemampuan arus keluaran, frekuensi *switching*, *duty cycle* maksimum, efisiensi, serta fitur perlindungan yang tersedia pada XL4016.

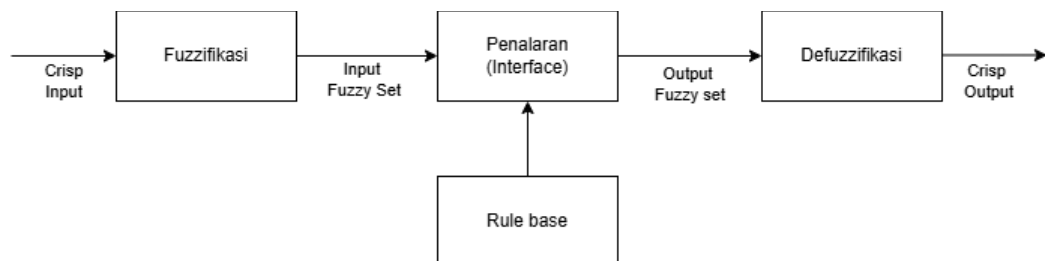
Tabel 2. 11 Spesifikasi XL4016

Parameter	Spesifikasi
Tipe konverter	<i>Step down</i> DC-DC
Tegangan input operasi	8-36 V DC

Tegangan output	1,25-32 V DC
Arus <i>output</i> maksimum	12 A
Frekuensi <i>switching</i>	180 kHz
Tegangan referensi <i>feedback</i>	$\pm 1,25V$
Efisiensi maksimum	96%

2.17 Fuzzy Logic

Logika fuzzy merupakan metode komputasi yang digunakan untuk menangani ketidakpastian, ketidaktegasan, dan hubungan antarvariabel yang tidak selalu dapat dinyatakan secara biner. Berbeda dengan logika Boolean yang hanya mengenal dua nilai kebenaran, yaitu 0 dan 1, logika fuzzy memungkinkan suatu variabel memiliki derajat keanggotaan pada rentang nilai 0 sampai 1. Dengan pendekatan ini, suatu kondisi tidak harus dinilai sepenuhnya benar atau sepenuhnya salah, tetapi dapat berada pada tingkat keanggotaan tertentu sesuai dengan karakteristiknya. Konsep ini berawal dari teori *fuzzy set* yang diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 sebagai dasar untuk memodelkan fenomena yang batasannya tidak tegas dalam sistem nyata. Dalam penerapannya, logika fuzzy menggunakan variabel linguistik seperti rendah, sedang, dan tinggi untuk menggambarkan keadaan suatu sistem secara lebih dekat dengan cara berpikir manusia, yang kemudian direpresentasikan melalui fungsi keanggotaan untuk menghubungkan data tegas (*crisp*) dengan bentuk fuzzy. Melalui mekanisme ini, sistem tidak hanya memproses angka secara matematis, tetapi juga dapat mengakomodasi penilaian yang bersifat kualitatif[33]. Pada gambar 2.15 menampilkan alur blok diagram logika fuzzy.



Gambar 2. 15 Blok Diagram Fuzzy Logic

Sistem logika fuzzy dibangun melalui tiga tahap utama seperti yang ditampilkan dalam gambar 2.15 sebagai blok diagram *fuzzy*, yaitu *fuzzification*,

proses inferensi, dan *defuzzification*. Pada tahap *fuzzification*, nilai masukan diubah terlebih dahulu menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy. Selanjutnya, sistem memproses masukan tersebut menggunakan aturan berbentuk *IF-THEN* untuk menghasilkan keluaran fuzzy berdasarkan basis pengetahuan yang telah ditetapkan. Tahap akhir, yaitu *defuzzification*, berfungsi mengubah hasil fuzzy menjadi nilai tegas agar dapat digunakan dalam pengendalian atau pengambilan keputusan.

2.17.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan tahap awal dalam sistem logika fuzzy yang berfungsi untuk mengubah data masukan tegas (*crisp input*) menjadi derajat keanggotaan pada himpunan *fuzzy*. Tahap ini diperlukan karena data dari sistem nyata pada umumnya masih berbentuk nilai numerik biasa, sedangkan proses inferensi *fuzzy* bekerja menggunakan representasi linguistik dan fungsi keanggotaan. himpunan fuzzy ditandai oleh fungsi keanggotaan yang memberikan nilai keanggotaan dari 0 sampai 1 pada setiap elemen, sehingga suatu nilai input dapat dinyatakan tidak hanya sebagai benar atau salah, tetapi juga berada pada tingkat keanggotaan tertentu[34].

Secara matematis, proses fuzzifikasi dapat dinyatakan sebagai pemetaan suatu nilai tegas x pada semesta pembicaraan X ke dalam derajat keanggotaan suatu himpunan fuzzy A , persamaan matematis tersebut dinyatakan melalui persamaan (2.2)

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (2.2)$$

dengan $\mu_A(x)$ menyatakan derajat keanggotaan nilai x terhadap himpunan fuzzy A . Jika $\mu_A(x) = 0$, maka nilai x tidak termasuk ke dalam himpunan *fuzzy* tersebut, sedangkan jika $\mu_A(x) = 1$, maka nilai x sepenuhnya termasuk ke dalam himpunan fuzzy. Nilai di antara 0 dan 1 menunjukkan keanggotaan parsial.

Model yang paling sering digunakan pada tahap fuzzifikasi adalah fungsi keanggotaan segitiga (*triangular membership function*), yang dirumuskan dengan persamaan (2.3)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.3)$$

dengan a sebagai batas bawah, b sebagai titik puncak, dan c sebagai batas atas. Selain itu, bentuk lain yang juga banyak digunakan adalah fungsi keanggotaan trapesium (*trapezoidal membership function*), yang dirumuskan dengan persamaan (2.4)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2.4)$$

dengan a , b , c , dan d sebagai parameter pembentuk kurva. Pemilihan bentuk fungsi keanggotaan penting karena akan memengaruhi hasil pemetaan input dan kinerja sistem fuzzy secara keseluruhan.

2.17.2 Rulebase

Rulebase merupakan kumpulan aturan berbentuk *IF-THEN* yang digunakan dalam metode *Fuzzy Logic* untuk menentukan keluaran sistem berdasarkan kondisi masukan. Aturan tersebut disusun berdasarkan hubungan antara kondisi masukan dan keluaran yang diharapkan pada sistem. Pada penelitian ini, *rulebase* digunakan untuk menentukan durasi pemberian nutrisi berdasarkan kondisi kandungan nitrogen tanah. Nilai kandungan nitrogen yang diperoleh dari sensor NPK digunakan sebagai dasar untuk menentukan kondisi kesalahan (*error*) terhadap nilai *setpoint* serta perubahan kesalahan (*delta error*). Kedua variabel tersebut kemudian diproses menggunakan aturan *fuzzy* untuk menghasilkan keluaran berupa durasi pengaktifan pompa dan *solenoid valve* nutrisi. Aturan *fuzzy* disusun dengan mempertimbangkan kondisi nilai *error* dan *delta error* sehingga sistem dapat menentukan durasi pemberian nutrisi sesuai dengan kondisi nitrogen tanah. Ketika nilai nitrogen berada jauh di bawah *setpoint*, sistem dapat memberikan durasi pemberian nutrisi yang lebih besar. Sebaliknya, ketika nilai nitrogen telah

mendekati *setpoint*, durasi pemberian nutrisi dapat dikurangi. Kondisi perubahan nilai *error* juga digunakan untuk mempertimbangkan arah perubahan kandungan nitrogen sehingga keputusan yang dihasilkan tidak hanya berdasarkan kondisi nitrogen pada saat pembacaan, tetapi juga mempertimbangkan perubahan nilai tersebut. Contoh aturan *rulebase* yang digunakan dalam pengendalian pemberian nutrisi dapat dinyatakan sebagai berikut:

IF error nitrogen rendah *AND* delta error menurun *THEN* durasi pemberian nutrisi kecil

IF error nitrogen sedang *AND* delta error tetap *THEN* durasi pemberian nutrisi sedang

IF error nitrogen tinggi *AND* delta error meningkat *THEN* durasi pemberian nutrisi besar

Sementara itu, proses penyiraman pada penelitian ini tidak menggunakan *Fuzzy Logic*, melainkan menggunakan metode ambang batas (*threshold*) berdasarkan nilai kelembapan tanah. Apabila nilai kelembapan tanah berada di bawah batas yang telah ditentukan, sistem mengaktifkan pompa dan *solenoid valve* air untuk melakukan penyiraman. Setelah proses penyiraman selesai, sistem melanjutkan proses pembacaan kandungan nitrogen menggunakan sensor NPK. Nilai nitrogen tersebut kemudian digunakan sebagai masukan pada pengendali *Fuzzy Logic* untuk menentukan durasi pemberian nutrisi. Dengan mekanisme tersebut, pengendalian air dan nutrisi memiliki fungsi yang berbeda, yaitu kelembapan tanah digunakan sebagai dasar keputusan penyiraman, sedangkan kandungan nitrogen digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pemberian nutrisi..

2.17.3 Penalaran (*inference*)

Inferensi *fuzzy* merupakan proses pemetaan kondisi masukan ke keluaran berdasarkan aturan *fuzzy* yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, ESP32 berperan sebagai pusat kendali yang menerima data kelembapan tanah dari *soil moisture sensor* dan data kandungan nitrogen tanah dari sensor NPK. Sensor NPK terhubung dengan ESP32 melalui modul MAX485 untuk mendukung komunikasi menggunakan RS485. Data kelembapan tanah digunakan sebagai dasar pengendalian penyiraman dengan metode ambang (*threshold*), sedangkan nilai

kandungan nitrogen digunakan sebagai masukan pada metode *Fuzzy Logic*. Nilai nitrogen tersebut dibandingkan terhadap *setpoint* untuk memperoleh nilai *error* dan *delta error*, yang selanjutnya diproses melalui tahapan fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan keluaran berupa durasi pemberian nutrisi. Hasil keluaran tersebut digunakan oleh ESP32 untuk mengendalikan pompa dan *solenoid valve* nutrisi sesuai dengan kondisi kandungan nitrogen tanah.

Karena input fuzzy hanya satu variabel, maka derajat aktivasi aturan ke-*i* dapat dinyatakan dengan persamaan (2.5)

$$\alpha_i = \mu_i(x) \quad (2.5)$$

di mana α_i adalah derajat aktivasi aturan ke-*i*, sedangkan $\mu_i(x)$ adalah derajat keanggotaan nilai nitrogen (x) dari pembacaan sensor NPK pada himpunan fuzzy tertentu. Jika digunakan metode Mamdani, maka implikasi tiap aturan dirumuskan dengan operator minimum dengan persamaan (2.6)

$$\mu_{\text{output-}i}(z) = \min(\alpha_i, \mu_{C_i}(z)) \quad (2.6)$$

Selanjutnya, hasil dari seluruh aturan digabungkan menggunakan operator maksimum yang dirumuskan dengan persamaan (2.7)

$$\mu_{\text{agregasi}}(z) = \max(\mu_1(z), \mu_2(z), \mu_3(z)) \quad (2.7)$$

Hasil agregasi tersebut kemudian digunakan untuk memperoleh durasi bukaan *valve* nutrisi. Dengan demikian, sistem inferensi pada penelitian ini menggunakan logika *fuzzy* untuk menentukan durasi penyiraman nutrisi berdasarkan kelembapan tanah, sedangkan pemberian air dilakukan menggunakan logika *threshold* berdasarkan pembacaan sensor kelembapan tanah setelah proses pemberian nutrisi selesai.

2.17.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses untuk mengubah hasil inferensi berupa himpunan fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp output*) yang dapat digunakan oleh sistem kendali. Pada penelitian ini, metode defuzzifikasi yang digunakan adalah metode *Centroid* karena menentukan nilai keluaran berdasarkan titik pusat dari daerah fuzzy hasil inferensi. Nilai tegas yang dihasilkan berupa durasi pemberian

nutrisi, yang selanjutnya digunakan oleh ESP32 sebagai dasar untuk mengatur lama pengoperasian pompa dan *solenoid valve* nutrisi.

Rumus metode centroid dinyatakan dengan persamaan (2.8)

$$z^* = \frac{\int z \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz} \quad (2.8)$$

dengan:

- z^* = nilai output tegas.
- z = nilai domain *output*.
- $\mu(z)$ = derajat keanggotaan *output*.
- dz = perubahan nilai pada domain *output*.

Output yang dihasilkan dari proses defuzzifikasi berupa durasi pemberian nutrisi dalam satuan menit. Nilai output tersebut digunakan oleh ESP32 untuk menentukan lama pengoperasian pompa dan *solenoid valve* nutrisi. Ketika nilai nitrogen tanah berada semakin jauh di bawah *setpoint*, sistem menghasilkan durasi pemberian nutrisi yang lebih besar atau lebih lama. Sebaliknya, ketika nilai nitrogen telah mendekati *setpoint*, durasi pemberian nutrisi menjadi lebih kecil sehingga jumlah nutrisi yang diberikan dapat disesuaikan dengan kondisi kandungan nitrogen tanah.

2.18 Finite State Machine

Finite State Machine (FSM) merupakan model komputasi yang digunakan untuk merepresentasikan perilaku suatu sistem berdasarkan sejumlah keadaan (*state*) yang terbatas. Setiap *state* menggambarkan kondisi tertentu yang sedang dialami oleh sistem, sedangkan perpindahan dari satu *state* ke *state* lainnya ditentukan berdasarkan masukan (*input*) dan kondisi transisi yang telah ditetapkan. Dengan demikian, FSM dapat digunakan untuk menggambarkan sistem yang memiliki alur kerja dengan beberapa kondisi berbeda dan membutuhkan respons tertentu pada setiap kondisi[35]. Secara umum, FSM terdiri atas tiga elemen utama, yaitu *state*, *input*, dan *transition*. *State* menunjukkan kondisi atau mode operasi sistem pada suatu waktu, *input* merupakan informasi yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan, sedangkan *transition* merupakan aturan yang menentukan

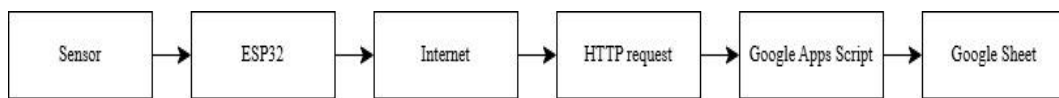
perpindahan sistem dari satu *state* ke *state* lainnya. Perubahan *state* terjadi ketika kondisi tertentu terpenuhi berdasarkan nilai masukan yang diterima sistem. Oleh karena itu, FSM dapat digunakan untuk menyusun logika pengendalian secara berurutan dan terstruktur, terutama pada sistem yang memiliki beberapa kondisi operasi[36].

Dalam penerapan sistem kendali otomatis, FSM memungkinkan proses kerja sistem dibagi menjadi beberapa *state* sesuai dengan kondisi yang ingin dikendalikan. Sistem akan melakukan pembacaan *input*, mengevaluasi kondisi yang terpenuhi, kemudian menjalankan aksi sesuai *state* yang aktif dan berpindah ke *state* berikutnya apabila kondisi transisi terpenuhi. Pendekatan tersebut sesuai digunakan pada sistem fertisasi karena proses pengendalian memiliki beberapa kondisi kerja yang harus dilakukan secara berurutan, seperti pemeriksaan kondisi nutrisi, pemberian nutrisi, pemeriksaan kelembapan tanah, hingga proses irigasi. Dengan pembagian kondisi tersebut, FSM dapat digunakan sebagai dasar penyusunan alur kendali agar setiap proses berjalan sesuai dengan kondisi dan aturan yang telah ditentukan.

2.19 Google Apps Script

Google Apps Script merupakan platform pengembangan berbasis JavaScript yang digunakan untuk mengotomatisasi dan mengintegrasikan berbagai layanan yang disediakan oleh Google, salah satunya Google Sheets. Google Apps Script dapat digunakan untuk membuat *web application* yang menerima data dari perangkat eksternal melalui jaringan internet, kemudian mengolah dan menyimpan data tersebut ke dalam Google Sheets. Dalam penerapan sistem *Internet of Things* (IoT), Google Apps Script dapat digunakan sebagai *backend* sederhana yang menghubungkan perangkat mikrokontroler dengan layanan penyimpanan berbasis *cloud*. Dengan demikian, data yang diperoleh dari sensor dapat dikirim secara otomatis dan tersimpan secara terstruktur sehingga dapat digunakan untuk pencatatan maupun *monitoring*. Penerapan ESP32-S3 dengan Google Apps Script dan Google Sheets juga telah digunakan pada sistem pertanian berbasis IoT untuk melakukan pengiriman dan pencatatan data sensor secara *real-time*[31].

Struktur komunikasi Google Apps Script pada sistem IoT secara umum terdiri atas perangkat sensor, mikrokontroler, jaringan internet, Google Apps Script, dan Google Sheets. Data yang diperoleh dari sensor terlebih dahulu diproses oleh mikrokontroler, kemudian dikirim melalui jaringan internet menggunakan metode HTTP menuju alamat *web application* Google Apps Script. Ketika menerima permintaan tersebut, fungsi pada Google Apps Script akan memproses data yang dikirim, kemudian menambahkan data ke dalam baris pada Google Sheets. Alur komunikasi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.16.



Gambar 2. 16 Komunikasi ESP dengan GAS

Struktur serupa diterapkan pada sistem *monitoring* pertanian berbasis ESP32S3, dengan Google Apps Script berperan sebagai *backend* penerima data sebelum data dicatat pada Google Spreadsheet[30].

Pada penelitian ini, Google Apps Script digunakan sebagai *web service* untuk menerima data yang dikirimkan oleh ESP32 melalui jaringan internet dan meneruskannya ke Google Sheets sebagai media penyimpanan data. Data yang dikirim meliputi hasil pembacaan sensor kelembapan tanah dan sensor NPK serta informasi mengenai status proses penyiraman dan pemberian nutrisi. Data tersebut kemudian dapat digunakan sebagai sumber informasi pada sistem *monitoring* berbasis web sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem dan riwayat pembacaan sensor. Penggunaan Google Apps Script juga memungkinkan proses pencatatan data dilakukan tanpa membangun server khusus, sehingga sesuai digunakan sebagai bagian dari sistem *monitoring* IoT yang dikembangkan. Implementasi serupa pada sistem akuisisi data berbasis ESP32 menunjukkan bahwa data sensor dapat dikirim ke Google Spreadsheet melalui Apps Script dan digunakan untuk pencatatan serta penyajian data.

2.20 Debit Aliran dan Fluida

Debit aliran merupakan salah satu parameter penting dalam sistem irigasi tetes karena menunjukkan jumlah fluida yang dapat dialirkan dalam suatu periode

waktu. Pada sistem irigasi tetes, debit perlu diperhatikan karena air didistribusikan melalui jaringan perpipaan menuju *emitter* atau *dripper*. Kurniasari et al. melakukan pengamatan terhadap distribusi debit pada beberapa titik irigasi tetes dan menunjukkan bahwa debit yang keluar pada setiap titik dapat berbeda. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh kondisi jaringan perpipaan, termasuk panjang pipa dan *drip emitter* [37].

Debit total keluaran dari beberapa PCJ dapat dinyatakan dengan persamaan (2.9)

$$Q_{total} = N \times Q_{PCJ} \quad (2.9)$$

dengan:

Q_{total} = debit total keluaran PCJ (L/jam)

N = Jumlah PCJ

Q_{PCJ} = debit keluaran masing masing PCJ (L/jam)

Debit aliran dapat ditentukan berdasarkan perbandingan antara volume fluida yang dialirkan dengan waktu yang diperlukan. Penelitian oleh Kurniasari et al. menggunakan persamaan tersebut untuk menghitung debit pada setiap titik irigasi tetes, sedangkan penelitian oleh Fakhrah et al. menggunakannya untuk menentukan debit keluaran *emitter* pada sistem irigasi tetes. Persamaan debit aliran dapat dituliskan dengan persamaan (2.10)

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.10)$$

dengan:

Q = debit aliran (L/s)

V = volume fluida (L)

t = waktu aliran (s)

Penelitian oleh Fakhrah et al. menerapkan pengukuran debit dengan menampung air yang keluar dari masing-masing *emitter* selama waktu tertentu, kemudian volume air yang terkumpul digunakan untuk menentukan debit keluaran *emitter*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa debit keluaran dapat berbeda pada setiap jalur lateral. Perbedaan tersebut berkaitan dengan jarak dan posisi *emitter* terhadap sumber air, sehingga kondisi jaringan distribusi perlu diperhatikan dalam

pengujian sistem irigasi tetes. Dalam penelitian ini, hubungan antara debit, volume, dan waktu digunakan untuk mengetahui volume fluida yang diberikan berdasarkan durasi pengoperasian sistem. Persamaan debit dapat disusun kembali menjadi persamaan volume (2.11)

$$V = Q \times t \quad (2.11)$$

dengan:

V = volume fluida (L)

Q = debit aliran (L/s)

t = durasi bukaan *valve* (s)

Persamaan tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengetahui jumlah air atau larutan nutrisi yang dialirkan selama *solenoid valve* beroperasi. Dengan demikian, debit keluaran sistem dan durasi bukaan *valve* menjadi parameter yang saling berkaitan dalam menentukan volume fluida yang diberikan melalui sistem irigasi dan fertigasi.

2.21 MAX485

Modul MAX485 merupakan perangkat yang digunakan untuk komunikasi serial berbasis RS485. Modul ini banyak dimanfaatkan dalam sistem industri dan *monitoring* karena mampu mendukung komunikasi jarak jauh serta memiliki ketahanan yang baik terhadap *noise*. RS485 bekerja dengan sistem komunikasi diferensial menggunakan dua jalur utama, yaitu A dan B, sehingga sinyal yang dikirim lebih stabil dibandingkan komunikasi serial biasa seperti UART TTL. Modul MAX485 berfungsi sebagai konverter antara sinyal UART pada mikrokontroler dengan sinyal RS485[38]. Modul MAX485 memiliki kemampuan komunikasi *half-duplex* dengan kecepatan hingga 2,5 Mbps. Modul ini bekerja pada tegangan 5V dan memiliki pin utama seperti RO (*Receiver Output*), DI (*Driver Input*), RE (*Receiver Enable*), DE (*Driver Enable*), serta terminal A dan B untuk jalur komunikasi diferensial. Dalam penggunaannya, pin RE dan DE biasanya dikontrol oleh mikrokontroler untuk menentukan mode komunikasi, yaitu mode pengiriman (*transmit*) atau penerimaan (*receive*). Wujud fisik dari MAX485 dapat dilihat pada gambar 2.17 dan tabel spesifikasi pada tabel 2.12.



Gambar 2. 17 modul MAX485 [20]

Tabel 2. 12 Spesifikasi Modul MAX485

Spesifikasi	
Tegangan <i>Input</i>	5 Vdc
Komunikasi	RS485
Kecepatan data	2,5 Mbps
<i>Interface</i>	Pin RO, DI, RE, DE, A, B
View Area	66 x 16 mm
Kegunaan	Konversi UART menjadi RS485