

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait penerapan teknologi cerdas dalam sistem fertigasi dan pengendalian nutrisi tanaman. Penelitian oleh Liu, Zhao, dan Rezaeipanah mengembangkan sistem irigasi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan menggunakan metode kontrol logika fuzzy untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan fuzzy *logic* mampu memberikan respon adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan dibandingkan dengan sistem berbasis waktu (*timer*). Namun, penelitian ini masih berfokus pada pengendalian distribusi air dan belum membahas pengelolaan konsentrasi nutrisi maupun sistem penyediaan air pada tangki sumber (*supply tank*) [3].

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Ali *et al.* mengembangkan sistem fertigasi berbasis IoT dengan metode fuzzy logic untuk mengatur pemberian air dan nutrisi secara otomatis pada tanaman hortikultura. Sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pupuk melalui pengendalian berbasis kondisi aktual. Meskipun demikian, penelitian tersebut lebih menitikberatkan pada proses distribusi nutrisi ke tanaman dan belum mengkaji secara spesifik proses pencampuran nutrisi pada tangki (*mixing tank*), serta belum mempertimbangkan monitoring ketersediaan air sebagai sumber utama dalam sistem fertigasi [4].

Penelitian lain oleh Chen *et al.* membahas penerapan fuzzy *logic controller* untuk mengatur parameter *Electrical Conductivity* (EC) dan pH pada sistem hidroponik secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode fuzzy mampu menjaga kestabilan konsentrasi nutrisi secara efektif pada sistem tertutup. Namun, penelitian ini masih terbatas pada sistem hidroponik dan belum diaplikasikan pada sistem fertigasi di lahan terbuka, serta tidak mempertimbangkan integrasi antara sistem penyimpanan air, proses pencampuran nutrisi, dan distribusi ke tanaman [5].

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode fuzzy logic memiliki potensi yang baik dalam pengendalian sistem nutrisi tanaman. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada sistem irigasi atau hidroponik, serta belum banyak yang mengkaji secara khusus proses pencampuran nutrisi pada *mixing tank* sebagai pusat pengolahan larutan fertigasi. Selain itu, aspek monitoring ketersediaan air pada tangki penyimpanan sebagai sumber suplai juga belum banyak diperhatikan, padahal hal tersebut merupakan bagian penting dalam menjaga kontinuitas sistem fertigasi.

Sebagai dasar analisis komparatif, penulis merangkum referensi tersebut dalam Tabel 2.1 yang memuat judul penelitian, fokus pembahasan, serta persamaan dan perbedaan masing-masing penelitian terhadap sistem yang dirancang dalam tugas akhir ini.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

No	Peneliti & Judul	Keterangan	Kebaharuan
1	Liu, Zhao, & Rezaeipanah (2025) – <i>Intelligent and automatic irrigation system based on IoT using fuzzy control technology</i>	Penelitian ini membahas sistem irigasi otomatis berbasis IoT dengan metode kontrol fuzzy untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air secara <i>real-time</i> .	Sistem hanya berfokus pada distribusi air, belum membahas pengendalian konsentrasi nutrisi pada proses pencampuran (<i>mixing tank</i>).
2	I. Ali et al. (2025) – <i>IoT-Based Smart Fertigation System For Citrus Plants Using Fuzzy Logic Control</i>	Penelitian ini mengembangkan sistem fertigasi berbasis IoT dengan kontrol fuzzy untuk mengatur pemberian air dan nutrisi secara otomatis.	Sistem belum mengkaji secara spesifik proses pencampuran nutrisi dalam tangki, serta belum mempertimbangkan <i>delay</i> dan dinamika <i>mixing tank</i> .
3	C. H. Chen et al. (2022) – <i>Fuzzy Logic Controller for Automating Electrical Conductivity and pH In Hydroponic Cultivation</i>	Penelitian ini menggunakan <i>fuzzy logic</i> untuk mengontrol EC dan pH pada sistem hidroponik secara otomatis.	Berfokus pada hidroponik (<i>closed system</i>) dan tidak diterapkan pada fertigasi lahan terbuka, serta tidak membahas sistem <i>mixing tank</i> sebagai sumber nutrisi.
4	M. Alimussadad et al. (2025) – <i>Smart</i>	Penelitian ini mengembangkan sistem	Sistem masih terbatas pada <i>end-point</i> (tanaman) dan

No	Peneliti & Judul	Keterangan	Kebaharuan
	<i>Hydroponic Nutrient Monitoring and Control System Using Fuzzy Logic and IoT</i>	monitoring dan kontrol nutrisi berbasis IoT dan fuzzy pada hidroponik untuk menjaga kestabilan nutrisi tanaman.	belum mengintegrasikan proses pencampuran nutrisi di tangki utama.
5	M. Neugebauer et al. (2023) – <i>Fuzzy logic control for watering system</i>	Penelitian ini menerapkan fuzzy logic untuk mengontrol sistem penyiraman tanaman secara adaptif berdasarkan kondisi lingkungan.	Hanya mengontrol penyiraman (air) tanpa mempertimbangkan nutrisi dan proses pencampuran dalam sistem fertigasi.

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem monitoring dan kontrol konsentrasi nutrisi pada *mixing tank* fertigasi berbasis ESP32, yang terintegrasi dengan monitoring tangki penyimpanan air sebagai sumber suplai, sehingga diharapkan mampu menghasilkan sistem yang lebih optimal dan aplikatif untuk pertanian hortikultura di lapangan.

2.2 Sistem Fertigasi

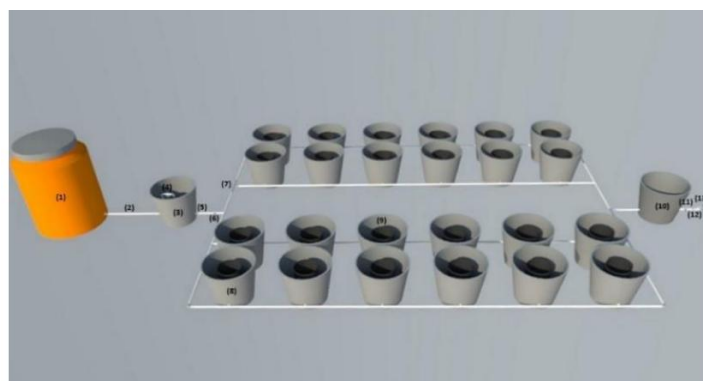
Fertigasi merupakan metode pengairan tanaman melalui irigasi mengalirkan air dan nutrisi pada tanaman. Sistem fertigasi membuat pemakaian pupuk cair dan air lebih efisien karena larutan nutrisi diberikan pada waktu, jumlah dan komposisi yang tepat Melalui penerapan sensor. Pada sistem ini, air dan nutrisi dialirkan secara bersamaan langsung ke zona perakaran tanaman melalui sistem irigasi, seperti irigasi tetes atau aliran. Penerapan metode fertigasi memungkinkan pemberian air dan unsur hara secara lebih efisien karena dosis, waktu, dan komposisi larutan dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sistem fertigasi mampu meningkatkan efisiensi budidaya serta mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual. Penerapan fertigasi otomatis dapat meningkatkan efisiensi dalam budidaya sayuran serta mendukung pengelolaan sumber daya secara lebih optimal. Selain itu, penggunaan sistem fertigasi juga dapat menekan biaya produksi sekaligus meningkatkan hasil panen karena distribusi nutrisi menjadi lebih merata pada setiap tanaman. Otomatisasi sistem berbasis mikrokontroler juga

memungkinkan pemberian nutrisi dilakukan secara konsisten sehingga mengurangi potensi kesalahan manusia dalam proses pemupukan [8], [9].

Dalam implementasinya, sistem fertigasi terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber air, tangki nutrisi (*mixing tank*), sistem distribusi irigasi, serta unit kontrol. Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah mixing tank yang berfungsi sebagai tempat pencampuran antara air dan pupuk hingga terbentuk larutan nutrisi yang homogen. Proses pencampuran dilakukan dengan melarutkan pupuk, seperti NPK, ke dalam air dengan bantuan agitasi agar diperoleh larutan yang merata.

Konsentrasi larutan nutrisi dalam *mixing tank* dikontrol menggunakan parameter *Electrical Conductivity* (EC) atau *Total Dissolved Solids* (TDS), serta pH. Pengendalian parameter tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa larutan nutrisi yang didistribusikan memiliki konsentrasi yang sesuai dengan kebutuhan tanaman. Dengan demikian, setiap tanaman dapat menerima nutrisi dalam jumlah yang seragam sehingga pertumbuhan menjadi lebih optimal serta risiko kelebihan maupun kekurangan unsur hara dapat diminimalkan.



Gambar 2. 1 Sistem Fertigasi [9]

Oleh karena itu, mixing tank tidak hanya berfungsi sebagai wadah pencampuran, tetapi juga sebagai bagian penting dalam menjaga kestabilan dan presisi konsentrasi nutrisi sebelum larutan didistribusikan ke sistem irigasi. Gambar 2.1 menunjukkan ilustrasi sederhana sistem fertigasi yang terdiri dari tangki sumber, mixing tank, serta jaringan distribusi menuju tanaman.

2.2.1 Nutrisi Larutan pada Sistem Fertigasi

Nutrisi merupakan faktor utama dalam menunjang pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Tiga unsur hara makro yang paling dibutuhkan adalah Nitrogen (N), Phosphorus (P), dan Potassium (K), yang dikenal sebagai NPK. Ketiga unsur ini memiliki fungsi fisiologis yang berbeda namun saling melengkapi dalam mendukung proses pertumbuhan tanaman.

Nitrogen berperan dalam pembentukan klorofil serta mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman. Fosfor berperan dalam perkembangan akar dan proses transfer energi dalam bentuk ATP, sedangkan kalium berfungsi dalam aktivasi enzim serta pengaturan keseimbangan air dan metabolisme tanaman [21]. Pada sistem fertigasi, nutrisi diberikan dalam bentuk larutan sehingga unsur hara dapat langsung diserap oleh akar tanaman. Hal ini menjadikan sistem fertigasi lebih efisien dibandingkan metode konvensional berbasis tanah, karena kontrol nutrisi dapat dilakukan secara lebih presisi.

Pada sistem fertigasi, pupuk NPK dilarutkan ke dalam air sehingga membentuk larutan nutrisi yang mengandung ion-ion terlarut seperti NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , dan K^+ . Larutan ini kemudian dialirkan ke zona akar tanaman sehingga proses penyerapan nutrisi menjadi lebih cepat dan efisien. Berbeda dengan pengukuran nutrisi pada tanah yang menggunakan satuan kg/ha, pada sistem larutan nutrisi digunakan satuan ppm (parts per million) atau TDS (Total Dissolved Solids) untuk menyatakan konsentrasi zat terlarut [21]. Nilai ppm menunjukkan jumlah total zat terlarut dalam air, bukan kandungan masing-masing unsur secara individual.

Ketika pupuk NPK dilarutkan ke dalam air, senyawa tersebut akan terurai menjadi ion-ion yang dapat menghantarkan listrik. Semakin tinggi jumlah ion terlarut, maka nilai konduktivitas listrik dan nilai ppm larutan juga akan meningkat. Secara matematis, hubungan antara massa pupuk dan konsentrasi larutan dapat dinyatakan sebagai berikut [34]:

$$\text{ppm} = \frac{\text{massa zat terlarut (mg)}}{\text{volume larutan (L)}} \quad (2.1)$$

Karena dalam praktik massa pupuk dinyatakan dalam gram, maka persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi:

$$\text{ppm} = \frac{\text{massa (gram)} \times 1000}{\text{volume (L)}} \quad (2.2)$$

Jika pupuk yang digunakan merupakan pupuk majemuk seperti NPK, maka konsentrasi masing-masing unsur dapat dihitung berdasarkan persentase kandungannya:

$$\text{ppm unsur} = \frac{\text{massa pupuk} \times \% \text{unsur} \times 1000}{\text{volume (L)}} \quad (2.3)$$

Namun demikian, pada sistem nyata yang menggunakan sensor TDS, nilai yang diperoleh merupakan total konsentrasi ion terlarut, sehingga tidak dapat membedakan kandungan Nitrogen, Phosphorus, dan Potassium secara individual. Oleh karena itu, nilai ppm yang digunakan dalam sistem kontrol merupakan representasi dari total nutrisi dalam larutan [4].

Dalam sistem monitoring dan kontrol berbasis IoT, nilai ppm diperoleh dari sensor TDS yang bekerja dengan prinsip pengukuran konduktivitas listrik larutan. Nilai ini kemudian digunakan sebagai parameter utama dalam proses pengendalian nutrisi secara otomatis [4].

Air yang digunakan dalam sistem fertigasi umumnya telah mengandung zat terlarut alami sebelum dilakukan penambahan nutrisi. Nilai TDS awal ini perlu diperhatikan karena akan mempengaruhi hasil pembacaan sensor serta proses pengendalian nutrisi. Secara umum, rentang nilai TDS air adalah sebagai berikut: air murni (*reverse osmosis*) berada pada kisaran 0 hingga 50 ppm, air PDAM berada pada kisaran 50 hingga 150 ppm, sedangkan air sumur dapat berada pada kisaran 100 hingga 400 ppm. Dalam penelitian sistem kontrol nutrisi hidroponik, kondisi awal larutan sebelum penambahan nutrisi dapat berada pada nilai tertentu, misalnya sebesar 79 ppm, yang menunjukkan adanya kandungan zat terlarut awal dalam air [4]. Pada penerapan tugas akhir penentuan *setpoint* untuk nutrisi TDS (*Total Dissolved Solid*) sebesar 500 ppm mengacu pada dosing tanaman masa vegetatif, Oleh karena itu, nilai awal ini perlu diperhitungkan dalam proses pengendalian agar konsentrasi nutrisi yang diinginkan dapat tercapai.

2.3 Mixing Tank

Mixing tank pada sistem fertigasi berfungsi sebagai wadah utama untuk mencampurkan air dengan larutan nutrisi sebelum dialirkan ke tanaman. Fungsi ini sangat krusial karena kualitas pencampuran akan menentukan kestabilan konsentrasi nutrisi yang diterima tanaman. Dalam sistem fertigasi modern, mixing tank tidak hanya berperan sebagai tempat penampungan, tetapi juga sebagai unit proses yang memastikan larutan homogen dan sesuai dengan set point yang diinginkan [10]. Selain itu, penggunaan tangki pencampur memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap volume dan rasio nutrisi, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan air [11]. Proses pencampuran nutrisi dalam mixing tank umumnya dilakukan dengan bantuan agitator atau sirkulasi aliran fluida. Pada sistem otomatis, pencampuran dilakukan dengan menginjeksikan larutan nutrisi secara bertahap hingga mencapai nilai konsentrasi tertentu berdasarkan pembacaan sensor, seperti TDS.

2.3.1 Model Matematis Mixing Tank

Model matematis mixing tank dapat dijelaskan menggunakan prinsip neraca massa untuk menggambarkan perubahan konsentrasi larutan di dalam tangki. Secara umum, laju perubahan konsentrasi dipengaruhi oleh aliran masuk, aliran keluar, serta volume larutan dalam tangki, yang dinyatakan sebagai [12]:

$$V \frac{dC(t)}{dt} = Q_{in}C_{in} - Q_{out}C(t) \quad (2.4)$$

di mana V adalah volume tangki, $C(t)$ adalah konsentrasi larutan di dalam tangki pada waktu t , C_{in} adalah konsentrasi larutan yang masuk, serta Q_{in} dan Q_{out} adalah debit aliran masuk dan keluar.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi dalam tangki ditentukan oleh selisih antara jumlah nutrisi yang masuk dan yang keluar dari sistem. Pada kondisi tertentu dengan volume konstan, biasanya berlaku $Q_{in} = Q_{out}$, sehingga sistem dapat direpresentasikan sebagai sistem dinamik orde satu. Namun, model tersebut umumnya dibangun dengan asumsi pencampuran sempurna (*perfect mixing*), di mana konsentrasi larutan dianggap seragam di seluruh volume

tangki. Pada kondisi nyata, asumsi ini belum tentu dapat terjadi sehingga sistem menunjukkan karakteristik non-homogen dan non-linear.

Secara fisik, ketidakseragaman konsentrasi dapat terjadi akibat distribusi aliran yang tidak merata, keterbatasan proses difusi, serta pola sirkulasi fluida yang dipengaruhi oleh kinerja agitator. Hal ini menyebabkan nilai konsentrasi yang terbaca pada satu titik belum tentu merepresentasikan kondisi rata-rata seluruh tangki [12].

Selain itu, hubungan antara variabel input dan output pada sistem juga tidak sepenuhnya linier. Perubahan debit aliran, kondisi pencampuran, serta karakteristik fluida menyebabkan respon sistem tidak selalu proporsional terhadap perubahan input. Kondisi ini juga menimbulkan fenomena waktu pencampuran (*mixing time*) dan keterlambatan respon (*time delay*), di mana sistem memerlukan waktu tertentu untuk mencapai kondisi homogen setelah terjadi perubahan input.

Oleh karena itu, pada penelitian ini tidak digunakan model matematis secara eksplisit sebagai dasar pengendalian. Sebagai gantinya, digunakan pendekatan logika fuzzy yang mampu mengakomodasi ketidaklinieran dan ketidakpastian sistem tanpa memerlukan model matematis yang kompleks, sehingga lebih sesuai untuk diterapkan pada sistem kontrol konsentrasi nutrisi pada *mixing tank*.

2.3.2 Persamaan Ideal Perancangan Tangki Pengaduk

Untuk menciptakan sistem yang optimal dalam merancang alat diperlukan perhitungan untuk kondisi ideal tangki dengan persamaan berikut [35] :

$$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3} ; \frac{H}{Dt} = 1 ; \frac{E}{Da} = \frac{1}{3} ; \frac{W}{Dt} = \frac{1}{5} ; \frac{L}{Da} = \frac{1}{4} \quad (2.4)$$

dimana :

Da = Diamter Impeller

W = Lebar Baffle

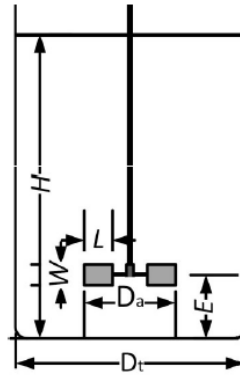
Dt = Diameter Tangki

L = Panjang Blade

H =Tinggi Tangki

E = Jarak Impeller dari Dasar Tangki

Gambar 2.2 menunjukkan hubungan rasio geometris antara dimensi tangki dan sistem pengaduk yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan matematis mixing tank.



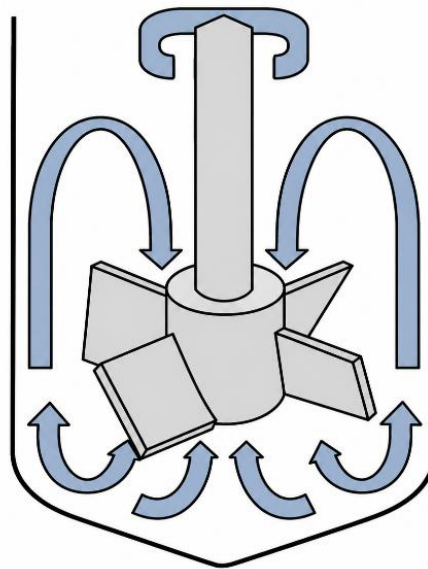
Gambar 2. 2 Tangki dan Pengaduk [11]

Tangki berbentuk silinder dengan diameter D_t dan tinggi cairan H , di mana rasio $\frac{H}{D_t} = 1$ menandakan tinggi cairan sama dengan diameter tangki (tangki proporsional). Di dalam tangki terdapat impeller (pengaduk) dengan diameter D_a yang dipasang pada poros vertikal, serta baffle (sekat) dengan lebar W untuk mencegah pusaran (vortex) dan meningkatkan efisiensi pencampuran. Rasio $\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$ menunjukkan ukuran impeller relatif terhadap tangki, sedangkan $\frac{W}{D_t} = \frac{1}{5}$ menentukan ukuran baffle. Jarak impeller dari dasar tangki E memenuhi $\frac{E}{D_a} = \frac{1}{3}$ yang berpengaruh terhadap distribusi aliran fluida. Selain itu, panjang blade atau elemen pengaduk L memiliki rasio $\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$, yang memengaruhi gaya geser dan pola aliran dalam fluida.

Dalam konteks perancangan persamaan tangki, rasio-rasio ini penting karena menentukan karakteristik aliran (laminar atau turbulen), homogenitas konsentrasi, serta konstanta pencampuran dalam model dinamik. Dimensi ini akan memengaruhi parameter seperti volume tangki V , laju aliran masuk dan keluar (Q_{in} , Q_{out}), serta distribusi konsentrasi $C(t)$. Dengan asumsi pencampuran sempurna (perfect mixing), model matematis dapat diturunkan menggunakan neraca massa, namun akurasi model sangat bergantung pada kesesuaian desain geometris seperti yang ditunjukkan pada gambar tersebut [11].

2.3.3 Pengaduk Turbin

Turbin merupakan pengaduk dengan sudut tegak datar dan bersudut konstan. Pengaduk jenis ini digunakan pada viskositas fluida rendah seperti halnya pengaduk jenis *propeller*. Pengaduk turbin menimbulkan aliran arah radial dan tangensial. Di sekitar turbin terjadi daerah turbulensi yang kuat, arus dan geseran yang kuat antar fluida. Salah satu jenis pengaduk turbin adalah *pitched blade*. Pengaduk jenis ini memiliki sudut sudu konstan. Aliran terjadi pada arah aksial, meski demikian terdapat pula aliran pada arah radial. Aliran ini akan mendominasi jika sudu berada dekat dengan dasar tangki. Pada turbin dengan daun yang dibuat miring sebesar 45° , beberapa aliran aksial akan terbentuk sehingga sebuah kombinasi dari aliran aksial dan radial akan terbentuk.



Gambar 2. 3 Impeller [22]

Jenis ini berguna dalam suspensi padatan karena aliran langsung ke bawah dan akan menyapu padatan ke atas. Terkadang sebuah turbin dengan hanya empat daun miring digunakan dalam suspensi padat. Pengaduk dengan aliran aksial menghasilkan pergerakan fluida yang lebih besar dan pencampuran. Perancangan implaller yang digunakan dalam penelitian menggunakan agitator berjenis *Turbine Disc Pitch Blade* [22].

2.4 Dinamo Motor High Torsi 350W 12V/24V (7146)

Motor listrik dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Kebanyakan motor listrik beroperasi saat terjadi interaksi medan magnet dan konduktor pembawa arus untuk menghasilkan putaran. Motor DC sendiri memiliki komponen penyusun seperti *rotor* dan *stator*, *rotor*. *Rotor* terdiri dari as, inti, kumparan jangkar dan komutator [15].



Gambar 2. 4 Dinamo 350 Watt

Penyusunan tugas akhir menggunakan dinamo. Dinamo dibedakan menjadi dua yaitu, dinamo arus searah (DC) dan dinamo arus bolak balik (AC). Penyusunan tugas akhir menggunakan dinamo motor high torsi 350W 12V/24V (7146) seperti pada Gambar 2.4 merupakan jenis motor listrik arus searah (DC) yang dirancang untuk menghasilkan torsi besar pada tegangan kerja rendah, yaitu 12V atau 24V. Motor ini banyak digunakan pada aplikasi industri skala kecil hingga menengah karena kemampuannya dalam memberikan gaya putar yang stabil dan kuat pada beban tinggi [16]. Prinsip kerja dinamo sama dengan generator yaitu memutar kumparan di dalam medan magnet atau memutar magnet di dalam kumparan. Bagian dinamo yang berputar disebut rotor. Bagian dinamo yang tidak bergerak disebut stator.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Dinamo

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Voltase	12 - 24	Volt	<i>Direct Current</i>
Daya	350	Watt	-
Torsi	15	N.m	-
Rotasi	270	RPM	-

Motor listrik arus searah (DC) dalam sistem ini dimodelkan menggunakan pendekatan matematis yang menghubungkan aspek kelistrikan dan mekanik. Secara umum, hubungan tegangan pada motor DC dinyatakan sebagai [36]:

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri + K_e \omega \quad (2.5)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa tegangan input V digunakan untuk mengatasi resistansi kumparan (Ri), perubahan arus akibat induktansi ($L \frac{di}{dt}$), serta gaya gerak listrik balik (back electromotive force) sebesar $K_e \omega$ yang sebanding dengan kecepatan putaran motor. Seiring meningkatnya kecepatan putaran, nilai back EMF juga meningkat sehingga secara alami membatasi kecepatan maksimum motor.

Torsi yang dihasilkan oleh motor DC berbanding lurus dengan arus yang mengalir pada kumparan, yang secara matematis dinyatakan sebagai [36]:

$$T = K_t i \quad (2.6)$$

Dimana T adalah torsi motor dan K_t merupakan konstanta torsi. Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan arus akan menghasilkan peningkatan torsi, sehingga parameter arus menjadi sangat penting dalam menentukan kemampuan motor untuk menggerakkan beban, khususnya pada aplikasi pengadukan fluida.

Dari sisi mekanik, dinamika pergerakan motor dapat dijelaskan melalui persamaan [36]:

$$J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = T - T_L \quad (2.7)$$

dimana J merupakan momen inersia rotor, b adalah koefisien gesekan, dan T_L adalah torsi beban. Persamaan ini menunjukkan bahwa kecepatan sudut motor dipengaruhi oleh selisih antara torsi yang dihasilkan motor dan torsi beban dari sistem, dalam hal ini adalah beban pengadukan fluida pada mixing tank.

Oleh karena itu, digunakan faktor keamanan dalam pemilihan motor dengan mengalikan kebutuhan daya teoritis sebesar 2 hingga 5 kali lipat. Dengan demikian, kebutuhan daya aktual berada pada kisaran 40 hingga 100 Watt atau lebih, tergantung kondisi operasional. Berdasarkan pertimbangan tersebut, dipilih motor DC dengan daya 350 Watt, torsi 15 Nm, dan kecepatan 270 rpm. Pemilihan ini bertujuan untuk memastikan motor mampu mengatasi beban awal, menjaga kestabilan putaran selama proses pencampuran, serta menghindari kondisi overload. Dengan demikian, meskipun secara teoritis daya yang dibutuhkan relatif kecil, penggunaan motor dengan daya lebih besar dinilai tepat untuk menjamin keandalan dan performa sistem secara keseluruhan.

2.5 Driver Motor BTS7960

Motor driver BTS7960 atau sering dikenal modul IBT-2 adalah perangkat *driver H-bridge* DC berarus tinggi yang dirancang untuk mengendalikan motor DC dalam sistem otomasi dan robotika. Modul ini menggunakan dua *half-bridge* driver BTS7960 yang digabung dalam sebuah *full-bridge*, sehingga mampu menghasilkan arus keluaran kontinu hingga 43 A dan tegangan suplai motor dalam rentang 6 V hingga 27 V, menjadikannya cocok untuk motor DC berdaya menengah hingga tinggi. BTS7960 menerima sinyal logika 3,3 – 5 V dari mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32, dan menggunakan metode PWM (Pulse Width Modulation) untuk mengendalikan kecepatan putaran motor, serta tombol kontrol nilai *duty cycle* dari 0 hingga 100 % untuk mengatur kecepatan motor secara linier.

Dalam kajian aplikatif pada sistem *power switching* untuk inverter, motor driver BTS7960 telah dipelajari sebagai salah satu solusi H-bridge yang mampu mengendalikan putaran motor DC secara efektif dan robust ketika dioperasikan pada frekuensi PWM yang tepat, serta memberikan kestabilan pengendalian arah putaran melalui dua sinyal PWM yang independent [17]. Terlihat pada Gambar 2.4 Untuk modul BTS 7960.



Gambar 2. 5 Modul BTS 7960

Selain itu, modul driver BTS7960 juga memiliki fitur proteksi dan isolasi yang penting untuk operasi motor DC berarus tinggi. Modul ini biasanya dilengkapi proteksi overcurrent, overtemperature, dan proteksi hubungan pendek yang membantu mencegah kerusakan pada perangkat saat beban tiba-tiba berubah atau terjadi lonjakan arus, serta isolasi logika terhadap power agar gangguan tidak merambat ke mikrokontroler pengendali. Konfigurasi H-bridge memungkinkan motor berputar baik maju maupun mundur hanya dengan memberikan sinyal PWM yang sesuai pada pin kontrol RPWM dan LPWM, serta pin enable (R_EN dan L_EN) yang mengaktifkan sisi kanan atau kiri dari jembatan H-bridge. Ketika satu sisi PWM diberi sinyal PWM dan sisi lainnya diset LOW, motor akan berputar ke satu arah, sedangkan membalik sinyal PWM akan memutar motor ke arah sebaliknya. Penerapan prinsip kerja ini dalam perangkat motor driver dengan PWM pulsed control meningkatkan efisiensi dan respons dinamik pada pengendalian motor, sebagaimana ditunjukkan dalam banyak implementasi kontrol motor modern menggunakan driver H-bridge dan PWM, yang dibahas dalam literatur kontrol motor DC dan driver H-bridge pada berbagai kasus aplikasi industri dan robotika. Untuk spesifikasi modul dapat terlihat pada Tabel 2.3 Spesifikasi Modul BTS7960.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Modul BTS7960

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Model	IBT-2	-	Modul berbasis dual BTS7960
Tegangan Input (Motor Supply)	6 – 27	V DC	Tegangan suplai motor
Arus Maksimum	43	A	Arus maksimum teoritis

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Tegangan Level Logika	3.3 – 5	V	Tegangan kontrol dari mikrokontroler
Mode Kontrol	PWM / Level	-	Kontrol kecepatan dan arah
Duty Cycle PWM	0 – 100	%	Pengaturan kecepatan motor
Konfigurasi	H-Bridge	-	Full bridge dua arah
Arah Putaran	Maju / Mundur	-	Kontrol dua arah
Proteksi Overcurrent	Ya	-	Perlindungan arus berlebih
Proteksi Overtemperature	Ya	-	Perlindungan suhu berlebih
Frekuensi PWM Maksimum	±25	kHz	Tergantung konfigurasi sistem
Tipe Motor	DC Brushed	-	Untuk motor DC sikat

Untuk dapat mengoperasikan modul BTS7960 secara optimal, diperlukan pemahaman terhadap konfigurasi pin yang tersedia pada modul tersebut. Setiap pin memiliki fungsi spesifik, baik sebagai input kontrol dari mikrokontroler seperti PWM dan sinyal logika, maupun sebagai jalur daya untuk motor dan sumber tegangan. Oleh karena itu, tabel pin BTS7960 disusun untuk memberikan informasi yang jelas mengenai fungsi masing-masing pin, sehingga memudahkan dalam proses perancangan, pengkabelan, serta integrasi dengan sistem kontrol berbasis mikrokontroler seperti ESP32 atau Arduino. Untuk tabel konfigurasi terlihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Konfigurasi Pin Motor Driver BTS7960 (IBT-2)

Nama Pin	Jenis	Fungsi	Keterangan
RPWM	Input	Kontrol PWM sisi kanan	Mengatur arah dan kecepatan (arah maju jika aktif)
LPWM	Input	Kontrol PWM sisi kiri	Mengatur arah dan kecepatan (arah mundur jika aktif)
R_EN	Input	Enable sisi kanan	Mengaktifkan half-bridge kanan (HIGH = aktif)
L_EN	Input	Enable sisi kiri	Mengaktifkan half-bridge kiri (HIGH = aktif)
VCC	Input	Tegangan logika	3.3V – 5V dari mikrokontroler
GND	Ground	Ground logika & sistem	Harus terhubung dengan ground mikrokontroler

Nama Pin	Jenis	Fungsi	Keterangan
B+	Power Input	Tegangan motor positif	6V – 27V DC
B-	Power Input	Ground motor	Ground supply motor
M+	Output	Terminal motor positif	Ke motor DC
M-	Output	Terminal motor negatif	Ke motor DC

2.6 Power Supply 24 VDC

Catu daya atau sering disebut dengan *power supply* adalah perangkat elektronika yang berguna sebagai sumber daya untuk perangkat lain. Secara umum istilah catu daya berarti suatu sistem penyearah-filter yang mengubah AC menjadi DC murni. Rangkaian *power supply* 24V pada penelitian ini berperan sebagai sumber utama energi listrik untuk seluruh perangkat dalam sistem *mixing tank* berbasis ESP32. *Power supply* ini menyediakan tegangan DC stabil sebesar 24 volt, untuk menghidupkan komponen yang terintegrasi, yang bekerja dengan efisiensi tinggi melalui proses penyearahan arus AC, penyaringan (*filtering*), dan *switching* frekuensi tinggi, sehingga menghasilkan output tegangan DC yang stabil [18].

Penggunaan *power supply* jenis *switching* pada sistem 24V DC menjamin keamanan rangkaian, terutama saat terjadi lonjakan arus dari beban induktif pertama kali dinyalakan (*inrush current*) karena memiliki proteksi seperti *overvoltage protection* (OVP), *overcurrent protection* (OCP), *short circuit protection* (SCP), dan *over temperature protection* (OTP)[27]. Untuk penelitian ini digunakan catu daya input 220V dan output 24V 5A. Bentuk fisik catu daya dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Power Supply* 24V DC 20A [18]

Untuk memastikan bahwa *power supply* dapat mendukung seluruh beban secara stabil, dilakukan estimasi daya total dari seluruh komponen sistem. Berdasarkan perhitungan:

$$P_{total} = V \times I = 24V \times 20A = 480 \text{ Watt} \quad (2.15)$$

Daya 480 Watt ini menjadi daya maksimum yang dapat disuplai secara kontinu. Daya tersebut lebih dari cukup untuk kontroller, transmitter, serta aktuator yang digunakan dalam sistem. Berikut data spesifikasi *power supply* 24 V DC pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Spesifikasi <i>Power Supply</i> 24 V DC	
Spesifikasi	Nilai
Tegangan	24 V
Arus	5 A
Daya	480 Watt
Tegangan Input	AC 100-240V

2.7 LCD I2C

LCD I2C (*Liquid Crystal Display* berbasis *Inter-Integrated Circuit*) merupakan perangkat tampilan karakter yang menggunakan komunikasi serial untuk mengurangi kompleksitas koneksi dengan mikrokontroler. Berbeda dengan LCD konvensional yang menggunakan banyak pin paralel, LCD I2C hanya memanfaatkan dua jalur utama yaitu Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL), sehingga lebih efisien dalam penggunaan pin serta mempermudah integrasi pada sistem embedded [19].



Gambar 2. 7 LCD I2C [19]

Penggunaan protokol I2C pada LCD memungkinkan konversi sinyal dari serial menjadi paralel melalui suatu modul antarmuka, sehingga data dari

mikrokontroler tetap dapat diproses oleh LCD. Selain itu, komunikasi I2C bersifat sinkron dan menggunakan sistem addressing, di mana setiap perangkat memiliki alamat unik. Hal ini memungkinkan beberapa perangkat terhubung dalam satu jalur komunikasi tanpa konflik, sehingga sangat sesuai untuk sistem otomasi dan monitoring berbasis mikrokontroler. Bentuk fisik LCD I2C yang digunakan pada Gambar 2.7.

Tabel 2. 6 Spesifikasi dan Pin LCD I2C

Parameter	Keterangan
Tegangan Kerja	5V
Interface	I2C (SDA, SCL)
Alamat I2C	0x27 / 0x3F
Mode Komunikasi	Serial (I2C)

Dalam implementasinya, LCD I2C banyak digunakan karena kemudahan instalasi serta efisiensi wiring. Sistem ini juga mampu mengurangi jumlah pin kontrol dari sekitar 14 pin pada LCD paralel menjadi hanya 2 pin, tanpa mengurangi fungsi utama dari tampilan. Selain itu, komunikasi I2C memiliki keunggulan seperti kompleksitas rangkaian yang rendah, ketahanan terhadap gangguan, serta kemampuan untuk menghubungkan banyak perangkat dalam satu bus komunikasi.

Tabel 2.7 Pin konfigurasi I2C

Nama Pin	Fungsi
VCC	Tegangan 5V
GND	Ground
SDA	Jalur data I2C
SCL	Jalur clock I2C
A0	Address bit
A1	Address bit
A2	Address bit

Meskipun demikian, penggunaan I2C pada LCD memiliki keterbatasan pada kecepatan transfer data dibandingkan dengan metode komunikasi lain seperti SPI. Hal ini dapat mempengaruhi refresh rate tampilan, terutama pada aplikasi dengan kebutuhan kecepatan tinggi. Terlihat Tabel 2.6 untuk konfigurasi LCD yang dihubungkan dengan modul I2C. Namun, untuk aplikasi monitoring dan kontrol

yang tidak membutuhkan kecepatan tinggi, penggunaan LCD I2C masih sangat efektif dan efisien [19].

2.8 Sensor Ultrasonik JSN-SR04T

JSN-SR04T adalah sensor ultrasonik yang merupakan hasil upgrade dari HC-SR04, dengan fitur tahan air hingga rentang pengukuran 500 cm. Terlihat pada Gambar 2.8 untuk sensor *ultrasonic* [37].



Gambar 2.8 Sensor JSN-SR04T [37]

Gambar 2.8 merupakan sensor JSN-SR04T yang memiliki kabel built-in terhubung ke modul dengan panjang 2,5 m dan rentang tegangan 3-5 Volt untuk pemrosesan sinyal. Sensor JSN-SR04T bekerja berdasarkan mekanisme transmisi dan penerimaan gelombang ultrasonik yang dikendalikan melalui pin Trig dan Echo. Proses pengukuran dimulai ketika mikrokontroler memberikan sinyal HIGH minimal selama 10 μ s pada pin Trig. Sinyal ini memicu rangkaian internal untuk menghasilkan gelombang ultrasonik dengan frekuensi sekitar 40 kHz [37].

Gelombang ultrasonik dipancarkan melalui transduser piezoelektrik dalam bentuk burst (sekitar 8 siklus gelombang). Transduser mengubah energi listrik menjadi getaran mekanik yang merambat di udara dengan kecepatan sekitar 343 m/s. Ketika gelombang mengenai objek, sebagian energi akan dipantulkan kembali menuju sensor. Pantulan tersebut diterima kembali oleh transduser, kemudian diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal ini diperkuat dan difilter oleh rangkaian internal sebelum diproses lebih lanjut. Modul kemudian mengeluarkan sinyal HIGH pada pin Echo selama durasi waktu tempuh gelombang dari sensor ke objek dan kembali ke sensor. Mikrokontroler mengukur durasi sinyal HIGH pada pin Echo sebagai

waktu tempuh total (time of flight), kemudian jarak dihitung menggunakan persamaan [37]:

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (2.8)$$

dengan v adalah kecepatan suara di udara dan t adalah waktu tempuh gelombang. Pembagian dua dilakukan karena gelombang menempuh jalur bolak-balik. Dalam implementasinya, sensor ini akan digunakan sebagai monitoring dan *trigger* untuk memastikan fluida dalam tangki tersedia sebelum terdistribusi. Telihat Tabel spesifikasi pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Spesifikasi sensor JSN-SR04T

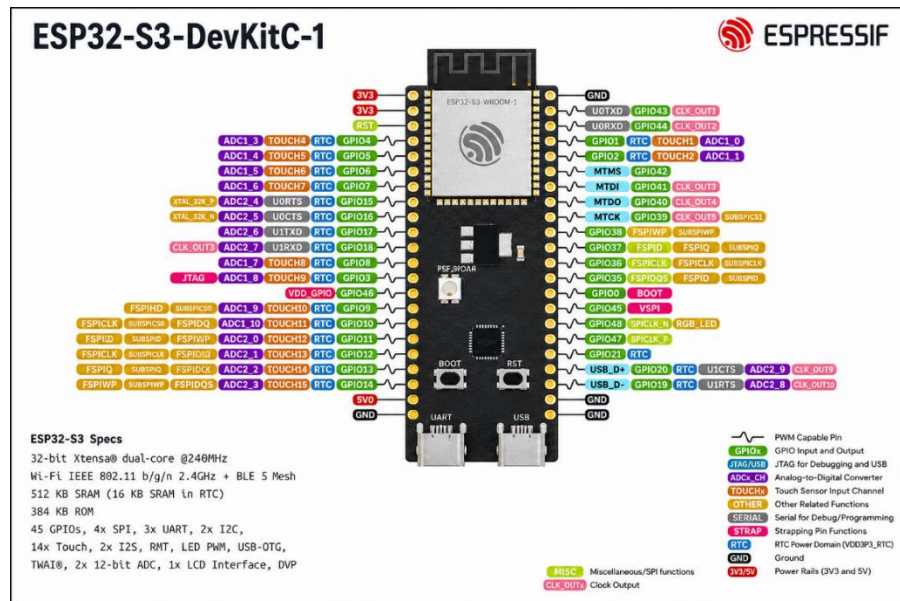
Parameter	Nilai
Tegangan Operasi	3 – 5 V DC
Arus Operasi	±30 mA
Jarak Ukur	20 – 500 cm
Frekuensi	40 kHz
Akurasi	±0.5 – 1 cm
Sudut Deteksi	±50°
Output	Digital
Panjang Kabel	±2.5 m
Tipe Sensor	Ultrasonik Waterproof
Resolusi	0.3 cm
Waktu Respon	< 50 ms

2.9 ESP 32 S3

ESP32-S3 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems merupakan pengembangan lebih lanjut dari seri sebelumnya seperti ESP8266 dan ESP32. Mikrokontroler ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan sistem embedded dan *Internet of Things* (IoT) dengan performa tinggi serta konsumsi daya yang rendah. Untuk unit terlihat pada Gambar 2.9.

Salah satu keunggulan utama ESP32-S3 adalah telah terintegrasinya konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth Low Energy (BLE) dalam satu chip. Hal ini memungkinkan perangkat untuk terhubung secara nirkabel tanpa memerlukan modul tambahan, sehingga sangat mempermudah dalam pengembangan sistem IoT. Dibandingkan dengan ESP8266 yang hanya mendukung Wi-Fi, ESP32-S3

menawarkan fitur yang lebih lengkap dengan dukungan Bluetooth serta peningkatan performa sistem.



Gambar 2. 9 ESP32-S3 [20]

ESP32-S3 menggunakan prosesor dual-core Xtensa® LX7 32-bit dengan frekuensi kerja hingga 240 MHz, sehingga mampu menangani berbagai proses komputasi secara efisien. Selain itu, mikrokontroler ini juga dilengkapi dengan Ultra-Low-Power (ULP) coprocessor yang memungkinkan sistem tetap berjalan dalam kondisi konsumsi daya rendah, terutama pada mode sleep [20].

Dalam hal antarmuka, ESP32-S3 memiliki jumlah GPIO yang cukup banyak serta dilengkapi berbagai periferal seperti ADC, PWM, UART, I2C, SPI, dan I2S. Fitur ini memungkinkan ESP32-S3 untuk diintegrasikan dengan berbagai sensor dan aktuator dalam suatu sistem kendali. Selain itu, ESP32-S3 juga mendukung USB OTG yang memberikan fleksibilitas lebih dalam komunikasi data. Pada penelitian ini ESP32SE digunakan sebagai pusat kontrol untuk *input* transmitter, *ouput* aktuator maupun monitoring sistem. Tabel spesifikasi terdapat pada Tabel 2.9.

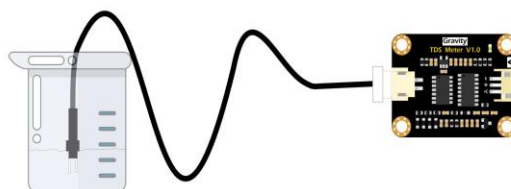
Tabel 2.9 Spesifikasi ESP3-2S3

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Operasi	3.3	V
Tegangan Input (VIN)	3.3 - 5	V
Standar Wi-Fi, Bluetooth	802.11 b/g/n, Bluetooth 5 (BLE)	-

Parameter	Nilai	Satuan
Digital I/O (GPIO)	45	pin
Analog Input (ADC)	20 channel	pin
UART	3	port
SPI	4 (SPI0/1/2/3)	port
I2C, I2S	2, 2	port
Memori SRAM	512	KB
ROM	384	KB
Flash Memory	Eksternal (hingga 16 MB tergantung varian)	MB
Resolusi ADC	12	bit
Frekuensi Clock Maksimum	240	MHz
PWM	Hingga 8 channel LED PWM	-
USB	USB OTG & USB Serial/JTAG	-
Timer	4 GP Timer + System Timer	-
Mode Wi-Fi	STA, AP, AP+STA	-
Mode Daya	Active, Modem-sleep, Light-sleep, Deep-sleep	-
Konsumsi Deep Sleep	± 7	μA
Keamanan	AES, SHA, RSA, Secure Boot	-
Interface SD Card	Supported (SD/MMC)	-
Dimensi Chip	7×7 (QFN56)	mm

2.10 TDS Sensor

TDS (*Total Dissolved Solids*) merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan jumlah zat padat terlarut dalam air yang dinyatakan dalam satuan ppm (parts per million) di mana semakin tinggi nilai TDS maka semakin banyak zat terlarut dalam air dan kualitas air cenderung menurun [7].



Gambar 2.10 Sensor TDS [7]

Sensor TDS merupakan perangkat yang digunakan untuk mengukur nilai TDS dalam suatu larutan, khususnya air. Sensor ini bekerja dengan prinsip konduktivitas

listrik, yaitu dengan mengukur kemampuan air dalam menghantarkan arus listrik. Semakin tinggi kandungan zat terlarut dalam air, maka konduktivitas listriknya juga semakin tinggi, sehingga nilai TDS yang terbaca akan meningkat. Sensor terlihat pada Gambar 2.10.

Pada penyusunan tugas akhir, sensor TDS digunakan sebagai perangkat input untuk mendeteksi kadar NPK terlarut pada mixing tank. Sensor ini menghasilkan sinyal analog berupa tegangan yang kemudian dibaca oleh mikrokontroler (ESP32-S3) melalui pin ADC. Tegangan output sensor berada pada rentang 0 – 2,3 V, sehingga kompatibel dengan sistem mikrokontroler berbasis 3,3 V. tabel spesifikasi sensor pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Spesifikasi sensor TDS

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Input	3.3 – 5.5	V
Tegangan Output	0 – 2.3	V
Arus Kerja	3 – 6	mA
Rentang Pengukuran TDS	0 – 1000	ppm
Akurasi	$\pm 10\%$ F.S (25°C)	-
Dimensi Modul	42 × 32	mm
Interface Modul	PH2.0-3P	-

2.11 Step Down LM2596

Step Down LM2596 merupakan modul DC-DC converter tipe buck converter yang berfungsi untuk menurunkan tegangan DC dari level yang lebih tinggi ke level yang lebih rendah secara efisien. Modul ini banyak digunakan dalam sistem embedded sebagai penyedia catu daya yang stabil untuk mikrokontroler dan perangkat lainnya.

Pada penelitian ini, sumber daya utama berasal dari power supply 24 V 20 A, sehingga diperlukan penurun tegangan agar sesuai dengan kebutuhan masing-masing komponen. Modul LM2596 digunakan untuk menurunkan tegangan tersebut menjadi beberapa level tegangan, seperti 5 V atau 7–12 V, yang kemudian digunakan untuk mensuplai mikrokontroler ESP32 serta perangkat lain seperti sensor dan aktuator. LM2596 memiliki rentang tegangan input sebesar 4 – 40 V DC, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem dengan supply 24 V. Tegangan

output modul ini dapat diatur (adjustable) melalui potensiometer dalam rentang 3,3 – 35 V DC. Selain itu, modul ini mampu menyediakan arus hingga 3 A. Dalam implementasinya, satu modul LM2596 digunakan untuk menurunkan tegangan dari 24 V menjadi 5 V untuk mensuplai ESP32 atau sensor, sedangkan modul lainnya dapat digunakan untuk menyesuaikan tegangan sesuai kebutuhan beban seperti atau aktuator lainnya. Penggunaan modul ini juga membantu meningkatkan efisiensi sistem dibandingkan regulator linier karena memiliki rugi daya yang lebih kecil. Tabel spesifikasi untuk LM2596 teletak pada Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Spesifikasi Buck Converter

Parameter	Nilai	Satuan
Tipe Converter	Buck (Step Down)	-
Tegangan Masukan	4 – 40	VDC
Tegangan Keluaran	3.3 – 35 (adjustable)	VDC
Arus Maksimal	3	A
Efisiensi	Hingga 90%	%
Frekuensi Switching	110 – 173	kHz
Suhu Operasi	-40 – 125	°C
Proteksi	Short Circuit Protection	-

2.12 Submersible DC 12V

Pompa submersible DC merupakan jenis pompa air yang dirancang untuk bekerja dalam kondisi terendam fluida. Pompa ini menggunakan motor listrik arus searah (DC) sebagai penggerak utama untuk menghasilkan aliran fluida melalui mekanisme impeller di dalam housing pompa. Keunggulan utama dari pompa submersible adalah kemampuannya untuk bekerja secara efisien di dalam air tanpa memerlukan priming, serta memiliki tingkat kebisingan yang relatif rendah.



Gambar 2. 11 Summershible DC

Pompa submersible DC 12V banyak digunakan pada berbagai aplikasi skala kecil hingga menengah, seperti sistem sirkulasi air, pendingin, akuarium, hidroponik, serta sistem otomasi berbasis mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32. Dengan konsumsi daya yang rendah dan ukuran yang kompak, pompa ini sangat cocok digunakan pada sistem berbasis sumber daya terbatas. Pompa Terlihat pada Gambar 2.11.

Tabel 2.12 Spesifikasi Pompa Summershible

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Kerja	DC 12 Volt
Daya	8 Watt
Head Maksimum	5 meter (tanpa hambatan)
Debit Air (Flow Rate)	600 Liter/Jam
Tingkat Kebisingan	< 35 dB
Diameter Inlet/Outlet	9 mm (0.35 inch) 6 mm (0.24 inch)

Pada penyusunan tugas akhir pompa digunakan sebagai perangkat untuk mentransfer larutan NPK pada tangki *Premix* serta air menuju tangki *mixing tank* dengan dintegrasikan melalui ESP dan *relay* sebagai *trigger* pompa untuk aktif. Tabel spesifikasi terlihat pada Tabel 2.12.

2.13 Relay 5A

Relay merupakan komponen elektromekanis yang berfungsi sebagai saklar otomatis yang dikendalikan oleh sinyal listrik berdaya rendah. Prinsip kerja relay memanfaatkan induksi elektromagnetik, dimana arus yang mengalir pada kumparan (coil) akan menghasilkan medan magnet yang menarik kontak mekanis

sehingga terjadi perubahan kondisi dari Normally Open (NO) menjadi tertutup atau sebaliknya pada Normally Closed (NC) [11]. Dengan mekanisme ini, relay memungkinkan sistem mikrokontroler seperti ESP32 untuk mengendalikan beban dengan tegangan dan arus yang lebih besar secara aman. Terlihat pada Gambar 2.12 untuk Relay 5A.

Relay pada Gambar 2.12 dengan kapasitas 5 Ampere banyak digunakan dalam sistem otomasi karena memiliki kemampuan switching yang cukup untuk mengendalikan berbagai aktuator seperti pompa transfer, solenoid valve, dan perangkat listrik lainnya. Relay ini umumnya menggunakan tegangan coil sebesar 5V DC sehingga kompatibel dengan sistem kontrol berbasis mikrokontroler. Konfigurasi kontak yang digunakan adalah *Single Pole Double Throw* (SPDT) yang terdiri dari terminal *Common* (COM), *Normally Open* (NO), dan *Normally Closed* (NC), sehingga memberikan fleksibilitas dalam perancangan sistem kontrol.



Gambar 2.12 Relay [11]

Pada penelitian ini, relay 5A digunakan sebagai pengontrol proses transfer larutan yang bekerja berdasarkan sinyal dari ESP32. Sistem dirancang menggunakan metode pewaktuan (*timer*), dimana relay akan aktif dalam durasi tertentu untuk mengalirkan larutan, kemudian nonaktif secara otomatis setelah waktu yang ditentukan tercapai. Pendekatan ini memungkinkan pengaturan volume larutan secara tidak langsung berdasarkan waktu operasi aktuator. Telihat Tabel spesifikasi pada Tabel 2.13.

Tabel 2. 13 Spesifikasi Relay

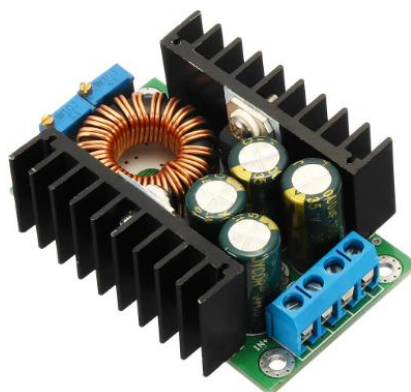
Parameter	Nilai / Spesifikasi
Tegangan Coil	5 V DC
Arus Coil	70 – 100 mA
Arus Maksimum Kontak	5 A

Parameter	Nilai / Spesifikasi
Tegangan Maksimum AC	250 V AC
Tegangan Maksimum DC	30 V DC
Tipe Kontak	SPDT (NO, NC, COM)
Waktu Switching	± 10 ms
Daya Maksimum AC	± 1250 VA
Daya Maksimum DC	± 150 W

2.14 Buck Converter XL4016 300 Watt

Buck converter merupakan rangkaian DC–DC step-down yang berfungsi menurunkan tegangan DC dari level yang lebih tinggi menjadi tegangan DC yang lebih rendah dengan efisiensi yang relatif tinggi. Pada penelitian ini digunakan modul buck converter berbasis XL4016 sebagai penyesuai tegangan dari sumber utama menuju perangkat yang membutuhkan level tegangan lebih rendah.

IC XL4016 merupakan konverter buck dengan frekuensi switching tetap sekitar 180 kHz, tegangan masukan hingga 40 V, dan kemampuan arus keluaran hingga sekitar 8 A pada kondisi implementasi yang sesuai [25]. Komponen terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 *Buck Converter XL4016*

Prinsip kerja XL4016 menggunakan metode pulse width modulation (PWM) untuk mengatur proses switching pada elemen daya. Energi dari sumber disimpan sementara pada induktor ketika saklar aktif, kemudian dilepaskan menuju beban ketika saklar tidak aktif. Proses switching tersebut menghasilkan tegangan keluaran rata-rata yang lebih rendah dibandingkan tegangan masukan. Pada XL4016, tegangan keluaran dapat diatur menggunakan jaringan resistor umpan balik.

Datasheet XL4016 menunjukkan hubungan tegangan keluaran sebagai: sehingga nilai tegangan keluaran dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban [25].

Modul XL4016 yang beredar di pasaran sering dipasarkan dengan daya nominal hingga sekitar 300 W. Namun, perlu diperhatikan bahwa angka 300 W merupakan spesifikasi tingkat modul, bukan rating langsung dari IC XL4016. Kemampuan daya aktual dipengaruhi oleh tegangan input-output, arus beban, efisiensi, heatsink, kualitas komponen eksternal, dan kemampuan pembuangan panas. Oleh karena itu, untuk penulisan akademik lebih aman menyebut perangkat sebagai “modul buck converter berbasis XL4016”, sedangkan spesifikasi dasar IC tetap mengacu pada kemampuan 8 A, 40 V, dan frekuensi switching 180 kHz [25].

Tabel 2.14 Spesifikasi Buck Converter

Parameter	Nilai
Tipe konverter	Buck / Step-down DC–DC
Tegangan input maksimum	40 V
Arus keluaran maksimum IC	8 A
Frekuensi switching	180 kHz
Tegangan referensi feedback	$\pm 1,25$ V
Metode kontrol	PWM
Tegangan output	Adjustable
Fungsi utama	Penurun tegangan DC

Dalam sistem yang dirancang, buck converter XL4016 digunakan untuk menurunkan tegangan dari sumber DC utama sehingga tegangan yang diterima perangkat lebih sesuai dengan kebutuhan operasional. Penggunaan konverter switching lebih efisien dibandingkan regulator linier karena penurunan tegangan dilakukan melalui proses switching sehingga rugi daya dalam bentuk panas dapat ditekan. Untuk spesifikasi tabel terdapat pada Tabel 2.14.

2.15 HTTP

Hypertext Transfer Protocol atau HTTP merupakan protokol lapisan aplikasi yang digunakan untuk pertukaran informasi antara *client* dan *server* pada sistem berbasis jaringan. HTTP bekerja menggunakan mekanisme request–response, yaitu client mengirimkan suatu permintaan kepada *server* dan *server* memberikan respons berdasarkan sumber daya atau layanan yang diminta. Berdasarkan RFC

9110, HTTP merupakan protokol lapisan aplikasi yang bersifat *stateless*, sehingga setiap permintaan pada dasarnya diproses secara independen dan server tidak diwajibkan menyimpan status komunikasi sebelumnya [26].

Pada mekanisme HTTP, sebuah perangkat client mengirimkan pesan request yang terdiri atas metode, target sumber daya, header, dan jika diperlukan payload. Server kemudian memproses permintaan tersebut dan mengirimkan pesan response yang berisi status respons, header, serta data yang diminta.

Beberapa metode HTTP yang umum digunakan antara lain GET, POST, PUT, dan DELETE. Metode GET digunakan untuk memperoleh representasi suatu sumber daya, sedangkan POST digunakan untuk mengirimkan data agar diproses oleh server. Dalam sistem monitoring berbasis mikrokontroler, POST dapat digunakan ketika ESP32 mengirimkan data hasil pembacaan sensor menuju layanan web atau basis data, sedangkan GET dapat digunakan ketika perangkat membutuhkan data atau konfigurasi dari server. Semantik metode dan pesan HTTP didefinisikan dalam standar RFC 9110 [26].

Server memberikan kode status sebagai bagian dari respons untuk menunjukkan hasil pemrosesan permintaan. Sebagai contoh, kode 200 menunjukkan bahwa permintaan berhasil diproses, sedangkan kode pada kelompok 4xx dan 5xx menunjukkan adanya kondisi kesalahan pada sisi client atau server. Mekanisme tersebut memungkinkan perangkat pengirim mengetahui apakah proses komunikasi berhasil.

Dalam penelitian ini, HTTP dapat digunakan sebagai media komunikasi antara ESP32 dan layanan berbasis web. Data sensor seperti TDS, level, status sistem, maupun variabel lain dapat dikirim dari ESP32 menuju web server melalui jaringan Wi-Fi. Dengan mekanisme tersebut, data hasil monitoring dapat diteruskan menuju layanan penyimpanan atau ditampilkan pada antarmuka pengguna.

2.16 APPS SCRIPT

Google Apps Script merupakan platform pengembangan berbasis cloud yang disediakan oleh Google untuk membangun aplikasi dan otomatisasi yang terintegrasi dengan layanan Google Workspace. Apps Script menggunakan bahasa

pemrograman JavaScript dan menyediakan berbagai layanan bawaan untuk berinteraksi dengan Google Sheets, Google Drive, Gmail, Calendar, dan layanan Google lainnya [27].

Apps Script dapat dijalankan melalui lingkungan berbasis browser dan dieksekusi pada infrastruktur server Google. Oleh karena itu, pengguna tidak perlu menyediakan server lokal secara terpisah untuk menjalankan fungsi sederhana seperti menerima data, memproses data, menyimpan data ke Google Sheets, atau membuat aplikasi web [27].

Salah satu fungsi Apps Script yang relevan dalam sistem monitoring adalah kemampuannya untuk dipublikasikan sebagai web application. Google menjelaskan bahwa aplikasi web Apps Script dapat menerima permintaan HTTP melalui fungsi doGet() dan doPost(). Ketika suatu client mengirimkan HTTP GET, fungsi doGet() dijalankan, sedangkan permintaan HTTP POST akan diproses melalui fungsi doPost() [28]. Secara umum, mekanisme komunikasi antara ESP32 dan Google Apps Script dapat digambarkan sebagai:

Sensor → ESP32 → HTTP Request → Google Apps Script → Google Sheets

Dalam implementasi tersebut, ESP32 membaca data sensor kemudian membentuk data yang akan dikirim menggunakan HTTP. Apps Script menerima permintaan tersebut melalui fungsi web app, memproses parameter yang diterima, kemudian menyimpan hasilnya ke Google Sheets. Dengan demikian, Google Sheets dapat dimanfaatkan sebagai media pencatatan data secara daring untuk kebutuhan monitoring dan analisis.

Apps Script juga menyediakan layanan UrlFetchApp yang memungkinkan suatu script mengirim maupun menerima sumber daya melalui HTTP dan HTTPS. Layanan tersebut mendukung berbagai metode seperti GET, POST, PUT, PATCH, dan DELETE serta dapat mengirimkan payload dalam bentuk data formulir maupun JSON [29].

Dalam penelitian ini, Google Apps Script berperan sebagai antarmuka antara sistem embedded dan layanan penyimpanan data berbasis cloud. Penggunaan Apps Script memungkinkan data hasil monitoring dikirimkan melalui koneksi internet

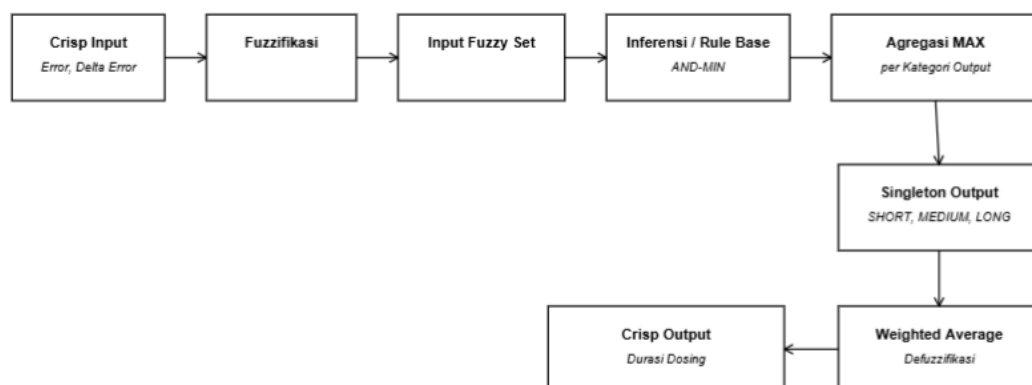
tanpa harus membangun server khusus, sehingga sesuai untuk implementasi monitoring berbasis ESP32 dengan kebutuhan penyimpanan data yang relatif sederhana.

2.17 Fuzzy Logic

Logika fuzzy merupakan metode pengambilan keputusan yang menggunakan derajat keanggotaan untuk merepresentasikan suatu kondisi. Berbeda dengan logika biner yang hanya memiliki nilai benar atau salah, derajat keanggotaan pada logika fuzzy berada pada rentang 0 sampai 1. Dengan demikian, suatu nilai masukan dapat memiliki tingkat keanggotaan pada lebih dari satu himpunan fuzzy secara bersamaan.

Pada penelitian ini, logika fuzzy digunakan pada proses pengendalian konsentrasi nutrisi di *mixing tank*. Pengendali menggunakan dua variabel masukan, yaitu *error* dan *delta error*, sedangkan keluaran pengendali berupa durasi aktivasi pompa premix dalam satuan detik.

Struktur pengendali fuzzy yang diimplementasikan terdiri atas proses fuzzifikasi, evaluasi *rule* menggunakan operator MIN, agregasi *rule* dengan kategori keluaran yang sama menggunakan operator MAX, representasi keluaran menggunakan *singleton*, dan perhitungan nilai keluaran *crisp* menggunakan *weighted average*. Penggunaan *singleton output* dan *weighted average* telah diterapkan pada implementasi fuzzy controller, termasuk pada sistem kendali berbasis perangkat tertanam [23], [24].



Gambar 2. 14 Diagram Fuzzy (Dokumen Pribadi)

a. Crisp Input

Crisp input merupakan nilai numerik tegas yang menjadi masukan pada sistem fuzzy. Pada penelitian ini, *crisp input* terdiri atas nilai *error* dan *delta error*. Nilai *error* menunjukkan selisih antara *setpoint* konsentrasi TDS dengan nilai aktual yang diperoleh dari pembacaan sensor. Nilai *error* pada waktu ke-(k) dihitung menggunakan Persamaan (2.9) [32].

$$e(k) = SP - TDS(k) \quad (2.9)$$

Diketahui :

$e(k)$ = nilai *error* pada waktu ke-(k) (ppm)

SP = nilai *setpoint* TDS (ppm)

$TDS(k)$ = nilai TDS aktual pada waktu ke-(k) (ppm)

Nilai *error* menunjukkan seberapa jauh kondisi aktual sistem terhadap kondisi yang diinginkan. Semakin kecil nilai *error*, semakin dekat konsentrasi aktual terhadap *setpoint*. Selain *error*, digunakan *delta error* untuk mengetahui perubahan *error* terhadap kondisi sebelumnya. Nilai *delta error* dihitung menggunakan Persamaan (2.10) [32].

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (2.10)$$

dengan:

$\Delta e(k)$ = *delta error* pada waktu ke-(k) (ppm)

$e(k)$ = *error* pada kondisi saat ini (ppm)

$e(k - 1)$ = *error* pada kondisi sebelumnya (ppm)

Nilai *delta error* memberikan informasi mengenai arah perubahan respons sistem. *Delta error* negatif menunjukkan bahwa nilai *error* mengalami penurunan sehingga TDS bergerak mendekati *setpoint*. *Delta error* mendekati nol menunjukkan bahwa perubahan *error* relatif kecil, sedangkan *delta error* positif menunjukkan bahwa nilai *error* mengalami peningkatan.

Penggunaan *error* dan *delta error* secara bersamaan memungkinkan pengendali mempertimbangkan jarak kondisi aktual terhadap *setpoint* sekaligus kecenderungan perubahan kondisi sistem.

b. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses mengubah nilai masukan tegas (*crisp input*) menjadi derajat keanggotaan pada suatu himpunan fuzzy. Derajat keanggotaan memiliki nilai antara 0 sampai 1.

dengan menyatakan derajat keanggotaan nilai terhadap himpunan fuzzy . Nilai menunjukkan bahwa tidak termasuk dalam himpunan fuzzy , sedangkan nilai menunjukkan bahwa memiliki keanggotaan penuh pada himpunan tersebut. Sementara itu, nilai menunjukkan bahwa memiliki keanggotaan parsial dengan tingkat keanggotaan tertentu.

Salah satu bentuk fungsi keanggotaan yang umum digunakan adalah fungsi keanggotaan segitiga (*triangular membership function*). Secara matematis, fungsi tersebut dinyatakan menggunakan Persamaan (2.11) [23].

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.11)$$

dengan (a) merupakan batas awal, (b) merupakan titik puncak, dan (c) merupakan batas akhir fungsi keanggotaan. Selain fungsi keanggotaan segitiga, fungsi keanggotaan dapat berbentuk trapesium (*trapezoidal membership function*) yang dinyatakan menggunakan Persamaan (2.12) [23].

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2.12)$$

dengan (a) dan (d) merupakan batas awal dan akhir fungsi keanggotaan, sedangkan (b) dan (c) merupakan batas daerah dengan derajat keanggotaan penuh.

Pada implementasi penelitian, fungsi keanggotaan tidak seluruhnya dibatasi pada bentuk segitiga atau trapesium ideal. Beberapa fungsi keanggotaan ditentukan secara *piecewise* berdasarkan hasil penalaan (*tuning*) eksperimental terhadap respons aktual sistem. Penalaan tersebut dilakukan untuk menyesuaikan sensitivitas

pengendali terhadap perubahan konsentrasi TDS pada *mixing tank*. Oleh karena itu, parameter dan persamaan fungsi keanggotaan aktual yang digunakan pada sistem dijelaskan secara khusus pada Bab III.

Variabel *error* direpresentasikan menggunakan tiga himpunan linguistik, yaitu LOW, MEDIUM, dan HIGH, sedangkan variabel *delta error* direpresentasikan menggunakan NEGATIVE, ZERO, dan POSITIVE. Daerah antarhimpunan dapat saling tumpang tindih sehingga satu nilai masukan dapat memiliki derajat keanggotaan pada lebih dari satu himpunan fuzzy.

c. Rulebase

Rule base merupakan kumpulan aturan berbentuk IF–THEN yang digunakan untuk menentukan aksi kendali berdasarkan kondisi masukan. Pada sistem yang dikembangkan, aturan fuzzy menghubungkan kombinasi *error* dan *delta error* dengan kategori durasi aktivasi pompa. Bentuk umum aturan fuzzy dapat dinyatakan sebagai:

$$[R_i: \text{ IF } e \text{ is } A_i \text{ AND } \Delta e \text{ is } B_i \text{ THEN } u \text{ is } C_i] \quad (2.13)$$

dengan:

R_i = rule ke-(i)

A_i = himpunan fuzzy *error*

B_i = himpunan fuzzy *delta error*

C_i = kategori keluaran

u = aksi kendali berupa durasi *dosing*

Karena masing-masing variabel masukan memiliki tiga himpunan fuzzy, kombinasi keduanya menghasilkan sembilan *rule*. Kategori keluaran yang digunakan terdiri atas SHORT, MEDIUM, dan LONG.

Sebagai contoh, salah satu bentuk aturan adalah:

IF Error HIGH AND Delta Error POSITIVE THEN Output LONG

Susunan *rule base* dan hubungan masing-masing kombinasi masukan terhadap kategori keluaran ditentukan pada tahap perancangan dan penalaan pengendali yang dijelaskan pada Bab III.

d. Inferensi dan Firing Strength Menggunakan Operator MIN

Inferensi fuzzy merupakan proses untuk menentukan tingkat aktivasi setiap *rule* berdasarkan derajat keanggotaan masukan. Tingkat aktivasi tersebut disebut sebagai *firing strength*. Pada penelitian ini, dua *antecedent*, yaitu *error* dan *delta error*, dihubungkan menggunakan operator AND. Operator tersebut diimplementasikan menggunakan fungsi minimum (MIN). Penggunaan minimum untuk memperoleh tingkat aktivasi *rule* juga digunakan pada implementasi fuzzy controller berbasis perangkat tertanam [24]. *Firing strength* aturan ke-(i) dihitung menggunakan Persamaan (2.13).

$$\left[\alpha_i = \min \left(\mu_{A_i}(e), \mu_{B_i}(\Delta e) \right) \right] \quad (2.14)$$

dengan:

α_i = *firing strength* atau kekuatan aktivasi aturan ke-,

$\mu_{A_i}(e)$ = derajat keanggotaan *error* pada himpunan fuzzy A_i

$\mu_{B_i}(\Delta e)$ = derajat keanggotaan *delta error* pada himpunan fuzzy B_i .

Sebagai contoh, apabila derajat keanggotaan *error* sebesar 0,70 dan derajat keanggotaan *delta error* sebesar 0,40, maka nilai *firing strength* aturan ke-diperoleh sebagai berikut:

$$\alpha_i = \min(0,70, 0,40) = 0,40 \quad (2.15)$$

Dengan demikian, pada operator AND–MIN, kekuatan aktivasi (*firing strength*) suatu *rule* ditentukan berdasarkan nilai derajat keanggotaan terkecil dari seluruh *antecedent* yang membentuk aturan tersebut.

e. Agregasi Rule Menggunakan Operator MAX

Dalam rule base, beberapa kombinasi *error* dan *delta error* dapat menghasilkan kategori keluaran yang sama. Oleh karena itu, pada implementasi pengendali penelitian ini, *firing strength* dari rule-rule yang menghasilkan kategori keluaran yang sama dikelompokkan dan diagregasikan menggunakan operator maksimum (MAX). Untuk kategori SHORT, MEDIUM, dan LONG, proses agregasi dinyatakan menggunakan Persamaan (2.15).

$$\mu_S = \max_{\alpha_i \in R_S}(\alpha_i), \quad \mu_M = \max_{\alpha_i \in R_M}(\alpha_i), \quad \mu_L = \max_{\alpha_i \in R_L}(\alpha_i) \quad (2.16)$$

dengan:

(μ_S) = derajat aktivasi kategori SHORT

(μ_M) = derajat aktivasi kategori MEDIUM

(μ_L) = derajat aktivasi kategori LONG

(R_S) = kumpulan *rule* dengan keluaran SHORT

(R_M) = kumpulan *rule* dengan keluaran MEDIUM

(R_L) = kumpulan *rule* dengan keluaran LONG

Sebagai contoh, apabila beberapa *rule* yang menghasilkan kategori LONG mempunyai *firing strength* sebesar 0,20; 0,65; dan 0,40, maka:

$$[\mu_L = \max(0.20, 0.65, 0.40) = 0.65] \quad (2.17)$$

Dengan demikian, nilai aktivasi terbesar digunakan untuk merepresentasikan tingkat aktivasi kategori keluaran tersebut. Tahap agregasi MAX pada penelitian ini merupakan bagian dari struktur inferensi pengendali yang diimplementasikan pada program. Tahap tersebut dilakukan sebelum nilai kategori keluaran digunakan sebagai bobot dalam perhitungan *weighted average*.

f. Singleton Output

Keluaran fuzzy pada sistem direpresentasikan menggunakan singleton output. Singleton output merupakan representasi keluaran menggunakan suatu nilai numerik tertentu untuk setiap kategori keluaran, bukan menggunakan daerah fungsi keanggotaan keluaran kontinu. Secara umum, tiga kategori keluaran pada penelitian dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} [z_S &= \text{singleton SHORT}] \\ [z_M &= \text{singleton MEDIUM}] \\ [z_L &= \text{singleton LONG}] \end{aligned} \quad (2.18)$$

dengan:

(z_S) = nilai representatif kategori SHORT

(z_M) = nilai representatif kategori MEDIUM

(z_L) = nilai representatif kategori LONG

Penggunaan *singleton output* merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menyederhanakan perhitungan keluaran fuzzy. Nada dan Bayoumi

menunjukkan bahwa penggunaan keluaran berbentuk *singleton* memungkinkan nilai kontrol dihitung menggunakan *weighted average* dari beberapa titik representatif tanpa melakukan integrasi terhadap fungsi keluaran kontinu [23]. Implementasi fuzzy controller berbasis perangkat keras oleh Noorsal *et al.* juga menggunakan *singleton output* bersama hasil minimum dari proses inferensi untuk memperoleh keluaran melalui *weighted average* [24].

Nilai numerik SHORT, MEDIUM, dan LONG yang digunakan pada sistem merupakan parameter hasil perancangan dan penalaan pengendali sehingga nilai aktualnya dijelaskan pada Bab III.

g. Perhitungan Crisp Output Menggunakan Weighted Average

Setelah proses inferensi dan agregasi menghasilkan derajat aktivasi kategori SHORT, MEDIUM, dan LONG, nilai keluaran tegas (*crisp output*) dihitung menggunakan metode *weighted average*. Penggunaan *weighted average* bersama *singleton output* telah digunakan dalam implementasi fuzzy controller. Pada pendekatan tersebut, nilai *singleton* berfungsi sebagai nilai representatif keluaran, sedangkan derajat aktivasi digunakan sebagai bobot dalam perhitungan keluaran akhir [23], [24]. Sesuai dengan struktur pengendali yang diimplementasikan pada penelitian ini, nilai keluaran dihitung menggunakan Persamaan (2.19).

$$\left[Z^* = \frac{\mu_S Z_S + \mu_M Z_M + \mu_L Z_L}{\mu_S + \mu_M + \mu_L} \right] \quad (2.19)$$

dengan:

(z^*) = *crisp output* berupa durasi *dosing* (detik)

(μ_S) = derajat aktivasi kategori SHORT

(μ_M) = derajat aktivasi kategori MEDIUM

(μ_L) = derajat aktivasi kategori LONG

(z_S) = nilai *singleton* SHORT

(z_M) = nilai *singleton* MEDIUM

(z_L) = nilai *singleton* LONG

Perhitungan tersebut menghasilkan satu nilai numerik yang digunakan sebagai durasi aktivasi pompa premix. Penggunaan *singleton output* dan *weighted average* memungkinkan nilai keluaran dihitung tanpa melakukan integrasi numerik terhadap

suatu daerah fungsi keanggotaan keluaran seperti pada metode *centroid* dengan keluaran kontinu [23].

Pendekatan tersebut juga memberikan struktur komputasi yang relatif sederhana untuk diterapkan pada sistem tertanam karena operasi keluaran terutama terdiri atas perkalian, penjumlahan, dan pembagian [23], [24].

h. Crisp Output dan Pengendalian Closed Loop

Crisp output merupakan nilai akhir yang diperoleh dari proses weighted average. Pada penelitian ini, nilai tersebut berupa durasi aktivasi pompa premix dalam satuan detik. Nilai durasi digunakan oleh mikrokontroler untuk mengaktifkan pompa premix. Setelah proses dosing dan pencampuran dilakukan, sensor TDS kembali mengukur konsentrasi aktual pada mixing tank. Hasil pembacaan berikutnya digunakan untuk menghitung nilai error dan delta error baru sehingga pengendali dapat menentukan aksi pada siklus berikutnya.

Dengan demikian, pengendalian dilakukan secara closed loop karena hasil perubahan konsentrasi setelah aksi dosing digunakan kembali sebagai masukan untuk menentukan aksi kendali berikutnya. Proses tersebut berlangsung hingga konsentrasi TDS mencapai kondisi yang ditentukan oleh sistem.

i. Kinerja Sistem Pengendalian

Selain berdasarkan keluaran pengendali, performa sistem dapat dievaluasi berdasarkan penyimpangan antara nilai aktual dan nilai *setpoint*. Pada penelitian ini, evaluasi dilakukan menggunakan *error* akhir absolut, persentase *error* akhir, serta *Integral Absolute Error* (IAE). *Error* akhir absolut menunjukkan besarnya penyimpangan kondisi akhir terhadap *setpoint* tanpa memperhatikan arah penyimpangannya dan dinyatakan menggunakan Persamaan (2.17) [32].

$$e_{\text{akhir}} = |SP - TDS_{\text{akhir}}| \quad (2.17)$$

dengan:

e_{akhir} = *error* akhir absolut (ppm)

SP = *setpoint* TDS (ppm)

TDS_{akhir} = nilai TDS pada akhir pengujian (ppm)

Persentase *error* akhir digunakan untuk menyatakan penyimpangan tersebut secara relatif terhadap nilai *setpoint* dan dihitung menggunakan Persamaan (2.18).

$$e_{\%} = \frac{|SP - TDS_{akhir}|}{SP} \times 100\% \quad (2.18)$$

dengan:

$e_{\%}$ = persentase *error* akhir (%)

SP = *setpoint* TDS (ppm)

TDS_{akhir} = nilai TDS akhir (ppm)

Untuk mengevaluasi beberapa pengujian, rata-rata *error* akhir absolut dan rata-rata persentase *error* masing-masing dihitung menggunakan Persamaan (2.19) dan Persamaan (2.20) [33].

$$\bar{e}_{akhir} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{akhir,i} \quad (2.19)$$

dengan:

$\bar{e}_{akhir}$ = rata-rata *error* akhir absolut (ppm)

$e_{akhir,i}$ = *error* akhir absolut sampel ke- (ppm)

n = jumlah sampel pengujian

$$\bar{e}_{\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{\%,i} \quad (2.20)$$

dengan:

$\bar{e}_{\%}$ = rata-rata persentase *error* akhir (%)

$e_{\%,i}$ = persentase *error* akhir sampel ke- (%)

n = jumlah sampel

Evaluasi kondisi akhir belum menggambarkan penyimpangan yang terjadi selama keseluruhan proses pengendalian. Oleh karena itu, digunakan *Integral Absolute Error* (IAE), yaitu indeks performa yang mengintegrasikan nilai absolut *error* terhadap waktu [32], [33]. IAE dinyatakan menggunakan Persamaan (2.20) [32].

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (2.21)$$

dengan:

IAE = *Integral Absolute Error*

$e(t)$ = *error* terhadap *setpoint* pada waktu (ppm)

t = waktu (s)

T = durasi evaluasi (s)

Nilai IAE merepresentasikan akumulasi penyimpangan terhadap *setpoint* selama periode evaluasi. Karena data pada penelitian ini diperoleh dalam bentuk diskrit melalui *data logger*, integral pada Persamaan (2.20) dihitung secara numerik menggunakan pendekatan trapesium sebagaimana Persamaan (2.21) [33].

$$IAE \approx \sum_{k=1}^{n-1} \frac{|e_k| + |e_{k+1}|}{2} (t_{k+1} - t_k) \quad (2.22)$$

dengan merupakan *error* pada sampel ke- k , merupakan waktu pengambilan data ke- k , dan n merupakan jumlah data selama periode evaluasi. Dengan *error* TDS dalam ppm dan waktu dalam detik, nilai IAE pada penelitian ini dinyatakan dalam ppm·s. Pendekatan IAE juga digunakan pada penelitian pengendalian TDS berbasis fuzzy oleh Sholihah *et al.* [32] sebagai salah satu indikator kinerja pengendali.

2.18 Finite State Machine (FSM)

Finite State Machine (FSM) merupakan metode pemodelan sistem kendali diskrit yang menggambarkan perilaku sistem berdasarkan sejumlah kondisi atau *state* yang terbatas. Pada suatu waktu, sistem berada pada satu *state* tertentu dan dapat berpindah menuju *state* lainnya apabila kondisi atau *event* yang telah ditentukan terpenuhi. Pendekatan FSM banyak digunakan pada sistem kontrol dan *embedded system* karena proses operasi dapat direpresentasikan secara terstruktur melalui aksi, kejadian, serta kondisi transisi antar-*state* [30]. Hanžič dan Jezernik menjelaskan bahwa pendekatan berbasis FSM sesuai untuk sistem kontrol yang perilakunya lebih banyak ditentukan oleh kejadian diskrit serta memungkinkan algoritma kontrol disusun secara terstruktur melalui definisi aksi, kejadian, dan transisi [30].

Pada penerapannya, diagram transisi *state* digunakan untuk menggambarkan hubungan antara kondisi operasi dan syarat perpindahannya. Sistem tetap berada pada *state* yang sedang aktif sampai kondisi transisi terpenuhi, kemudian operasi berpindah menuju *state* tujuan. Pendekatan tersebut membuat urutan operasi sistem menjadi eksplisit dan memudahkan pengaturan proses sekuensial [31].

Dalam penelitian ini, FSM digunakan untuk mengatur urutan operasi sistem *mixing tank*. FSM mengatur perpindahan tahapan operasi berdasarkan kondisi

sensor dan proses yang sedang berlangsung sehingga proses pemeriksaan kondisi awal, pengisian, pencampuran, pemeriksaan TDS, *dosing*, hingga kondisi larutan siap digunakan dapat berlangsung secara terstruktur.