



Perancangan Sistem Pengukuran dan Kontrol Ketinggian Air pada Tangki dengan Metode Fuzzy Aplikasi pada Gedung Bertingkat

Laporan Tugas Akhir

Oleh:

Feryandi Rajagukguk (4212431010)

**Program Studi Teknik Mekatronika
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2026**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : "Perancangan Sistem Pengukuran dan Kontrol Ketinggian Air pada Tangki dengan Metode Fuzzy Aplikasi pada Gedung Bertingkat" adalah **hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.** Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 31 Januari 2026



Feryandi Rajagukguk
NIM: 4212431010

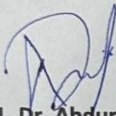
Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

oleh:
Feryandi Rajagukguk (4212431010)

Tanggal Sidang: 19 Januari, 2026

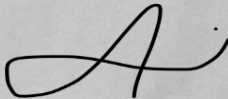
Disetujui oleh :



1. Dr. Abdurahman
Dwijotomo, S.ST, M.Sc
NIK: 122257



1. Ir Daniel Sutopo Pamungkas, S.T.,M.T.,
Ph.D
NIK: 100006



2. Diono, S.Tr.T., M.Sc
NIK: 120243

Perancangan Sistem Pengukuran dan Kontrol Ketinggian Air pada Tangki dengan Metode Fuzzy Aplikasi pada Gedung Bertingkat

Abstrak

Pengukuran dan kontrol ketinggian air dalam tangki merupakan aspek vital dalam sistem distribusi air gedung bertingkat, yang memerlukan keandalan tinggi untuk menjamin ketersediaan air di setiap lantai. Salah satu permasalahan umum yang sering terjadi adalah ketidakstabilan debit air dari sumber serta keterlambatan sistem dalam merespons perubahan ketinggian air tangki. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini merancang sebuah sistem otomatis berbasis logika fuzzy guna mengukur dan mengontrol ketinggian air secara efisien dan adaptif.

Sistem ini memanfaatkan dua sensor analog, yaitu sensor ultrasonik untuk mengukur ketinggian air dalam tangki dan sensor flow untuk memantau laju aliran air masuk dari suplai utama. Data yang diperoleh diproses oleh mikrokontroler Arduino dan dianalisis menggunakan algoritma fuzzy untuk menentukan derajat pembukaan motorized valve sebagai aktuator utama pengatur aliran. Hasil output logika fuzzy kemudian difuzzifikasi menggunakan metode centroid untuk menghasilkan nilai crisp yang merepresentasikan sudut buka valve secara akurat.

Untuk mendukung pemantauan di ruang kontrol atau teknisi pemeliharaan, sistem dilengkapi dengan LCD 20x4 sebagai antarmuka pengguna, yang menampilkan informasi ketinggian air dan debit aliran secara real-time. Dengan penerapan logika fuzzy, sistem ini mampu memberikan respons yang lebih presisi, halus, dan adaptif terhadap fluktuasi kondisi lingkungan, sehingga sangat cocok diimplementasikan dalam sistem air bersih gedung bertingkat yang menuntut kestabilan dan efisiensi tinggi.

Kata kunci: Gedung bertingkat, logika fuzzy, motorized Valve, sensor flow, sensor ultrasonic.

Design of a Water Level Measurement and Control System for Tanks Using the Fuzzy Method: Application in High-Rise Buildings

Abstract

Water level measurement and control in storage tanks is a critical aspect of water distribution systems in high-rise buildings, where reliability is essential to ensure consistent water availability on every floor. A common issue encountered is the instability of incoming water flow rates and the delay in system response to changes in water level. To address these challenges, this study proposes an automated system based on fuzzy logic to efficiently and adaptively measure and control the water level in the tank.

The system utilizes two analog sensors: an ultrasonic sensor to measure the water level and a flow sensor to monitor the incoming water rate from the main supply. Data from these sensors are processed by an Arduino microcontroller and analyzed using a fuzzy logic algorithm to determine the degree of opening of a motorized valve, which acts as the main actuator for flow regulation. The fuzzy output is then defuzzified using the centroid method to produce a crisp value representing the precise valve opening angle.

To support monitoring by maintenance personnel or control room operators, the system is equipped with a 20x4 LCD as a user interface, displaying real-time information on water level and flow rate. By applying fuzzy logic, the system offers smoother, more accurate, and adaptive responses to environmental fluctuations, making it well-suited for implementation in high-rise building water systems that demand stability and efficiency.

Keywords: flow sensor, fuzzy logic, High-rise building, Motorized Valve, ultrasonic sensor.

Kata Pengantar

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan buku Tugas Akhir ini. Buku Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan pada jenjang Diploma IV (D4) di Program Studi Teknik Mekatronika, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam.

Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan Sistem Pengukuran dan Kontrol Ketinggian Air pada Tangki dengan Metode Fuzzy Aplikasi pada Gedung Bertingkat” diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem kontrol otomatis, khususnya pada aplikasi pengelolaan sumber daya air. Penyusunan buku ini dilakukan berdasarkan hasil perancangan, pengujian, serta analisis data yang telah dilaksanakan secara sistematis.

Dalam proses penyusunan buku Tugas Akhir ini, penulis memperoleh banyak bimbingan, arahan teknis, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang selalu ada dalam setiap perjalanan hidup penulis dengan segala karunia dan perlindungan-Nya, penulis diberikan kesehatan untuk dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan moral, dan motivasi.
3. Ibu Ferialia Fitri, S.T, M.T selaku dosen pengampu.
4. Bapak Ir Daniel Sutopo Pamungkas, S.T., M.T., Ph.D selaku pembimbing penulis yang telah membimbing dan mengarahkan penulis selama pengerjaan Tugas Akhir dari awal hingga penulis telah menyelesaikannya.
5. Bapak Dr. Abdurahman Dwijotomo, S.ST, M.Sc selaku dosen penguji satu Tugas Akhir penulis.
6. Bapak Diono, S.Tr.T., M.Sc selaku dosen penguji dua Tugas Akhir penulis.

Penulis menyadari bahwa buku Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Semoga buku Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi referensi bagi pengembangan penelitian selanjutnya.

Batam, 31 Januari 2026



Feryandi Rajagukguk

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	x
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Manfaat	2
1.5. Batasan	2
Bab 2. Tinjauan Pustaka	3
2.1. Penelitian Tedahulu	3
2.2. Sistem Pengukuran dan Kontrol Ketinggian Air	5
2.3. Logika Fuzzy	5
2.4. Defuzzifikasi Center of Gravity (COG)	7
2.5. Arduino Uno	7
2.6. Sensor Ultrasonik HC-SR04	8
2.7. Flow Sensor	9
2.8. LCD 20x4	10
2.9. Motorized Valve	11
2.10. Buzzer	12
2.11. LED	12
Bab 3. Metode	13

3.1. Metode Pelaksanaan	13
3.1.1. Perancangan Diagram Alir Sistem.....	13
3.1.2. Perancangan Diagram Blok Sistem	14
3.1.3. Perancangan Mekanikal	15
3.2. Rancangan Membership Function dan Logika Fuzzy	16
3.2.1. Variabel Input dan Output.....	17
3.2.2. Membership Function untuk Input Ketinggian Air	17
3.2.3. Membership Function untuk Input Debit Air (Flow Rate)	19
3.2.4. Rule Base Fuzzy (3x3 = 9 Rule).....	20
3.2.5. Defuzzifikasi (Center of Gravity - COG).....	21
3.3. Alat dan Bahan	22
3.4. Pengujian.....	23
3.4.1. Pengujian 9 Rule	24
3.4.2. Pengujian Kondisi Air dalam Tangki.....	25
3.4.3. Pengujian Sensor Ultrasonik.....	27
3.4.4. Pengujian Sensor Flow.....	28
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	34
4.1. Hasil	34
4.1.1. Data Hasil Pengujian 9 Rule	34
4.1.2. Validasi Data Pengujian	39
4.1.3. Data Hasil Pengujian Ketinggian Air dalam Tangki Selama 24 Jam	41
4.1.4. Data Hasil Pengujian Debit Air Masuk dan Keluar dalam Tangki Selama 24 Jam	45
4.2. Pembahasan.....	47
BAB 5 Kesimpulan dan Saran.....	50
5.1. Kesimpulan	50
5.2. Saran	50
Daftar Pustaka	51
Biodata	53

Lampiran A 54

Lampiran B 65

Lampiran C 66

Lampiran D 67

Daftar Gambar

Gambar 1. Himpunan Fuzzy[8]	5
Gambar 2. Konfigurasi dasar pengendali logika fuzzy	6
Gambar 3. Berbagai Tipe Fungsi Keanggotaan [12].....	6
Gambar 4. Arduino Uno	8
Gambar 5. Sensor Ultrasonik HC-SR04	8
Gambar 6. Flow Sensor	10
Gambar 7. LCD 20x4	10
Gambar 8. Motorized Valve	11
Gambar 9. Buzzer	12
Gambar 10. LED.....	12
Gambar 11. Flow chart Sistem	13
Gambar 12. Diagram Blok Sistem.....	15
Gambar 13. Perancangan Mekanikal	16
Gambar 14. Grafik Membership Function Ketinggian Air	19
Gambar 15. Grafik Membership Function Debit Air.....	20
Gambar 16. Perbandingan Pengukuran Ketinggian Air	28
Gambar 17. Grafik Output Fuzzy (crisp) Singleton	38
Gambar 18. Data Volume Air x Debit Air Keluar.....	44
Gambar 19. Data Pembacaan Debit Air Berdasarkan Waktu	47

Daftar Tabel

Table 1. Penelitian Terdahulu.....	3
Table 2. Variabel Input dan Output	17
Table 3. Membership Function Ketinggian Air	18
Table 4. Membership Function Debit Air	19
Table 5. Rule Base Fuzzy.....	21
Table 6. Estimasi biaya	22
Table 7. Pengujian 9 Rule	24
Table 8. Pengujian Ketinggian Air dalam Tangki Selama 24 Jam	26
Table 9. Pengujian Debit Air Masuk dan Keluar dalam Tangki Selama 24 Jam.....	27
Table 10. Dokumentasi Kalibrasi Debit Air Masuk.....	29
Table 11. Kalibrasi Debit Air Masuk.....	31
Table 12. Dokumentasi Kalibrasi Debit Air Keluar	32
Table 13. Kalibrasi Debit Air Keluar	33
Table 14. Hasil Pengujian Rule	34
Table 15. Dokumentasi dari Table Pengujian	35
Table 16. Hasil Fuzzifikasi Tinggi Air dan Debit Air	40
Table 17. Hasil Pengujian Ketinggian Air dalam Tangki dan Debit Air Keluar Selama 24 Jam	42
Table 18. Hasil Pengujian Debit Air Masuk dan Keluar dalam Tangki Selama 24 Jam	45

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Sistem distribusi air dalam gedung bertingkat memiliki peran penting dalam menjamin ketersediaan air bersih secara merata ke seluruh lantai bangunan, baik untuk keperluan domestik, sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), maupun sistem proteksi kebakaran. Dalam banyak kasus, distribusi air dilakukan melalui tangki penampungan air di atas gedung yang menggunakan tekanan gravitasi untuk mengalirkan air ke bawah. Oleh karena itu, pengukuran dan pengendalian ketinggian air di dalam tangki menjadi sangat penting untuk menghindari kekurangan pasokan maupun luapan air yang berisiko menyebabkan kerusakan fasilitas[1].

Secara konvensional, pengendalian level air dilakukan menggunakan metode on-off dan kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative). Input berupa trial error secara real time, dan output berupa pembacaan dari sensor ultrasonic. Metode on-off bekerja berdasarkan batas ambang tertentu: pompa atau valve aktif ketika ketinggian air di bawah ambang bawah dan mati ketika mencapai ambang atas. Meskipun sederhana dan murah, pendekatan ini menghasilkan kontrol yang kasar (discrete) dan kurang mampu beradaptasi terhadap fluktuasi permintaan air, yang sangat dinamis di gedung bertingkat [2]. Misalnya, di pagi dan sore hari, banyak orang menggunakan air untuk mandi dan mencuci di apartemen, yang menyebabkan kebutuhan air meningkat drastis. Metode on-off kesulitan menyesuaikan volume air dengan perubahan ini. Sistem hanya menyalakan pompa saat air di tangki sudah sangat rendah, dan mematikannya saat tangki penuh, tanpa melihat seberapa cepat air digunakan. Akibatnya, air bisa habis sebelum pompa menyala, atau pompa sering hidup-mati saat penggunaan air naik turun dengan cepat. Hal ini membuat metode on-off kurang cocok untuk sistem air di gedung yang kebutuhan airnya tidak stabil.

Sementara itu, metode PID memberikan kontrol berkelanjutan (continuous control) dan lebih presisi, namun memiliki keterbatasan dalam sistem non-linear serta memerlukan tuning parameter yang kompleks untuk setiap kondisi sistem. Hal ini menyulitkan implementasi PID pada sistem air gedung yang memiliki variabel beban dan tekanan yang berubah secara signifikan sepanjang hari[3].

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, perancangan sistem distribusi air dalam gedung bertingkat ini mengadaptasi pendekatan logika fuzzy dari penelitian sebelumnya mengenai distribusi air bersih pada PDAM. Dalam penelitian tersebut, logika fuzzy diterapkan sebagai solusi yang lebih adaptif untuk mengelola distribusi air[4]. Pendekatan ini menggunakan aturan linguistik dan derajat keanggotaan untuk menangani ketidakpastian, perubahan beban, serta karakteristik sistem yang non-linear, tanpa memerlukan model matematis yang

kompleks. Dengan menggunakan sensor ultrasonik untuk mengukur ketinggian air dan sensor flow untuk mendeteksi laju aliran, sistem fuzzy dalam perancangan ini mampu mengatur derajat pembukaan motorized valve secara halus dan bertahap. Hasilnya adalah distribusi air yang lebih stabil, hemat energi, dan responsif terhadap kebutuhan aktual setiap saat.[5].

1.2. Rumusan Masalah

Bagaimana merancang sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air dalam tangki secara otomatis dengan memanfaatkan metode logika fuzzy?

1.3. Tujuan

Tujuan dari perancangan sistem ini adalah untuk:

1. Merancang dan mengembangkan suatu sistem yang dapat memastikan bahwa Ketersedian air dalam tangki.
2. Menyediakan antarmuka pengguna berupa LCD 20x4 untuk pemantauan
3. Memberikan sistem peringatan kondisi air rendah dan penuh secara real-time melalui buzzer dan LED.

1.4. Manfaat

Manfaat dari Perancangan Sistem ini yaitu:

1. Menghasilkan sistem kontrol ketinggian air yang lebih adaptif dan responsif terhadap kondisi tangki dengan metode fuzzy dibandingkan dengan metode konvensional.
2. Menjadi alternatif penerapan logika fuzzy dalam kasus nyata, khususnya pada kontrol aliran dan ketinggian air

1.5. Batasan

Sistem ini hanya dirancang untuk mengukur dan mengontrol ketinggian air bersih dalam tangki. Penggunaan untuk cairan dengan viskositas tinggi, cairan kimia, atau air yang mengandung partikel besar tidak menjadi fokus dalam penelitian ini.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Penelitian Terdahulu

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil-hasil penelitian terdahulu yang bisa dijadikan acuan dalam topik penelitian ini. Penelitian terdahulu telah dipilih sesuai dengan permasalahan dalam penelitian ini, sehingga diharapkan mampu menjelaskan maupun memberikan referensi bagi penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. berikut dijelaskan beberapa penelitian terdahulu yang telah dipilih:

Table 1. Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode & Komponen Utama	Kelebihan Penelitian	Kelemahan / Keterbatasan	Kontribusi Penelitian Ini
1	Akhmad Musafa & Riyanto Wibisono (2018)	Integrated Water Level Control System Using Fuzzy Logic	Fuzzy Mamdani, sensor ultrasonik HC-SR04, motor DC, Arduino Mega2560	Mengontrol dua pintu air secara terintegrasi dengan fuzzy logic	Tidak mempertimbangkan laju aliran air (flow rate) sebagai parameter kontrol	Menambahkan sensor flow untuk mempertimbangkan laju aliran dalam pengambilan keputusan[5]
2	Murtadlo, M. Z. I., Imaduddin, I. R., Herlina, A., & Salim, A. T. A. (2020)	Perancangan Kontrol Fuzzy Mamdani untuk Ketinggian Pusaran Air pada Basin Silinder Gravitation Water Vortex Power Plant	Fuzzy Mamdani, sensor ultrasonik, Arduino Uno	Mengontrol ketinggian pusaran air secara otomatis	Fokus pada pembangkit listrik skala kecil; tidak mempertimbangkan distribusi air di gedung bertingkat	Menerapkan kontrol fuzzy pada sistem distribusi air di gedung bertingkat dengan mempertimbangkan kebutuhan praktis[6]
3	Kurniawan, F., Maulana, Y. Z., & Christianti, R. F. (2022)	Sistem Kendali Level Ketinggian Air Berbasis Fuzzy Control Menggunakan Simulink	Fuzzy Control, Simulink, Sensor Ultrasonik, PLC, DC Servo Motor	Integrasi dengan PLC dan Simulink untuk simulasi dan kontrol	Tidak mempertimbangkan laju aliran air sebagai parameter kontrol	Menambahkan sensor flow untuk mempertimbangkan laju aliran dalam pengambilan keputusan[7]
4	Margianto, A., & Kurniawan, A. (2008)	PENGENDALIAN TINGGI PERMUKAAN CAIRAN BERBASIS FUZZY	Fuzzy Logic Control, Sensor Ultrasonik, Motor Stepper	Implementasi kontrol fuzzy untuk pengendalian tinggi permukaan cairan	Tidak menggunakan aktuator analog; kontrol hanya ON/OFF	Menggunakan motorized valve untuk kontrol bukaan katup secara bertahap[8]
5	Nugroho, T. A., Tibyani, T., & Putri, R. R. M. (2018)	Kontrol Ketinggian Air pada Budidaya Ikan dan	Fuzzy Takagi-Sugeno, Sensor Ultrasonik, Sensor Hujan, Arduino	Mengontrol ketinggian air dengan mempertimbangkan curah hujan	Fokus pada budidaya ikan dan tanaman; tidak mempertimbangkan distribusi	Menerapkan kontrol fuzzy pada sistem distribusi air di gedung bertingkat

		Tanaman Yumina Bumina Menggunakan Metode Fuzzy Takagi-Sugeno			air di gedung bertingkat	dengan mempertimbangan kebutuhan praktis[9]
6	Insantama, D. A., & Suprianto, B. (2019)	RANCANG BANGUN KENDALI LEVEL AIR OTOMATIS PADA TANGKI DENGAN SERVO VALVE BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROLLE R MENGGUNAKAN ARDUINO	Fuzzy Logic Controller, Sensor Ultrasonik, Servo Valve, Arduino Uno	Implementasi kontrol fuzzy untuk kendali level air otomatis	Tidak mempertimbangkan laju aliran air sebagai parameter kontrol	Menambahkan sensor flow untuk mempertimbangkan laju aliran dalam pengambilan keputusan[10]
7	D. Prahara (2014)	Perencanaan Sistem Plambing Air Bersih Pada Bangunan Kondotel dengan Menggunakan Sistem Gravitasi dan Pompa	Sistem gravitasi dan pompa (tanpa kontrol otomatis)	Mendesain sistem distribusi air bersih untuk bangunan bertingkat	Tidak menggunakan sistem kendali otomatis	Menambahkan fuzzy logic dan sensor untuk otomatisasi distribusi air di gedung[1]
8	R. Oktaviana et al. (2022)	Rancang Bangun Sistem Kendali Water Level Berbasis IoT dengan PID	PID Controller, Sensor Level, IoT (ESP8266)	Integrasi IoT dengan sistem kendali air	Tidak menggunakan fuzzy logic; respon terbatas	Perbandingan kontrol fuzzy dengan PID dalam aplikasi serupa[2]
9	D. R. Kakani et al. (2024)	COMPARATIVE ANALYSIS OF PI AND PID CONTROLLERS FOR LEVEL AND FLOW CONTROL IN COUPLED TANK SYSTEMS	PI & PID Controller, Sensor Level & Flow	Analisis kontrol simultan antara ketinggian dan laju aliran	Tidak membahas kontrol berbasis fuzzy	Menambahkan fuzzy untuk kontrol lebih adaptif dan fleksibel[3]
10	A. Musafa & R. Wibisono (2019)	Integrated Water Level Control System Using Fuzzy Logic	Fuzzy Mamdani, sensor ultrasonik HC-SR04, motor DC, Arduino Mega2560	Mengontrol dua pintu air secara terintegrasi dengan fuzzy logic	Tidak mempertimbangkan laju aliran air (flow rate) sebagai parameter kontrol	Menambahkan sensor flow untuk mempertimbangkan laju aliran dalam pengambilan

						keputusan untuk control ketinggian ari dalam tanki[5]
11	F. Azmi et al. (2019)	Rancang Bangun Water Level Detection Dengan Sensor Ultrasonik Berbasis Fuzzy Logic	Fuzzy Logic, Sensor Ultrasonik, Arduino Uno	Implementasi fuzzy logic sederhana untuk deteksi level air	Tidak menggunakan aktuator atau sistem distribusi	Mengembangkan sistem fuzzy yang mengontrol aktuator (motorized valve) secara real-time[11]

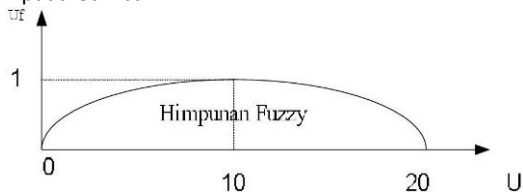
2.2. Sistem Pengukuran dan Kontrol Ketinggian Air

Sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air berfungsi untuk menjaga level air dalam tangki tetap stabil dan berada dalam batas aman. Sistem ini penting dalam aplikasi gedung bertingkat untuk mencegah kehabisan atau meluapnya air[1]. Sensor ultrasonik seperti HC-SR04 sering digunakan karena mampu mengukur ketinggian air secara non-kontak dan akurat. Sensor ini bekerja dengan memancarkan gelombang ultrasonik dan mengukur waktu pantulannya untuk menentukan jarak ke permukaan air[11].

Kontrol sistem dapat dilakukan secara otomatis menggunakan motorized valve, yang dibuka atau ditutup berdasarkan hasil pengukuran. Untuk mengatasi kondisi sistem yang berubah-ubah, metode logika fuzzy digunakan karena mampu menangani ketidakpastian dan non-linearitas tanpa model matematis kompleks[7].

2.3. Logika Fuzzy

Logika fuzzy merupakan perluasan dari logika biner (true/false atau 1/0) yang diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Tidak seperti logika biner yang hanya memiliki dua nilai keanggotaan (0 dan 1), logika fuzzy memungkinkan derajat keanggotaan suatu variabel berada dalam rentang kontinu antara 0 sampai 1. Hal ini membuat logika fuzzy lebih fleksibel dalam menangani permasalahan yang bersifat tidak pasti, ambigu, atau tidak dapat didefinisikan secara tegas. seperti tampak pada Gambar 1.

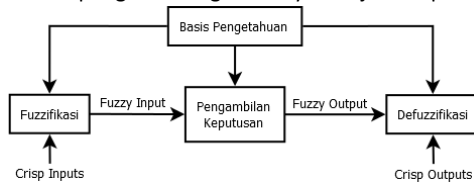


Gambar 1. Himpunan Fuzzy[8]

Dalam sistem kontrol, logika fuzzy digunakan untuk meniru cara kerja pengambilan keputusan manusia yang berdasarkan pada pengalaman dan intuisi. Proses kerja logika fuzzy umumnya terdiri dari tiga tahapan utama:

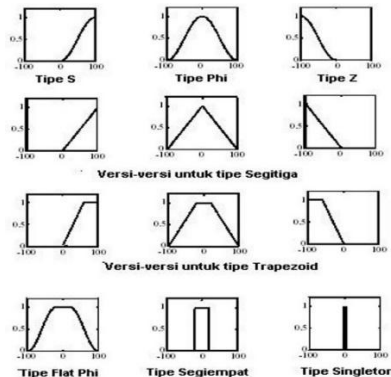
1. Fuzzifikasi (Fuzzification)

Proses ini mengubah nilai input numerik (crisp) menjadi nilai fuzzy dengan menentukan derajat keanggotaan terhadap suatu himpunan fuzzy[8]. Konfigurasi dasar pengendali logika fuzzy ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konfigurasi dasar pengendali logika fuzzy

Misalnya, ketinggian air bisa didefinisikan dalam beberapa himpunan fuzzy seperti *Rendah*, *Sedang*, dan *Tinggi*. Beberapa bentuk fungsi keanggotaan pada Gambar 3.



Gambar 3. Berbagai Tipe Fungsi Keanggotaan [12]

2. Inferensi Fuzzy (Fuzzy Inference)

Proses ini menggunakan aturan-aturan IF-THEN berbasis fuzzy untuk memetakan input fuzzy ke output fuzzy. Setiap aturan menghasilkan suatu output fuzzy berdasarkan nilai keanggotaan input terhadap himpunan fuzzy[12].

3. Defuzzifikasi (Defuzzification)

Proses ini mengubah hasil fuzzy dari proses inferensi menjadi nilai crisp (numerik) sebagai output akhir sistem.

2.4. Defuzzifikasi Center of Gravity (COG)

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam sistem logika fuzzy yang berfungsi untuk mengubah keluaran fuzzy hasil proses inferensi menjadi nilai tegas (*crisp*). Nilai crisp ini diperlukan agar sistem kendali dapat memberikan perintah yang jelas dan terukur kepada aktuator, seperti pompa air atau motorized valve pada sistem kontrol ketinggian air. Salah satu metode defuzzifikasi yang paling umum digunakan adalah metode Center of Gravity (COG) atau sering juga disebut metode centroid. Metode ini menentukan nilai keluaran crisp berdasarkan titik pusat luas dari hasil agregasi fungsi keanggotaan output fuzzy. Dengan mempertimbangkan seluruh derajat keanggotaan yang aktif, metode COG mampu menghasilkan keluaran yang halus dan stabil.

Secara matematis, metode defuzzifikasi Center of Gravity dirumuskan sebagai berikut:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$$

Di mana:

- z = nilai crisp hasil defuzzifikasi,
- μ_i = derajat keanggotaan hasil inferensi fuzzy ke- i ,
- z_i = nilai singleton output ke- i .

Dalam sistem kontrol ketinggian air, metode defuzzifikasi COG digunakan untuk menentukan besarnya sinyal kendali berdasarkan kondisi ketinggian air dan debit aliran. Nilai crisp yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk mengatur sudut buka aktuator sehingga ketinggian air dalam tangki dapat dipertahankan pada kondisi yang diinginkan. Metode ini memberikan hasil yang lebih presisi karena mempertimbangkan kontribusi seluruh nilai fuzzy yang aktif.

2.5. Arduino Uno

Arduino merupakan salah satu *platform* mikrokontroler yang paling populer karena kemudahannya dalam pemrograman dan dukungan komunitas yang luas. Arduino Uno, yang berbasis ATmega328P. Memiliki 14 input/output digital (6 diantaranya output untuk PWM), 6 analog input, resonator kristal keramik 16 MHz, port USB, soket adaptor, pin header ICSP dan tombol reset[13]. mampu mengendalikan berbagai perangkat input dan output. Arduino dapat membaca data dari sensor, memproses logika kontrol (termasuk metode fuzzy)[11].



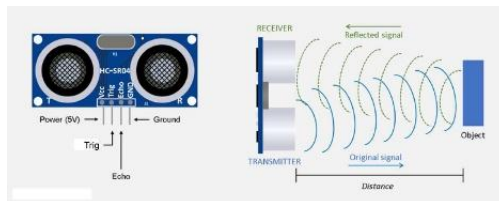
Gambar 4. Arduino Uno

(Sumber gambar: Arduino.cc)

2.6. Sensor Ultrasonik HC-SR04

Sensor ultrasonik adalah sensor yang dapat menerapkan cara kekelawar untuk menentukan jarak dari suatu objek, berdasarkan prinsip pantulan dari gelombang suara sehingga dapat digunakan untuk menafsirkan jarak suatu benda. Gelombang ultrasonik adalah gelombang yang memiliki frekuensi hingga 20.000 Hz. Pada umumnya alat ini akan memancarkan gelombang ultrasonik menuju objek yang dituju. Pantulan dari gelombang suara akan ditangkap oleh sensor, lalu sensor akan menghitung selisih waktu pemancaran gelombang transmitter dan selisih waktu ketika gelombang pantul diterima receiver[14]. Beberapa spesifikasi sensor ultrasonik yang digunakan sebagai berikut:

- | | |
|----------------------------|-----------------|
| 1. Tegangan | : 5 Vdc |
| 2. Arus diam | : 2 mA |
| 3. Arus kerja | : 15 mA |
| 4. Ketepatan membaca sudut | : <15° |
| 5. Rentang jarak | : 2 cm – 400 cm |
| 6. Resolusi | : 0.3 cm |
| 7. Sudut pengukur | : 30° |



Gambar 5. Sensor Ultrasonik HC-SR04

(Sumber gambar: pendidikan-elektro.ft.unesa.ac.id)

2.7. Flow Sensor

Flow sensor atau sensor aliran adalah perangkat yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur laju aliran suatu fluida, baik dalam bentuk cairan maupun gas, yang melewati suatu saluran. Dalam konteks sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air, flow sensor berfungsi untuk memberikan informasi mengenai volume air yang mengalir masuk atau keluar dari tangki. Data ini penting sebagai pendukung kontrol otomatis, karena dapat digunakan untuk memperkirakan perubahan level air dan mendeteksi anomali seperti kebocoran atau ketidaksesuaian antara input dan output air.

Prinsip Kerja:

Flow sensor umumnya bekerja berdasarkan prinsip mekanis atau elektromagnetik. Salah satu jenis flow sensor yang umum digunakan dalam aplikasi berbasis mikrokontroler adalah flow sensor berbasis rotor (turbin), seperti YF-S201. Sensor ini memiliki komponen baling-baling (impeller) yang berputar saat air mengalir melewatinya[15]. Putaran tersebut menghasilkan pulsa listrik, yang kemudian dibaca dan dihitung oleh mikrokontroler (seperti Arduino) untuk menentukan laju aliran.

Jumlah pulsa yang dihasilkan dalam periode waktu tertentu berbanding lurus dengan laju aliran air (flow rate). Mikrokontroler dapat mengonversi pulsa ini menjadi nilai volumetrik, biasanya dalam satuan liter per menit (L/min).

Karakteristik Flow Sensor:

- Rentang pengukuran: Biasanya dari 1 hingga 30 liter per menit, tergantung jenis sensor.
- Tegangan kerja: Umumnya 5V DC, cocok untuk sistem berbasis Arduino.
- Output: Sinyal pulsa digital (square wave).
- Akurasi: Bergantung pada kecepatan aliran dan kalibrasi sensor.

Kelebihan dan Kekurangan:

Kelebihan:

- Ukuran kecil dan harga terjangkau.
- Mudah diintegrasikan dengan sistem digital/mikrokontroler.
- Konsumsi daya rendah.

Kekurangan:

- Rentan terhadap kotoran atau endapan dalam aliran air.
- Akurasinya dipengaruhi oleh viskositas dan tekanan fluida.



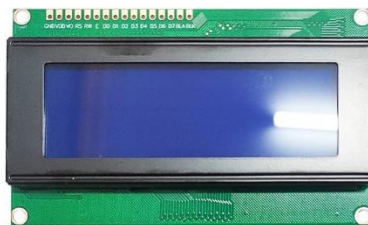
Gambar 6. Flow Sensor

(Sumber gambar: arduinoindonesia.id)

2.8. LCD 20x4

LCD (Liquid Crystal Display) merupakan salah satu jenis tampilan digital yang digunakan secara luas dalam sistem tertanam (embedded system) untuk menampilkan informasi dalam bentuk teks maupun karakter tertentu[16]. LCD 20x4 adalah modul LCD alfanumerik yang memiliki 20 kolom dan 4 baris, sehingga dapat menampilkan hingga 80 karakter sekaligus (20 karakter per baris $\times$ 4 baris). LCD jenis ini umumnya menggunakan kontroler HD44780 atau yang kompatibel, yang memungkinkan pengguna untuk mengontrol tampilan karakter melalui antarmuka paralel (8-bit atau 4-bit data). LCD 20x4 sangat cocok digunakan dalam berbagai proyek mikrokontroler seperti Arduino, karena memiliki konsumsi daya yang rendah dan kemudahan dalam pemrograman. Beberapa spesifikasi LCD 20x4 yang digunakan sebagai berikut:

- Tampilan: 20 karakter $\times$ 4 baris
- Tegangan operasi: 4.7V – 5.3V
- Antarmuka: Paralel (bisa 4-bit atau 8-bit)
- Tipe karakter: Alfanumerik 5x8 dot matrix
- Tersedia dalam varian dengan dan tanpa backlight



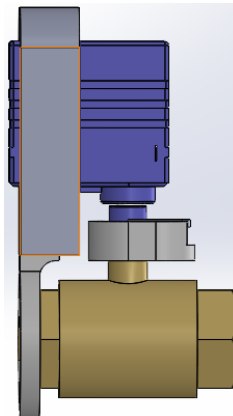
Gambar 7. LCD 20x4

(Sumber gambar: rajguruelectronics)

2.9. Motorized Valve

Motor servo merupakan salah satu jenis aktuator elektrik yang umum digunakan dalam sistem kendali presisi. Servo bekerja berdasarkan sinyal kendali berupa Pulse Width Modulation (PWM) yang menentukan posisi sudut poros motor sesuai lebar pulsa yang diterima dari pengendali seperti mikrokontroler[17]. Dalam konteks sistem otomasi, motor servo sering dimanfaatkan untuk menggerakkan komponen mekanik secara presisi dan responsive.

Servo ini biasanya memiliki sudut kerja antara 0° hingga 180° , yang dapat dimanfaatkan untuk membuka, menutup, atau mengatur bukaan sebagian katup. Untuk mengakomodasi torsi besar, sistem perlu didukung oleh power supply eksternal dengan tegangan 6V–8.4V dan arus tinggi, terutama saat katup berada dalam kondisi tertutup penuh atau membuka beban air yang cukup besar. Penggunaan motor servo sebagai aktuator motorized valve menawarkan keunggulan dari segi biaya dan fleksibilitas. Selain tidak memerlukan sistem pneumatik atau hidrolik, servo mudah diintegrasikan dengan sistem kontrol berbasis logika fuzzy. Oleh karena itu, dalam sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air, motor servo dipilih sebagai aktuator motorized valve karena mampu memberikan pengaturan bukaan katup secara presisi dan responsif sesuai dengan keluaran sistem kendali. Integrasi motor servo dengan pengendali berbasis logika fuzzy memungkinkan penyesuaian sudut bukaan katup secara adaptif terhadap perubahan ketinggian air dan debit aliran, sehingga kestabilan ketinggian air di dalam tangki dapat dipertahankan secara optimal.



Gambar 8. Motorized Valve

2.10. Buzzer

Buzzer adalah perangkat output elektronik yang digunakan untuk menghasilkan suara sebagai bentuk umpan balik (*feedback*) atau peringatan (*alarm*). Dalam sistem otomatisasi, seperti sistem kontrol ketinggian air, buzzer berfungsi sebagai indikator bunyi yang memberi tahu pengguna tentang status tertentu, misalnya saat air mencapai batas atas/bawah, saat pompa menyala, atau ketika terjadi kondisi darurat seperti kekosongan air.

Prinsip Kerja Buzzer:

Buzzer bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik berupa getaran, yang kemudian menghasilkan suara. Dalam buzzer piezoelektrik, getaran dihasilkan oleh efek piezoelektrik dari material kristal yang bergetar saat diberi tegangan bolak-balik[18].



Gambar 9. Buzzer

(Sumber gambar: docs-sunfounder-com.translate.goog)

2.11. LED

LED (Light Emitting Diode) adalah komponen elektronika optoelektronik yang dapat memancarkan cahaya ketika dialiri arus listrik maju. LED merupakan jenis dioda semikonduktor yang memancarkan cahaya tampak maupun cahaya tak tampak (seperti inframerah), tergantung pada bahan semikonduktor yang digunakan[19].

LED bekerja berdasarkan prinsip elektroluminesensi, yaitu kemampuan bahan semikonduktor untuk memancarkan cahaya saat diberi arus listrik. Saat arus listrik mengalir dari anoda ke katoda (arus maju), elektron dan lubang akan bertemu di daerah junction dan melepaskan energi dalam bentuk cahaya.



Gambar 10. LED

(Sumber gambar: leds4life.co.za)

Bab 3. Metode

3.1. Metode Pelaksanaan

Metode pelaksanaan penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Mengumpulkan referensi yang relevan tentang logika fuzzy serta pemahaman komponen utama seperti sensor ultrasonik, flow sensor, Motorized Valve, dan LCD 20x4.

2. Perancangan Sistem

- Perancangan diagram alir system
- Perancangan diagram blok sistem
- Perancangan mekanikal

3. Rancangan Membership Function dan Logika Fuzzy.

4. Implementasi dan Pengujian Sistem.

3.1.1. Perancangan Diagram Alir Sistem

Untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai alur kerja sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air yang dirancang, digunakan diagram alir (flowchart) sebagai representasi visual dari tahapan proses yang dilakukan oleh sistem. Flowchart ini menunjukkan hubungan antarproses mulai dari inisialisasi perangkat, pembacaan sensor, pengolahan data menggunakan logika fuzzy, hingga pengendalian aktuator dan pemberian indikator kondisi sistem, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11.

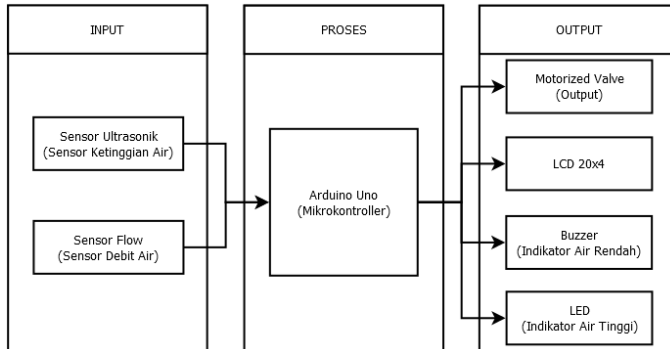


Gambar 11. Flow chart Sistem

Pada Gambar 11 tersebut menunjukkan flowchart sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air dalam tangki, yang menggambarkan alur kerja sistem secara berurutan. Proses dimulai dari inisialisasi perangkat, yang mencakup sensor ultrasonik, sensor flow, motorized valve, LCD 20x4, buzzer, dan LED indikator. Setelah inisialisasi, sistem membaca nilai ketinggian air menggunakan sensor ultrasonik dan debit aliran air masuk menggunakan sensor flow. Kedua data ini merupakan input analog yang kemudian diproses oleh sistem logika fuzzy. Tahap selanjutnya adalah fuzzifikasi, di mana nilai-nilai aktual dari sensor dikonversi menjadi variabel linguistik seperti “rendah”, “sedang”, atau “tinggi”. Proses ini dilanjutkan dengan inferensi fuzzy, yaitu penentuan output berdasarkan aturan-aturan fuzzy yang telah dirancang sebelumnya. Hasil dari inferensi ini kemudian diubah menjadi nilai crisp melalui proses defuzzifikasi menggunakan metode centroid. Nilai crisp hasil defuzzifikasi digunakan untuk mengatur sudut bukaan motor servo pada motorized valve, sehingga memungkinkan sistem mengontrol jumlah debit air yang masuk ke dalam tangki secara proporsional. Setelah pengaturan valve, sistem akan menampilkan informasi ketinggian air dan debit aliran pada layar LCD 20x4 sebagai antarmuka pengguna. Selain pengendalian otomatis, sistem juga melakukan pengecekan kondisi air: jika ketinggian air rendah, buzzer akan aktif sebagai peringatan suara; jika air tinggi, LED indikator akan menyala. Tahap terakhir pada flowchart adalah pengecekan kondisi ketinggian air, yaitu apakah ketinggian air tidak berada pada kondisi tinggi (rendah atau sedang). Jika kondisi tersebut terpenuhi, sistem akan kembali ke proses inisialisasi dan seluruh rangkaian proses akan diulang. Namun, apabila kondisi air berada pada keadaan tinggi, maka proses akan dihentikan (finish). Dengan alur ini, sistem mampu melakukan pengukuran dan pengendalian ketinggian air secara berulang dan terkontrol sesuai dengan kondisi yang terjadi di dalam tangki.

3.1.2. Perancangan Diagram Blok Sistem

Untuk memperjelas struktur sistem serta alur interaksi antar komponen yang digunakan dalam pengujian, disajikan diagram blok sistem yang merepresentasikan hubungan fungsional antara bagian input, proses, dan output. Diagram blok ini memberikan gambaran umum mengenai cara kerja sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air secara keseluruhan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Diagram Blok Sistem

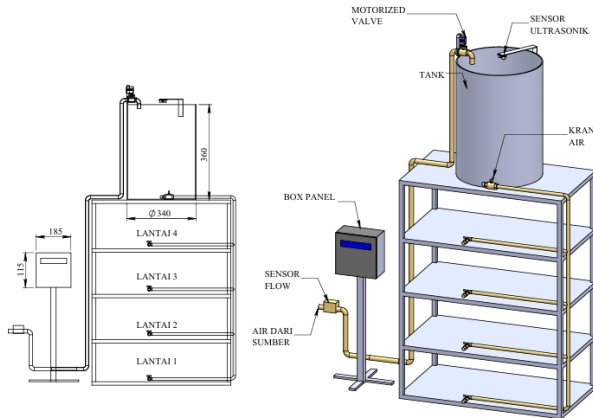
Pada Gambar 12 ditampilkan diagram blok sistem yang menggambarkan hubungan antar komponen utama dalam pengujian. Sistem terdiri dari tiga bagian utama, yaitu input, proses, dan output. Pada bagian input, terdapat dua jenis sensor, yaitu sensor ultrasonik yang berfungsi untuk mengukur ketinggian air dalam tangki dan sensor flow yang digunakan untuk mendeteksi debit air masuk ke dalam sistem. Kedua sensor tersebut mengirimkan data ke bagian pemrosesan. Bagian proses dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno yang bertugas membaca data dari sensor, memprosesnya menggunakan logika fuzzy berdasarkan nilai input, serta menghasilkan output berupa nilai crisp yang digunakan untuk mengatur aktuator dan indikator sistem.

Bagian output terdiri dari beberapa perangkat, yaitu:

- Motorized valve yang berfungsi untuk membuka atau menutup aliran air berdasarkan hasil kontrol fuzzy,
- LCD 20x4 untuk menampilkan informasi seperti nilai ketinggian, debit air, dan sudut bukaan valve
- Buzzer sebagai indikator jika air berada pada kondisi rendah
- LED sebagai penanda ketika air mencapai kondisi tinggi.

3.1.3. Perancangan Mekanikal

Untuk memberikan gambaran mengenai konfigurasi fisik dan tata letak komponen pada sistem yang dirancang, disajikan rancangan mekanikal sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air dalam tangki. Rancangan ini menunjukkan penempatan komponen utama serta hubungan mekanis antarbagian yang mendukung proses pengukuran dan pengendalian ketinggian air, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Perancangan Mekanikal

Pada Gambar 13 ditunjukkan rancangan mekanikal sistem pengukuran dan kontrol ketinggian air dalam tangki yang terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu tangki air, pipa distribusi, sensor, dan aktuator. Tangki air ditempatkan pada lantai atas dari sebuah struktur bertingkat yang merepresentasikan sistem penyimpanan air pada gedung bertingkat. Air dari sumber utama dialirkan menuju tangki melalui pipa PVC, di mana aliran air masuk dikendalikan oleh motorized valve yang pengaturannya dilakukan berdasarkan hasil pemrosesan logika fuzzy. Sensor ultrasonik dipasang pada bagian atas tangki untuk mengukur ketinggian air secara non-kontak, sedangkan sensor flow dipasang pada pipa masuk untuk mendeteksi besarnya debit air yang masuk ke dalam tangki.

Box panel kendali dengan ukuran 115×185 mm berfungsi sebagai pusat pemrosesan dan pengaturan sistem, yang di dalamnya terdapat mikrokontroler serta rangkaian pendukung lainnya. Panel ini juga dilengkapi dengan LCD sebagai antarmuka pengguna untuk menampilkan informasi ketinggian air, debit aliran, dan status sistem secara real-time. Pengaturan aliran air masuk dan keluar dirancang sedemikian rupa sehingga ketinggian air di dalam tangki dapat dijaga tetap stabil sesuai dengan logika pengendalian fuzzy yang diterapkan.

3.2. Rancangan Membership Function dan Logika Fuzzy

Sistem logika fuzzy pada penelitian ini dirancang untuk mengatur bukaan valve air berdasarkan kondisi ketinggian air dan debit air masuk ke dalam tangki. Nilai input dari sensor diproses melalui tahap fuzzifikasi menggunakan fungsi keanggotaan yang disesuaikan dengan karakteristik sistem, kemudian dievaluasi menggunakan rule base fuzzy untuk menentukan aksi kontrol. Hasil inferensi

selanjutnya diubah menjadi nilai tegas (crisp) melalui metode defuzzifikasi Center of Gravity (COG) dan digunakan sebagai sinyal kendali motor servo. Rancangan ini bertujuan untuk menjaga kestabilan ketinggian air serta menyesuaikan laju pengisian air secara adaptif terhadap perubahan kondisi sistem.

3.2.1. Variabel Input dan Output

Pada perancangan sistem logika fuzzy ini, ditentukan beberapa variabel yang merepresentasikan kondisi dan respon sistem pengendalian ketinggian air dalam tangki. Variabel-variabel tersebut terdiri dari variabel input yang diperoleh dari sensor serta variabel output yang digunakan sebagai sinyal kendali aktuator. Rincian jenis variabel, satuan, serta jumlah himpunan fuzzy yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Tabel 2.

Table 2. Variabel Input dan Output

Jenis	Variabel	Satuan	Jumlah Himpunan Fuzzy
Input	Ketinggian Air	cm	3 (Rendah, Sedang, Tinggi)
Input	Debit Air Masuk	L/min	3 (Pelan, Sedang, Kencang)
Output	Bukaan Valve	Derajat (°)	▪ Full Open (0°) ▪ Half Open (45°) ▪ Closed (90°)

Berdasarkan Tabel 2, sistem fuzzy yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dua variabel input dan satu variabel output. Kedua variabel input tersebut diolah melalui proses fuzzifikasi untuk menentukan derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan fuzzy. Selanjutnya, hasil inferensi fuzzy diubah menjadi nilai tegas (crisp) menggunakan metode defuzzifikasi Center of Gravity (COG). Nilai crisp yang dihasilkan kemudian dikategorikan dalam bentuk label aksi kontrol bukaan valve, yaitu terbuka penuh, setengah terbuka, dan tertutup.

3.2.2. Membership Function untuk Input Ketinggian Air

Variabel ketinggian air digunakan sebagai parameter utama dalam sistem pengendalian karena merepresentasikan kondisi volume air di dalam tangki. Fungsi keanggotaan dirancang berdasarkan tinggi maksimum tangki sebesar 35 cm agar sesuai dengan kondisi sistem. Variabel ini dibagi ke dalam tiga himpunan fuzzy, yaitu Rendah, Sedang, dan Tinggi, dengan fungsi keanggotaan berbentuk trapesium untuk himpunan Rendah dan Tinggi serta segitiga untuk himpunan Sedang guna menghasilkan transisi nilai yang halus.

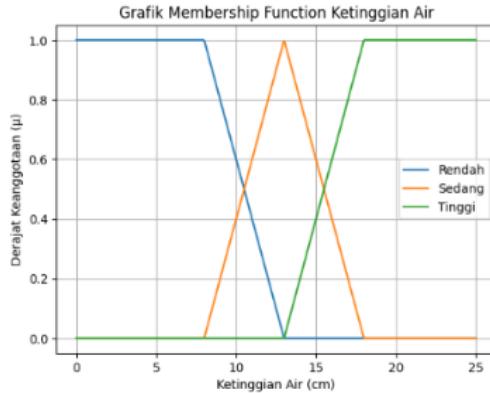
Table 3. Membership Function Ketinggian Air

Himpunan	Rentang(x)	Fungsi Keanggotaan (μ)
Rendah	$x < 13$	$\mu = 1$ untuk $0 \leq x \leq 8$ $\mu = (13 - x) / 5$ untuk $8 < x < 13$ $\mu = 0$ untuk $x > 13$
Sedang	8 - 18	$\mu = (x - 8) / 5$ untuk $8 < x \leq 13$ $\mu = (18 - x) / 5$ untuk $13 < x \leq 18$ $\mu = 0$ untuk lainnya
Tinggi	$x > 13$	$\mu = (x - 13) / 5$ untuk $13 < x \leq 18$ $\mu = 1$ untuk $x > 18$ $\mu = 0$ untuk $x \leq 13$

Berdasarkan Table 3, pembagian fungsi keanggotaan pada variabel ketinggian air, masing-masing himpunan fuzzy memiliki rentang dan karakteristik derajat keanggotaan yang berbeda. Penjelasan mengenai batasan dan perilaku setiap himpunan fuzzy tersebut diuraikan sebagai berikut:

- Himpunan Rendah mencakup nilai ketinggian dari 0 hingga 13 cm, dengan keanggotaan penuh ($\mu = 1$) pada rentang 0 hingga 8 cm, lalu menurun secara linear hingga mencapai $\mu = 0$ pada titik 13 cm.
- Himpunan Sedang beroperasi pada rentang 8 hingga 18 cm, dengan titik puncak keanggotaan ($\mu = 1$) tepat pada 13 cm. Nilai keanggotaannya meningkat dari 8 cm menuju 13 cm dan menurun kembali hingga mencapai $\mu = 0$ pada titik 18 cm.
- Himpunan Tinggi dimulai dari titik 13 cm, di mana nilai keanggotaan meningkat secara linear hingga mencapai ($\mu = 1$) pada titik 18 cm. Status keanggotaan akan tetap bernilai 1 untuk setiap ketinggian yang melebihi 18 cm.

Visualisasi fungsi keanggotaan ketinggian air ditunjukkan pada Gambar 14, yang memperlihatkan adanya irisan (overlap) antar himpunan pada rentang 8–13 cm dan 13–18 cm. Overlap ini bertujuan untuk menghasilkan transisi sistem yang halus dan menghindari perubahan aksi kontrol yang bersifat mendadak.



Gambar 14. Grafik Membership Function Ketinggian Air

3.2.3. Membership Function untuk Input Debit Air (Flow Rate)

Variabel debit air masuk merepresentasikan laju aliran air selama proses pengisian tangki. Oleh karena itu, fungsi keanggotaan dirancang berdasarkan hasil pembacaan sensor flow dan kondisi operasional sistem. Variabel ini dibagi menjadi tiga himpunan fuzzy, yaitu Pelan, Sedang, dan Kencang, dengan fungsi keanggotaan berbentuk trapesium dan segitiga asimetris untuk menghasilkan transisi aliran yang halus.

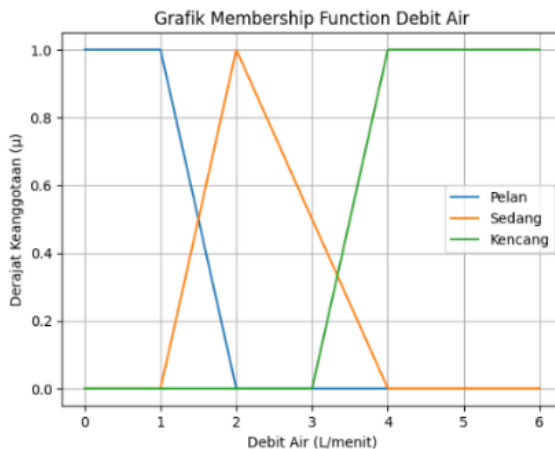
Table 4. Membership Function Debit Air

Himpunan	Rentang (x)	Fungsi Keanggotaan (μ)
Pelan	$x < 2$	$\mu = 1$ untuk $x \leq 1$ $\mu = (2 - x)$ untuk $1 < x \leq 2$ $\mu = 0$ untuk $x > 2$
Sedang	1 - 4	$\mu = (x - 1)$ untuk $1 < x \leq 2$ $\mu = (4 - x)/2$ untuk $2 < x \leq 4$ $\mu = 0$ untuk lainnya
Kencang	$x > 3$	$\mu = (x - 3)$ untuk $3 < x \leq 4$ $\mu = 1$ untuk $x > 4$ $\mu = 0$ untuk $x \leq 3$

Berdasarkan Table 4, perancangan fungsi keanggotaan variabel debit air masuk, masing-masing himpunan fuzzy memiliki rentang nilai dan karakteristik derajat keanggotaan yang berbeda. Penjelasan setiap himpunan fuzzy debit air diuraikan sebagai berikut:

- Himpunan Pelan memiliki derajat keanggotaan penuh ($\mu = 1$) ketika debit air berada pada rentang 0 hingga 1 L/menit. Nilai keanggotaannya kemudian menurun secara linear hingga mencapai $\mu = 0$ tepat pada titik 2 L/menit.
- Himpunan Sedang berlaku pada rentang 1 hingga 4 L/menit, dengan nilai keanggotaan tertinggi ($\mu = 1$) tepat pada titik 2 L/menit. Kurva ini meningkat dari 1 L/menit menuju 2 L/menit, lalu menurun secara linear dengan kemiringan yang berbeda hingga mencapai $\mu = 0$ pada titik 4 L/menit.
- Himpunan Kencang mulai terdeteksi setelah nilai debit melewati 3 L/menit. Nilai keanggotaannya meningkat dari $\mu = 0$ pada 3 L/menit hingga mencapai keanggotaan penuh ($\mu = 1$) pada titik 4 L/menit, dan akan tetap bernilai 1 untuk semua nilai debit yang lebih besar dari 4 L/menit.

Visualisasi fungsi keanggotaan debit air ditunjukkan pada Gambar 15, yang memperlihatkan adanya irisan (overlap) antar himpunan pada rentang 1–2 L/menit dan 3–4 L/menit. Overlap ini memungkinkan terjadinya transisi yang halus antar kategori debit air selama proses fuzzifikasi.



Gambar 15. Grafik Membership Function Debit Air

3.2.4. Rule Base Fuzzy (3x3 = 9 Rule)

Rule base fuzzy berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan dalam sistem kendali, yang menghubungkan kondisi variabel input dengan aksi kontrol yang dihasilkan. Aturan-aturan fuzzy ini disusun berdasarkan kombinasi kondisi ketinggian air dan debit air masuk untuk menentukan sudut bukaan valve yang sesuai dengan keadaan sistem. Pada Tabel 5 ditunjukkan rule base fuzzy yang terdiri dari tiga variabel linguistik untuk setiap input, yaitu ketinggian air (Rendah,

Sedang, dan Tinggi) serta debit air masuk (Pelan, Sedang, dan Kencang). Kombinasi kedua variabel input tersebut menghasilkan total sembilan aturan fuzzy (3×3), di mana setiap aturan menghasilkan keluaran berupa sudut bukaan valve servo dalam bentuk nilai crisp hasil proses defuzzifikasi.

Table 5. Rule Base Fuzzy

Membership		Ketinggian Air		
		Rendah	Sedang	Tinggi
Debit Air	Pelan	1	2	3
	Sedang	4	5	6
	Kencang	7	8	9

Berdasarkan Tabel 5, kombinasi antara ketinggian air dan debit air masuk dipetakan ke dalam sembilan aturan fuzzy yang masing-masing menghasilkan aksi kontrol bukaan valve. Penomoran aturan digunakan sebagai acuan dalam proses inferensi untuk menentukan keluaran sistem sesuai kondisi input yang terdeteksi.

3.2.5. Defuzzifikasi (Center of Gravity - COG)

Defuzzifikasi adalah proses untuk mengubah hasil inferensi fuzzy yang bersifat linguistik menjadi nilai tegas (crisp) agar dapat digunakan sebagai perintah langsung untuk aktuatur, dalam hal ini servo motor yang mengatur bukaan valve air. Pada sistem ini, metode defuzzifikasi yang digunakan adalah Center of Gravity (COG), yang mencari titik rata-rata dari distribusi keluaran fuzzy berdasarkan bobot aktivasi dari setiap rule fuzzy yang aktif.

Langkah-langkah Defuzzifikasi:

1) Fuzzifikasi Input

Tahap awal dimulai dengan mengubah nilai konkret (crisp) dari sensor ketinggian air (ultrasonik) dan sensor laju aliran (flow sensor) menjadi nilai linguistik. Proses ini menggunakan fungsi keanggotaan segitiga (triangular) yang telah didefinisikan dalam kode program untuk menentukan derajat keanggotaan μ dari masing-masing variabel input.

2) Inferensi (Rule Base)

Setelah nilai input diubah menjadi derajat keanggotaan, sistem melakukan evaluasi terhadap 9 aturan (rule) yang telah dirancang. Menggunakan metode Mamdani dengan operator AND (MIN), sistem mencari nilai aktivasi minimum dari dua derajat keanggotaan input pada setiap aturan yang aktif. Tahap ini menentukan seberapa besar pengaruh setiap aturan terhadap keputusan output.

3) Agregasi Output

Langkah selanjutnya adalah agregasi, yaitu proses penggabungan seluruh aturan yang aktif menjadi satu daerah fuzzy tunggal. Pada sistem ini, kategori output dibagi menjadi tiga yaitu: Terbuka Full (0°), Setengah (45°), dan Tertutup (90°). Metode agregasi yang digunakan adalah MAX, di mana sistem akan mengambil nilai derajat keanggotaan tertinggi jika terdapat beberapa aturan dengan konsekuensi (output) yang sama.

4) Defuzzifikasi

Nilai hasil agregasi yang masih bersifat *fuzzy* kemudian diubah kembali menjadi nilai tegas (*crisp*) melalui proses defuzzifikasi. Metode yang diterapkan adalah *Center of Gravity* (COG) dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Crisp} = \frac{(\mu_{\text{terbuka penuh}} \times 0) + (\mu_{\text{terbuka sebagian}} \times 45) + (\mu_{\text{tertutup}} \times 90)}{\mu_{\text{terbuka penuh}} + \mu_{\text{terbuka sebagian}} + \mu_{\text{tertutup}}}$$

Metode ini mencari titik berat dari distribusi keluaran *fuzzy* berdasarkan bobot aktivasi dari setiap aturan yang telah dipetakan ke dalam nilai *singleton* (0, 45, dan 90).

5) Hasil Akhir Sistem

Sebagai tahap akhir, nilai *crisp* yang dihasilkan dari proses defuzzifikasi digunakan sebagai sinyal kendali langsung bagi aktuator. Motor servo akan bergerak menuju sudut yang sesuai dengan nilai tersebut untuk mengatur bukaan valve secara presisi. Hal ini memastikan bahwa laju pengisian air selalu selaras dengan kondisi ketinggian air riil di dalam tangki, sehingga stabilitas air tetap terjaga dan risiko luapan dapat dihindari."

3.3. Alat dan Bahan

Alat dan bahan pendukung yang diperlukan untuk melakukan Tugas Akhir ini terdapat pada Tabel 6.

Table 6. Estimasi biaya

No.	Alat/bahan	Harga Satuan (Rp.)	Jumlah	Total (Rp.)	Keterangan
1	Arduino Uno	80.000	1	80.000	Pribadi
2	Servo	195.000	1	195.000	Pribadi
3	Buck Converter LM2596	6.500	2	13.000	Pribadi
4	Flow Sensor 1/2"	23.000	2	46.000	Pribadi

5	Power supply 12 - 5Vdc, 3 A	35.000	1	35.000	Pribadi
6	LCD 20x4+I2C+Frame	78.000	1	78.000	Pribadi
7	Sensor Ultrasonik+Case	24.500	1	24.500	Pribadi
8	Buzzer	1.500	1	1.500	Pribadi
9	LED	300	1	300	Pribadi
10	Box Casing	15.000	1	15.000	Pribadi
11	Wadah air / Tangki	64.000	1	64.000	Pribadi
12	Pipa $\frac{1}{2}$ "	25.000	1	25.000	Pribadi
13	DC Fan 2.5x2.5	17.000	1	17.000	Pribadi
14	Ball Valve $\frac{1}{2}$ "	19.000	2	19.000	Pribadi
15	Knee Elbow $\frac{1}{2}$ "	9.000	1	9.000	Pribadi
16	Mounting Servo	35.000	1	35.000	Pribadi
17	Terminal Blok 4 Pin	6.000	1	6.000	Pribadi
18	Terminal Blok 3 Pin	4.500	1	4.500	Pribadi
19	Saklar	2.500	1	2.500	Pribadi
20	Kabel Power AC+Socket	10.000	1	10.000	Pribadi
21	Socket Drat Luar $\frac{1}{2}$ "	4.000	1	4.000	Pribadi
22	Elbow $\frac{1}{2}$ "	3.000	3	9.000	Pribadi
25	Elbow Drat Dalam $\frac{1}{2}$ "	4.000	1	4.000	Pribadi
Total				697.300	

3.4. Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pengontrol ketinggian air yang telah dirancang, baik dari sisi akuisisi data, proses inferensi logika fuzzy, maupun respons aktuator. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu bekerja sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan.

Secara khusus, pengujian dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam:

1. Mengukur dan menginterpretasikan dua parameter input, yaitu ketinggian air menggunakan sensor ultrasonik dan debit air masuk menggunakan sensor flow.
2. Menghasilkan output kontrol berupa sudut bukaan motor servo berdasarkan hasil defuzzifikasi logika fuzzy.
3. Merespons perubahan kondisi air secara adaptif dengan menerapkan metode defuzzifikasi Center of Gravity (COG).

Selain itu, sistem juga diuji dari sisi antarmuka dan indikator, di mana LCD 20x4 digunakan untuk menampilkan nilai input dan output secara real-time, serta buzzer dan LED digunakan sebagai indikator kondisi air rendah dan air tinggi.

3.4.1. Pengujian 9 Rule

Pengujian terhadap sembilan rule fuzzy dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem logika fuzzy dalam merespons berbagai kombinasi kondisi ketinggian air dan debit air masuk sesuai dengan rule base yang telah dirancang. Sistem fuzzy menggunakan dua variabel input, masing-masing terdiri dari tiga himpunan keanggotaan, sehingga menghasilkan sembilan aturan (3×3). Setiap aturan diuji dengan memberikan variasi nilai input yang berbeda agar seluruh rule dapat diaktifkan dan dievaluasi secara menyeluruh. Hasil pengujian terhadap sembilan rule fuzzy disajikan pada Tabel 7, yang menunjukkan hubungan antara nilai input ketinggian air dan debit air masuk, kategori fuzzy masing-masing input, nilai output crisp hasil defuzzifikasi, serta sudut bukaan motor servo yang dihasilkan oleh sistem.

Table 7. Pengujian 9 Rule

No	Ketinggian Air (cm)	Kategori Ketinggian	Debit Air Masuk (L/min)	Kategori Debit	Output Fuzzy (Crisp)	Sudut Servo (°)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Berdasarkan Tabel 7, setiap kombinasi nilai ketinggian air dan debit air masuk menghasilkan output fuzzy berupa nilai crisp yang berbeda. Nilai tersebut diperoleh melalui proses fuzzifikasi, inferensi Mamdani, dan defuzzifikasi menggunakan metode Center of Gravity (COG). Output crisp kemudian dikonversikan menjadi sudut bukaan motor servo sebagai aktuator sistem, yaitu:

- 0° untuk *Full Open*
- 45° untuk *Half Open*
- 90° untuk *Closed*

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons yang konsisten sesuai dengan kondisi input. Pada ketinggian air rendah dan debit air masuk kecil, motor servo cenderung berada pada kondisi terbuka untuk meningkatkan pengisian tangki. Sebaliknya, pada ketinggian air tinggi dan debit air masuk besar, sudut bukaan servo mengecil hingga tertutup untuk mencegah kelebihan air. Hal ini menunjukkan bahwa rule base yang dirancang telah bekerja sesuai dengan prinsip pengendalian ketinggian air dalam tangki.

3.4.2. Pengujian Kondisi Air dalam Tangki

Pengujian kondisi air dalam tangki dilakukan untuk mengetahui kestabilan dan respons sistem fuzzy dalam jangka waktu yang lebih panjang terhadap fluktuasi kondisi air. Secara konseptual, pengujian ini merepresentasikan pengujian selama 24 jam, namun pada tahap implementasi dilakukan penyederhanaan waktu pengujian.

Untuk keperluan analisis fluktuasi, pengujian 24 jam disimulasikan menjadi pengujian selama 1 jam, dengan asumsi bahwa perubahan kondisi air dalam rentang waktu tersebut telah mewakili karakteristik fluktuasi sistem. Data diambil secara periodik setiap 2,5 menit, sehingga dalam waktu 1 jam diperoleh 24 data pengukuran. Parameter yang diamati dalam pengujian ini meliputi ketinggian air, debit air masuk, serta respons sudut bukaan motor servo yang dihasilkan oleh sistem fuzzy. Hasil pengujian ini digunakan untuk menganalisis kestabilan sistem, kemampuan adaptasi terhadap perubahan kondisi air, serta efektivitas pengendalian ketinggian air dalam tangki.

Parameter yang diamati dalam pengujian ini meliputi ketinggian air dalam tangki yang diukur menggunakan sensor ultrasonik, debit air keluar yang diukur menggunakan sensor flow meter, serta respons sistem kendali terhadap perubahan kondisi air. Data ketinggian air yang diperoleh selanjutnya dikonversi menjadi volume air (liter) berdasarkan dimensi geometris tangki. Nilai volume air tersebut kemudian dibandingkan dengan debit air keluar untuk menganalisis hubungan antara perubahan volume air dan pola penggunaan air selama periode pengujian.

Pada Tabel 8 digunakan sebagai acuan pencatatan data hasil pengujian kondisi air dalam tangki selama periode 24 jam. Tabel ini memuat data ketinggian air yang diukur pada interval waktu tertentu, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan volume air di dalam tangki. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh gambaran perubahan kondisi air terhadap waktu sebagai bagian dari evaluasi kestabilan sistem pengendalian.

Pada tahap implementasi, pengujian selama 24 jam tersebut disimulasikan menjadi pengujian selama 1 jam dengan interval pengambilan data setiap 2,5 menit. Pendekatan ini digunakan untuk menyederhanakan proses pengujian tanpa menghilangkan karakteristik fluktuasi kondisi air yang terjadi dalam jangka waktu panjang. Data hasil pengujian kemudian digunakan sebagai bahan analisis kinerja sistem pada tahap selanjutnya.

Hasil pengujian selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara volume air dalam tangki (L) dan debit air keluar (L/menit) terhadap waktu, sebagaimana ditunjukkan pada grafik pengujian. Grafik tersebut digunakan untuk menganalisis dinamika perubahan volume air akibat pengaruh debit air keluar serta mengevaluasi kestabilan sistem dalam mempertahankan kondisi air di dalam tangki.

Table 8. Pengujian Ketinggian Air dalam Tangki Selama 24 Jam

Waktu (jam)	Tinggi Air (cm)	Debit Air Keluar (L/menit)
00:00		
01:00		
02:00		
03:00		
04:00		
05:00		
06:00		
07:00		
08:00		
09:00		
10:00		
11:00		
12:00		
13:00		
14:00		
15:00		
16:00		
17:00		
18:00		
19:00		
20:00		
21:00		
22:00		
23:00		
23:59		

Tabel 9 digunakan untuk mencatat hasil pengujian debit air masuk dan debit air keluar selama periode pengujian 24 jam. Tabel ini memuat data debit air yang diukur menggunakan sensor flow meter pada sisi masuk dan sisi keluar tangki. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon sistem terhadap perubahan debit air serta kesesuaian antara debit air masuk dan debit air keluar selama sistem beroperasi.

Seperti pada pengujian ketinggian air, pengujian debit air masuk dan keluar selama 24 jam disimulasikan menjadi pengujian selama 1 jam dengan interval pengambilan data setiap 2,5 menit. Data yang diperoleh pada pengujian ini digunakan untuk mendukung evaluasi kinerja sistem pengendalian ketinggian air pada tahap selanjutnya.

Table 9. Pengujian Debit Air Masuk dan Keluar dalam Tangki Selama 24 Jam

Waktu (Jam)	Debit Air Masuk (L/menit)	Debit Air Keluar (L/menit)
00:00		
01:00		
02:00		
03:00		
04:00		
05:00		
06:00		
07:00		
08:00		
09:00		
10:00		
11:00		
12:00		
13:00		
14:00		
15:00		
16:00		
17:00		
18:00		
19:00		
20:00		
21:00		
22:00		
23:00		
23:59		

3.4.3. Pengujian Sensor Ultrasonik

Pengujian sensor ultrasonik dilakukan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan ketinggian air dalam tangki. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor ultrasonik terhadap pengukuran manual menggunakan penggaris sebagai acuan.



Gambar 16. Perbandingan Pengukuran Ketinggian Air

Berdasarkan pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 16, dilakukan manual menggunakan penggaris untuk memverifikasi akurasi data. Pada tampilan LCD, sensor menunjukkan nilai ketinggian air sebesar 4,05 cm. Jika dibandingkan dengan hasil pengukuran manual menggunakan penggaris plastik pada tangki, posisi permukaan air berada tepat di kisaran angka 4 cm. Perbandingan ini menunjukkan bahwa sensor ultrasonik memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi dengan selisih atau error yang sangat minimal, yakni hanya sekitar 0,05 cm. Hal ini membuktikan bahwa sistem filter Moving Average yang diterapkan dalam kode program berhasil menstabilkan pembacaan sensor sehingga data ketinggian air yang dikirim ke sistem fuzzy logic sangat mendekati kondisi riil saat pengukuran. Parameter akan diproses sebagai input difuzzifikasi untuk menentukan derajat keanggotaan dalam sistem logika fuzzy.

Proses konversi jarak sensor menjadi nilai ketinggian air dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Ketinggian} = \text{Tinggi_Tangki} - \text{Jarak_Sensor}$$

pengujian ini adalah untuk memastikan selisih (*error*) antara pembacaan sensor dan pengukuran manual berada dalam batas toleransi yang sangat kecil, sehingga data yang masuk ke mesin *fuzzy* bersifat presisi dan representatif terhadap kondisi riil di dalam tangki."

3.4.4. Pengujian Sensor Flow

Flow Sensor digunakan untuk mengukur laju aliran air masuk ke dalam tangki. Sensor ini menghasilkan pulsa yang dihitung oleh Arduino dan dikonversi menjadi satuan liter per menit (L/m).

a. Kalibrasi Debit Air Masuk

Kalibrasi debit air masuk dilakukan untuk memperoleh faktor koreksi antara nilai pulsa yang dihasilkan oleh sensor *flow meter* dengan debit air aktual yang diukur secara manual. Proses kalibrasi ini bertujuan untuk

meningkatkan akurasi pembacaan debit air masuk yang digunakan sebagai input pada sistem kendali.

Pengujian kalibrasi debit air masuk dilakukan sebanyak tiga kali percobaan dengan variasi volume dan waktu aliran air, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 11 Kalibrasi Debit Air Masuk. Debit aktual dihitung berdasarkan perbandingan volume air terhadap waktu pengukuran yang kemudian dikonversi ke satuan liter per menit. Selanjutnya, faktor kalibrasi ditentukan dari perbandingan antara frekuensi pulsa sensor (pulsa per detik) terhadap debit aktual yang dihasilkan.

Pada Tabel 10 menunjukkan hasil kalibrasi debit air masuk dalam bentuk tabel, yang memudahkan pembacaan data percobaan dan faktor kalibrasi yang diperoleh.

Table 10. Dokumentasi Kalibrasi Debit Air Masuk

Percobaan	Gambar Hasil Kalibrasi
1	  

2	   
3	   

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 11, diperoleh nilai faktor kalibrasi berturut-turut sebesar 6,89 Hz, 6,72 Hz, dan 6,61 Hz. Dari ketiga percobaan tersebut diperoleh nilai rata-rata faktor kalibrasi sebesar 6,74 Hz. Nilai ini selanjutnya digunakan sebagai konstanta kalibrasi dalam perhitungan debit air masuk pada sistem, sehingga data debit yang terbaca oleh sensor dapat mendekati nilai aktual.

Table 11. Kalibrasi Debit Air Masuk

Percobaan	Volume	Waktu	Pulsa	Debit Aktual:	Faktor Kalibrasi:
		(Detik)		$(\text{Volume}/\text{Waktu}) \times 60$ (L/menit)	$(\text{Pulsa}/\text{Waktu})/\text{Debit}$ (Hz)
1	3,32	53	1372	3,76	6,89
2	3,07	43	1238	4,28	6,72
3	3,5	50	1388	4,20	6,61
Rata-Rata					6,74

b. Kalibrasi Debit Air Keluar

Kalibrasi debit air keluar dilakukan dengan metode yang sama seperti kalibrasi debit air masuk, yaitu dengan membandingkan hasil pembacaan sensor flow meter terhadap pengukuran volume air secara manual dalam interval waktu tertentu. Kalibrasi ini diperlukan untuk memastikan keakuratan data debit air keluar yang berpengaruh langsung terhadap kestabilan ketinggian air dalam tangki.

Pengujian kalibrasi debit air keluar dilakukan sebanyak tiga kali percobaan dengan variasi volume dan waktu aliran, sebagaimana disajikan pada Tabel 13. Debit aktual dihitung menggunakan persamaan volume dibagi waktu pengukuran dan dikonversikan ke satuan liter per menit. Faktor kalibrasi kemudian diperoleh dari perbandingan antara pulsa sensor per detik dengan debit aktual.

Pada Tabel 12 menampilkan tabel hasil kalibrasi debit air keluar, sehingga pembaca dapat dengan mudah melihat data percobaan dan nilai faktor kalibrasi yang diperoleh.

Table 12. Dokumentasi Kalibrasi Debit Air Keluar

Percobaan	Gambar Hasil Kalibrasi
1	 
2	 
3	



Hasil pengujian pada Tabel 13 menunjukkan nilai faktor kalibrasi masing-masing sebesar 7,91 Hz, 6,23 Hz, dan 6,14 Hz. Dari hasil tersebut diperoleh nilai rata-rata faktor kalibrasi sebesar 6,76 Hz. Nilai ini digunakan sebagai parameter kalibrasi dalam sistem untuk menghitung debit air keluar secara lebih akurat.

Table 13. Kalibrasi Debit Air Keluar

Percobaan	Volume	Waktu (Detik)	Pulsa	Debit Aktual:	Faktor Kalibrasi:
				(Volume/Waktu)x60 (L/menit)	(Pulsa/Waktu)/Debit (Hz)
1	1,26	71	598	1,06	7,91
2	1,95	88	729	1,33	6,23
3	2,3	96	847	1,44	6,14
Rata-Rata					6,76

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil

Berdasarkan pengujian yang dilakukan maka mendapatkan hasil seperti dibawah ini. Pada bagian ini pengujian akan dibagi menjadi beberapa tahapan. Sebelum dilakukan pengujian alat secara keseluruhan beberapa tahapan pengujian adalah sebagai berikut.

4.1.1. Data Hasil Pengujian 9 Rule

Pengujian rule dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem fuzzy logic dalam mengatur sudut bukaan valve berdasarkan variasi kondisi ketinggian air dan debit air masuk. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kesesuaian antara rule base yang telah dirancang dengan respons aktual sistem pada aktuator. Hasil pengujian diperoleh dari pengamatan langsung terhadap keluaran sistem pada beberapa kombinasi input yang merepresentasikan seluruh rule fuzzy, sebagaimana disajikan dalam Tabel 14.

Table 14. Hasil Pengujian Rule

No	Ketinggian Air (cm)	Kategori Ketinggian	Debit Air Masuk (L/min)	Kategori Debit	Output Fuzzy (Crisp)	Sudut Servo (°)
1	3	Rendah	0.67	Pelan	0	0
2	12	Sedang	0.59	Pelan	0	0
3	26	Tinggi	0.59	Pelan	45	45
4	5	Rendah	1.6	Sedang	0	0
5	15	Sedang	1.76	Sedang	45	45
6	26	Tinggi	2.27	Sedang	90	90
7	7	Rendah	4.16	Kencang	45	45
8	13	Sedang	3.2	Kencang	53	90
9	31	Tinggi	3.28	Kencang	90	90

Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa sistem fuzzy berhasil mengatur sudut servo sesuai dengan rule base dan logika inferensi fuzzy. Setiap kombinasi input menghasilkan nilai crisp yang sesuai dengan kondisi logika yang dirancang, serta dikonversi menjadi tindakan pada aktuator (servo) secara real-time.

Table 15. Dokumentasi dari Table Pengujian

Rule	Gambar	Keterangan Gambar
1		Rendah-Pelan (Buzzer Aktif)
2		Sedang-Pelan
3		Tinggi-Pelan (LED Aktif)

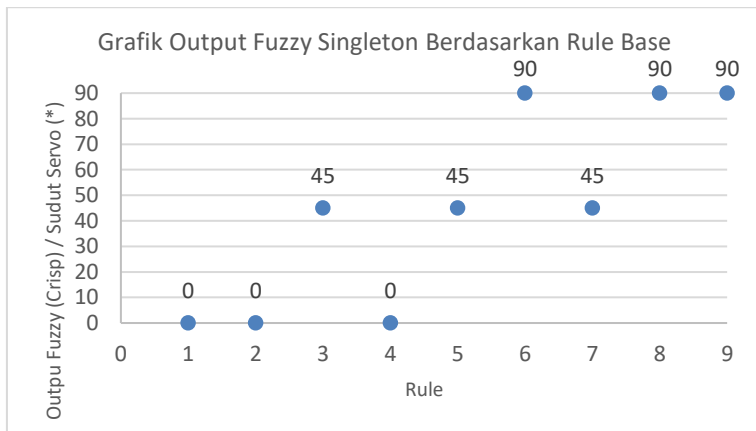
4		Rendah-Sedang (Buzzer Aktif)
5		Sedang-Sedang
6		Tinggi-Sedang (LED Aktif)

7		Rendah-Kencang (Buzzer Aktif)
8		Sedang-Kencang
9		Tinggi-Kencang (LED Aktif)

Untuk memverifikasi validitas data yang tercantum dalam Tabel 15, dilakukan dokumentasi visual pada setiap poin pengujian. Dokumentasi ini menunjukkan

kesesuaian antara pembacaan sensor pada layar LCD dengan posisi fisik motor servo yang bertindak sebagai aktuatur kran air.

Table 14 hingga Table 15 menunjukkan bukti pengujian alat. Sebagai contoh, pada pengujian nomor 3 (Table 9), terlihat bahwa saat ketinggian air mencapai 26 cm dengan debit pelan (0,59 L/min), sistem secara otomatis mengolah data melalui proses defuzzifikasi dan menghasilkan nilai *crisp* 45. Nilai tersebut kemudian menggerakkan servo ke posisi 45° atau terbuka setengah guna mengendalikan laju pengisian tangki. Pada Gambar 17 menampilkan grafik output fuzzy (*crisp*) berbentuk singleton yang dihasilkan dari proses inferensi dan defuzzifikasi pada sistem logika fuzzy. Grafik ini digunakan untuk menunjukkan hubungan antara rule base yang dirancang dengan nilai keluaran berupa sudut bukaan motor servo sebagai aktuatur pengendali aliran air.



Gambar 17. Grafik Output Fuzzy (*crisp*) Singleton

Berdasarkan grafik output fuzzy (*crisp*) singleton yang ditunjukkan pada Gambar 17, dapat diamati bahwa setiap rule pada sistem logika fuzzy menghasilkan nilai keluaran yang bersifat diskrit dan telah ditentukan sebelumnya sesuai dengan perancangan rule base. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa nilai output berada pada tiga tingkat sudut servo, yaitu 0°, 45°, dan 90°, yang masing-masing merepresentasikan kondisi katup terbuka penuh, terbuka setengah, dan tertutup.

Rule dengan kondisi ketinggian air rendah dan debit pelan maupun sedang cenderung menghasilkan output 0°, yang menunjukkan bahwa sistem memberikan bukaan katup maksimal untuk mempercepat proses pengisian tangki. Sementara itu, pada kondisi transisi, seperti ketinggian air sedang atau tinggi dengan debit tertentu, sistem menghasilkan output 45° sebagai upaya

pengendalian aliran air secara bertahap. Pada kondisi ketinggian air tinggi dan debit sedang hingga kencang, output meningkat menjadi 90°, yang menandakan bahwa katup air tertutup guna mencegah terjadinya kelebihan air (overflow).

Dengan demikian, grafik output fuzzy ini membuktikan bahwa rule base yang dirancang telah bekerja secara konsisten dan logis, di mana peningkatan ketinggian air dan debit masuk diikuti oleh peningkatan sudut servo. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali fuzzy mampu memberikan respon yang adaptif dan sesuai dengan kondisi aktual tangki air.

4.1.2. Validasi Data Pengujian

Pada bagian ini, dilakukan validasi mendalam terhadap kinerja logika fuzzy dengan mengambil sampel data saat kondisi tangki hampir penuh namun aliran air masuk cenderung lambat. Berdasarkan pembacaan sensor, diperoleh input berupa Ketinggian = 26 cm dan Debit = 0,59 L/min.

1. Fuzzifikasi Input

Nilai input dari sensor ketinggian air (dengan sensor ultrasonik) dan sensor laju aliran air (flow sensor) akan di-fuzzifikasi menggunakan fungsi keanggotaan segitiga (triangular). Fungsi-fungsi ini telah ditentukan dalam kode program menggunakan batas-batas ketinggian dan debit sebagai berikut:

c. Fuzzifikasi Ketinggian Air

▪ Fungsi keanggotaan:

- Rendah:

$$x > 13 \rightarrow \mu = 0$$

$$\text{Untuk } x = 26 \text{ cm } (\mu_{\text{rendah}} = 0)$$

- Sedang:

$$x > 18 \rightarrow \mu = 0$$

$$\text{Untuk } x = 26 \text{ cm } (\mu_{\text{Sedang}} = 0)$$

- Tinggi:

$$x > 18 \rightarrow \mu = 1$$

$$\text{Karena } 26 > 18, \text{ maka } \mu_{\text{Tinggi}} = 1$$

Hasil Fuzzyfikasi Ketinggian Air:

- Rendah = 0
- Sedang = 0
- Tinggi = 1

d. Fuzzifikasi Debit Air (Flow Rate)

▪ Fungsi keanggotaan:

- Pelan:

$$x \leq 1 \rightarrow \mu = 1$$

$$\text{Karena } 0,59 \leq 1, \text{ maka } \mu_{\text{Pelan}} = 1$$

- Sedang:
 $x \leq 1 \rightarrow \mu = 0$
 Untuk $x = 0,59$ L/menit ($\mu_{Sedang} = 0$)
- Kencang:
 $x \leq 3 \rightarrow \mu = 0$
 Untuk $x = 0,59$ L/menit ($\mu_{Kencang} = 0$)

Hasil Fuzzifikasi Debit Air:

- Pelan = 1
- Sedang = 0
- Kencang = 0

Contoh hasil fuzzifikasi berdasarkan Tabel 16:

Table 16. Hasil Fuzzifikasi Tinggi Air dan Debit Air

Rule	Ketinggian Air (cm)	Fungsi Keanggotaan (μ)	Debit Air (L/min)	Fungsi Keanggotaan (μ)
3	26 (tinggi)	$\mu_{tinggi} =$ $x > 18 =$ $26 > 18 = 1$	0.59 (Pelan)	$\mu_{pelan} =$ $x \leq 1 =$ $0.59 \leq 1 = 1$

2. Inferensi (Rule Base)

Sistem fuzzy menggunakan metode Mamdani dengan operator AND, yang berarti nilai aktivasi suatu rule adalah minimum dari dua derajat keanggotaan input. Karen hanya Tinggi (Ketinggian Air) dan Pelan (Debit Air) maka rule yang aktif:

$$\alpha = \min(\mu_{ketinggian}, \mu_{debit})$$

$$\text{Rule 3} = \min(\mu_{tinggi}, \mu_{pelan})$$

$$\text{Rule 3} = \min(1, 1) = 1$$

Rule lain tidak aktif karena nilai $\mu = 0$

3. Agregasi Output

$$\text{terbuka_full} = \max(\text{rule1}, \text{rule2}, \text{rule4});$$

$$\text{setengah} = \max(\text{rule3}, \text{rule5}, \text{rule7});$$

$$\text{terbuka_sedikit} = \max(\text{rule6}, \text{rule8}, \text{rule9});$$

Hasil Agregasi:

$$\begin{aligned} \text{Terbuka Penuh (0°)} &= 0 \\ \text{Terbuka Setengah (45°)} &= 1 \\ \text{Tertutup (90°)} &= 0 \end{aligned}$$

4. Defuzzifikasi

Rumus:
$$z = \frac{\sum \mu_i \cdot z_i}{\sum \mu_i}$$

Substitusi nilai:
$$z = \frac{(0 \times 0) + (1 \times 45) + (0 \times 70)}{0 + 1 + 0}$$
$$z = \frac{45}{1} = 45$$

Dari rule base fuzzy (lihat Tabel 5), jika ketinggian = Tinggi dan debit = Pelan, maka output crisp = 45. Output crisp ini adalah nilai tetap (singleton) yang telah ditentukan dalam rule base dan dipetakan ke sudut servo (0°–90°).

5. Hasil Akhir Sistem

Berdasarkan proses inferensi dan defuzzifikasi menggunakan metode Center of Gravity (COG), sistem fuzzy menghasilkan nilai crisp sebesar 45. Nilai crisp tersebut kemudian digunakan sebagai sinyal kendali aktuator, sehingga servo bergerak pada sudut 45° yang menunjukkan kondisi valve terbuka setengah.

Output Crips = 45 (Hasil Defuzzifikasi)

Sudut servo = 45° (Terbuka Setengah)

Melalui validasi perhitungan di atas, didapatkan nilai crisp sebesar 45, yang mana hasil ini sama persis dengan nilai yang ditampilkan pada LCD alat saat pengujian dilakukan. Kesesuaian antara perhitungan manual ini dengan hasil operasional alat membuktikan bahwa:

1. Logika Program Valid: Kode program yang ditanamkan pada Arduino Uno telah mengikuti rumus fuzzy Mamdani secara benar.
2. Akurasi Sistem: Seluruh data pada Tabel [Nomor Tabel] dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya karena telah melewati proses validasi matematis yang konsisten.
3. Kestabilan Kontrol: Sistem berhasil mengonversi data sensor yang bersifat dinamis menjadi instruksi sudut servo yang presisi untuk menjaga kestabilan air dalam tangki."

4.1.3. Data Hasil Pengujian Ketinggian Air dalam Tangki Selama 24 Jam

Pengujian ketinggian air dalam tangki dilakukan untuk menganalisis perubahan tinggi permukaan air terhadap waktu serta membandingkan pengaruh debit air keluar terhadap kondisi air di dalam tangki. Data ketinggian air diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan sensor ultrasonik. Selanjutnya, data ketinggian air tersebut dikonversi menjadi volume air agar dapat merepresentasikan jumlah air aktual dalam satuan liter (L) dan memudahkan penyajian serta analisis data dalam bentuk grafik.

Pada pengujian ini, kondisi awal tangki berada pada keadaan terisi air dalam jumlah relatif kecil. Oleh karena itu, peningkatan ketinggian dan volume air pada periode pukul 00.00 hingga 04.00 merupakan proses pengisian awal tangki dan belum sepenuhnya dipengaruhi oleh aktivitas pemakaian air. Analisis perbandingan antara ketinggian air (yang telah dikonversi ke volume) dan debit air keluar difokuskan pada periode setelah tangki mencapai kondisi operasional, yaitu mulai pukul 05.00 hingga akhir periode pengujian.

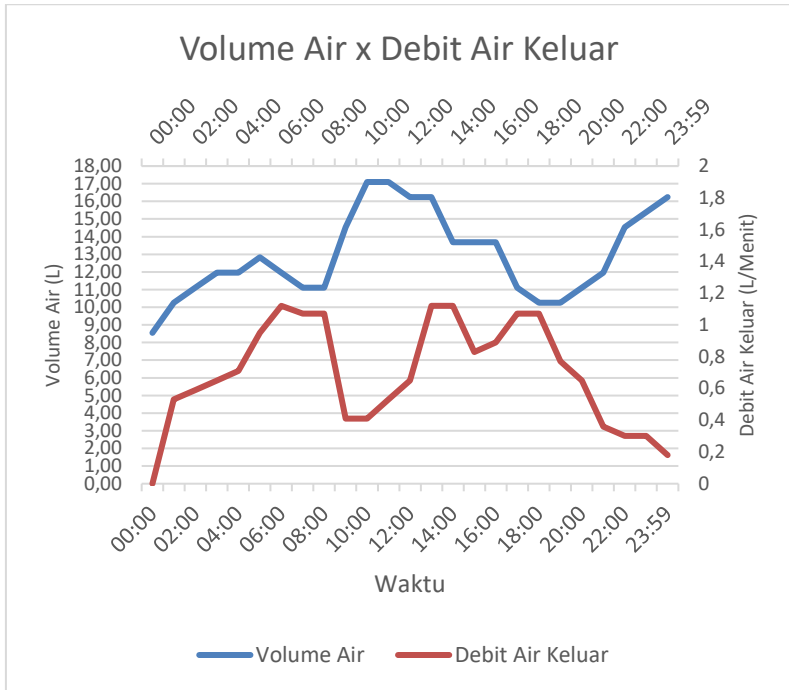
Table 17. Hasil Pengujian Ketinggian Air dalam Tangki dan Debit Air Keluar Selama 24 Jam

Waktu (Jam)	Tinggi Air (cm)	Debit Air Keluar (L/menit)
00:00	10	0
01:00	12	0,53
02:00	13	0,59
03:00	14	0,65
04:00	14	0,71
05:00	15	0,95
06:00	14	1,12
07:00	13	1,07
08:00	13	1,07
09:00	17	0,41
10:00	20	0,41
11:00	20	0,53
12:00	19	0,65
13:00	19	1,12
14:00	16	1,12
15:00	16	0,83
16:00	16	0,89
17:00	13	1,07
18:00	12	1,07
19:00	12	0,77
20:00	13	0,65
21:00	14	0,36
22:00	17	0,3
23:00	18	0,3
23:59	19	0,18

Data hasil pengujian ketinggian air di dalam tangki beserta debit air keluar selama periode 24 jam disajikan pada Tabel 17. Ketinggian air pada tabel tersebut diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan sensor ultrasonik dalam satuan sentimeter (cm), sedangkan debit air keluar diperoleh dari pembacaan sensor flow meter dalam satuan liter per menit (L/menit). Data ketinggian air selanjutnya dikonversi menjadi volume air dalam satuan liter (L) berdasarkan dimensi geometris tangki. Hasil konversi tersebut digunakan untuk menyusun grafik hubungan antara volume air dan debit air keluar terhadap waktu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 18.

Berdasarkan grafik yang ditampilkan, volume air di dalam tangki mengalami fluktuasi sepanjang periode pengujian. Pada awal pengamatan hingga menjelang siang hari, volume air cenderung meningkat secara bertahap dan mencapai nilai maksimum sekitar pukul 10.00–11.00. Pada periode tersebut, debit air keluar berada pada kisaran sedang dan tidak menunjukkan lonjakan yang signifikan, sehingga volume air di dalam tangki masih dapat bertambah.

Setelah mencapai nilai maksimum, volume air mulai mengalami penurunan secara perlahan pada periode siang hingga sore hari. Penurunan volume ini terjadi seiring dengan meningkatnya debit air keluar pada beberapa interval waktu, khususnya pada rentang pukul 13.00 hingga 18.00. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa debit air keluar yang lebih besar berkontribusi terhadap berkurangnya volume air di dalam tangki, meskipun perubahan yang terjadi tidak bersifat ekstrem. Pada periode malam hari hingga menjelang akhir pengujian, grafik memperlihatkan bahwa volume air kembali mengalami peningkatan, sementara debit air keluar cenderung menurun. Pola ini mengindikasikan berkurangnya aktivitas penggunaan air sehingga air yang keluar dari tangki lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi sebelumnya.



Gambar 18. Data Volume Air x Debit Air Keluar

Perbandingan kedua kurva pada grafik menunjukkan bahwa hubungan antara volume air dan debit air keluar tidak selalu berbanding terbalik secara langsung, melainkan dipengaruhi oleh dinamika aliran air secara keseluruhan. Perubahan volume air berlangsung secara bertahap dan mengikuti kecenderungan perubahan debit air keluar dengan jeda waktu tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih mampu menjaga keseimbangan antara air yang masuk dan air yang keluar dari tangki.

Selain itu, kurva volume air yang relatif halus menandakan bahwa hasil konversi ketinggian air menjadi volume bersifat stabil dan konsisten. Kondisi ini menunjukkan bahwa pembacaan sensor ultrasonik serta proses konversi data tidak mengalami gangguan noise yang signifikan, sehingga data volume air dapat merepresentasikan kondisi aktual air di dalam tangki dengan baik.

Berdasarkan hasil analisis grafik volume air dan debit air keluar tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem mampu memantau perubahan kondisi air di dalam tangki secara real-time dengan baik. Fluktuasi volume air yang terjadi masih berada dalam batas operasional yang aman dan sesuai dengan karakteristik

penggunaan air harian. Oleh karena itu, data volume air hasil konversi dari ketinggian air dapat dijadikan dasar yang andal untuk analisis kestabilan sistem serta sebagai referensi dalam proses pengendalian ketinggian atau volume air pada tahap selanjutnya.

4.1.4. Data Hasil Pengujian Debit Air Masuk dan Keluar dalam Tangki Selama 24 Jam

Pengujian debit air masuk dan debit air keluar pada tangki dilakukan untuk menganalisis keseimbangan aliran air serta memvalidasi keterkaitannya dengan fluktuasi ketinggian air sebagaimana telah dijelaskan pada Bab I Latar Belakang. Pada bab tersebut dijelaskan bahwa perubahan kebutuhan air akan memengaruhi debit air keluar dari tangki, yang selanjutnya berdampak langsung terhadap perubahan ketinggian air di dalam tangki. Oleh karena itu, pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mampu memantau debit air masuk dan debit air keluar secara real-time serta merepresentasikan kondisi aliran air secara akurat.

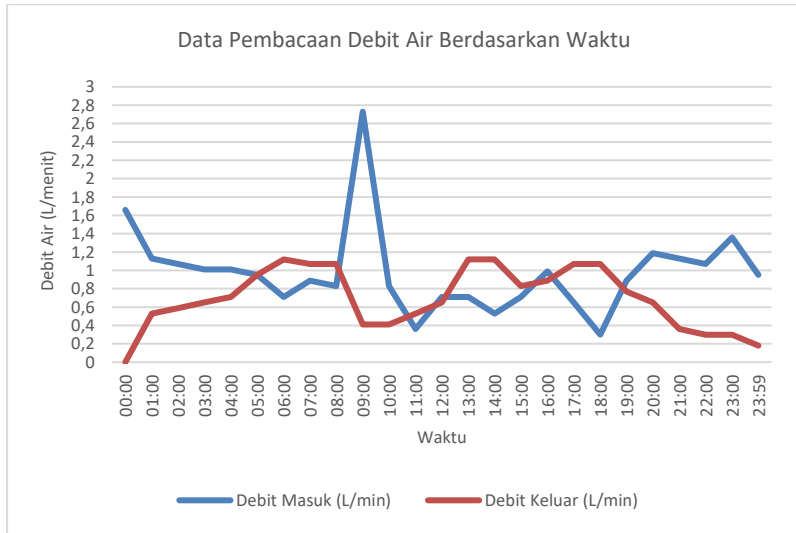
Data hasil pengujian debit air selama periode 24 jam disajikan pada Tabel 18, yang memuat nilai debit air masuk dan debit air keluar dalam satuan liter per menit (L/menit) pada interval waktu tertentu. Berdasarkan data tersebut, debit air masuk dan debit air keluar menunjukkan perubahan yang dinamis sepanjang waktu pengamatan. Debit air masuk berada pada kisaran 0,30 L/menit hingga 2,73 L/menit, sedangkan debit air keluar berada pada rentang 0,18 L/menit hingga 1,12 L/menit. Perbedaan nilai debit ini mencerminkan variasi kondisi pengisian dan pemakaian air di dalam sistem.

Table 18. Hasil Pengujian Debit Air Masuk dan Keluar dalam Tangki Selama 24 Jam

Waktu (Jam)	Debit Air Masuk (L/menit)	Debit Air Keluar (L/menit)
00:00	1,66	0
01:00	1,13	0,53
02:00	1,07	0,59
03:00	1,01	0,65
04:00	1,01	0,71
05:00	0,95	0,95
06:00	0,71	1,12
07:00	0,89	1,07
08:00	0,83	1,07
09:00	2,73	0,41
10:00	0,83	0,41
11:00	0,36	0,53

12:00	0,71	0,65
13:00	0,71	1,12
14:00	0,53	1,12
15:00	0,71	0,83
16:00	0,99	0,89
17:00	0,65	1,07
18:00	0,3	1,07
19:00	0,89	0,77
20:00	1,19	0,65
21:00	1,13	0,36
22:00	1,07	0,3
23:00	1,36	0,3
23:59	0,95	0,18

Untuk mempermudah analisis, data pada Tabel 18 divisualisasikan dalam bentuk grafik debit air terhadap waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 19. Grafik memperlihatkan dua kurva, yaitu kurva debit air masuk dan kurva debit air keluar. Pada periode dini hari hingga pagi awal, debit air masuk cenderung lebih besar dibandingkan debit air keluar, yang menunjukkan proses pengisian tangki masih berlangsung. Peningkatan debit air masuk yang cukup signifikan terlihat pada pukul 09.00, yang mengindikasikan adanya penambahan suplai air ke dalam tangki. Pada periode siang hingga sore hari, khususnya antara pukul 13.00 hingga 18.00, debit air keluar cenderung lebih besar dibandingkan debit air masuk. Kondisi ini mencerminkan meningkatnya aktivitas penggunaan air, sehingga volume air yang keluar dari tangki lebih besar daripada air yang masuk. Sebaliknya, pada malam hari hingga menjelang akhir periode pengujian, debit air keluar kembali menurun, sementara debit air masuk relatif stabil, yang menunjukkan berkurangnya aktivitas pemakaian air.



Gambar 19. Data Pembacaan Debit Air Berdasarkan Waktu

Meskipun terdapat perbedaan antara debit air masuk dan debit air keluar pada beberapa interval waktu, selisih yang terjadi masih berada dalam batas yang wajar dan tidak menunjukkan ketidakseimbangan aliran yang ekstrem. Ketika debit air keluar lebih besar dibandingkan debit air masuk, ketinggian air di dalam tangki cenderung menurun, sedangkan ketika debit air masuk lebih besar, ketinggian air mengalami peningkatan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu merepresentasikan hubungan antara debit aliran dan perubahan ketinggian air secara konsisten. Selain itu, bentuk grafik yang relatif halus tanpa lonjakan tajam mengindikasikan bahwa pembacaan sensor debit air berlangsung stabil dan minim gangguan noise. Dengan demikian, sistem yang dirancang mampu melakukan pemantauan debit air masuk dan keluar secara real-time dengan tingkat keandalan yang baik, dan data ini dapat digunakan sebagai dasar analisis kinerja sistem pengendalian pada pembahasan selanjutnya.

4.2. Pembahasan

1. Akurasi Kontrol Fuzzy

Berdasarkan hasil pengujian sembilan rule fuzzy yang telah disajikan pada Tabel 14, sistem kendali berbasis fuzzy logic menunjukkan tingkat akurasi dan presisi yang baik dalam menentukan respon aktuatur. Penerapan metode defuzzifikasi **Center of Gravity (COG)** memungkinkan sistem menghasilkan nilai keluaran (output crisp) yang bersifat adaptif, karena mempertimbangkan

kombinasi dua variabel input secara simultan, yaitu ketinggian air dan debit air. Keunggulan pendekatan ini terlihat pada proses validasi data, di mana kombinasi ketinggian air sebesar 26 cm dan debit air sebesar 0,59 L/menit menghasilkan sudut putar servo sebesar 45°. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem tidak hanya bekerja pada kondisi batas bawah atau batas atas, tetapi mampu memberikan respon proporsional sesuai kondisi aktual. Dibandingkan dengan sistem kontrol konvensional ON/OFF, kendali fuzzy menghasilkan transisi bukaan katup yang lebih halus sehingga mengurangi fluktuasi ekstrem dan meningkatkan kestabilan sistem secara keseluruhan.

2. Respon Aktuator Servo terhadap Kondisi Air

Motor servo berfungsi sebagai aktuator utama dalam sistem pengendalian debit air dan bekerja berdasarkan hasil inferensi fuzzy yang ditanamkan pada mikrokontroler. Hasil pengujian menunjukkan bahwa servo mampu merespons perubahan kondisi ketinggian air secara konsisten dan sesuai dengan aturan yang telah dirancang. Pada kondisi ketinggian air rendah, yaitu di bawah 13 cm, servo secara konsisten berada pada posisi 0°, yang bertujuan untuk membuka katup secara maksimal agar proses pengisian air berlangsung lebih cepat. Sebaliknya, ketika ketinggian air mendekati atau melebihi ambang batas atas, yaitu di atas 23 cm, servo bergerak menuju sudut 90° untuk mengurangi atau menutup aliran air masuk. Respon dinamis ini terbukti efektif dalam menjaga ketinggian air tetap berada dalam batas operasional yang aman serta mencegah terjadinya luapan air pada tangki gedung bertingkat.

3. Fungsi Indikator Keamanan (Buzzer dan LED)

Selain sistem kendali utama, perangkat ini juga dilengkapi dengan indikator keamanan berupa buzzer dan LED sebagai sistem peringatan dini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua indikator tersebut telah terintegrasi dan berfungsi sesuai dengan kondisi yang telah ditentukan. Buzzer akan aktif pada kondisi ketinggian air rendah sebagai peringatan audio kepada pengelola gedung bahwa cadangan air dalam tangki berada pada level minimum. Sementara itu, LED berfungsi sebagai indikator visual yang menyala ketika ketinggian air mencapai kondisi penuh. Kehadiran indikator keamanan ini melengkapi sistem pengendalian debit air, sehingga sistem tidak hanya berperan sebagai pengatur aliran air, tetapi juga sebagai alat monitoring kondisi tangki secara langsung.

4. Kesesuaian dengan Rancangan

Secara keseluruhan, prototipe sistem pengukuran dan pengendalian ketinggian air yang dikembangkan telah bekerja sesuai dengan spesifikasi dan rancangan yang dijelaskan pada Bab 3. Sinkronisasi antara hasil perhitungan

fuzzy secara manual, tampilan informasi pada LCD, serta pergerakan fisik motor servo menunjukkan bahwa sistem bekerja secara konsisten dan terintegrasi. Keberhasilan implementasi fuzzy logic pada mikrokontroler Arduino Uno dalam aplikasi pengendalian ketinggian air pada gedung bertingkat membuktikan bahwa metode ini mampu meningkatkan kestabilan sistem dibandingkan metode konvensional. Dengan demikian, sistem yang dirancang dapat dijadikan sebagai solusi alternatif yang andal untuk pengendalian dan pemantauan tangki air secara otomatis dan real-time.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. pengendalian ketinggian air secara otomatis. Sistem memanfaatkan data ketinggian air dari sensor ultrasonik dan data debit air dari sensor flow sebagai parameter masukan yang diproses menggunakan logika fuzzy metode Mamdani. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kondisi air tetap berada dalam batas operasional yang aman sesuai dengan kebutuhan pemakaian.
2. Sistem berhasil menyediakan antarmuka pemantauan berbasis LCD 20x4 yang mampu menampilkan informasi ketinggian air, debit air, serta kondisi keluaran sistem secara real-time. Tampilan LCD memudahkan pengguna dalam memantau kondisi tangki secara langsung tanpa memerlukan perangkat tambahan, sehingga meningkatkan kemudahan penggunaan dan efektivitas sistem.
3. Sistem peringatan kondisi air rendah dan penuh dapat bekerja dengan baik secara real-time melalui penggunaan buzzer dan LED sebagai indikator. Hasil pengujian menunjukkan bahwa indikator peringatan mampu memberikan respons yang cepat dan sesuai dengan kondisi ketinggian air di dalam tangki, sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keamanan sistem dalam pengoperasian sehari-hari.

3.2. Saran

Agar sistem yang telah dirancang dapat dikembangkan dan diimplementasikan lebih lanjut dalam skala nyata, berikut beberapa saran yang dapat dipertimbangkan:

1. Integrasi dengan IoT (Internet of Things):
Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan modul ESP32 atau ESP8266 untuk mengirimkan data ke server atau cloud (misalnya Antares, Thingspeak, atau Firebase), sehingga memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh oleh teknisi melalui smartphone atau dashboard web.
2. Variasi Aktuator:
Untuk implementasi pada tangki gedung yang lebih besar, motor servo dapat diganti dengan *solenoid valve* atau *motorized ball valve* dengan torsi yang lebih besar agar mampu menahan tekanan air yang lebih tinggi.

Daftar Pustaka

- [1] D. Prahara, "Perencanaan Sistem Plambing Air Bersih Pada Bangunan Kondotel dengan Menggunakan Sistem Gravitasi dan Pompa," *J. Teknol. Lingkung. Lahan Basah*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2014, doi: 10.26418/jtllb.v2i1.6757.
- [2] R. Oktaviana, "Rancang Bangun Sistem Kendali Water Level Berbasis IoT dengan Metode PID Controller Rizda Oktaviana Puput Wanarti Rusimanto , Endryansyah , Muhammad Syariffuddien Zuhrie," *Tek. Elektro*, vol. 11, no. 03, pp. 361–370, 2022.
- [3] D. R. Kakani, D. Subendran, and S. J. Singh, "Comparative Analysis of PI and PID Controllers for Level and Flow Control in Coupled Tank Systems," 2024.
- [4] I. Suprayogi, "Optimasi Distribusi Air Minum Pdam Menggunakan Pendekatan Fuzzy Integer Transportation Problem," *J. Purifikasi*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 1970, doi: 10.12962/j25983806.v12.i1.63.
- [5] A. Musafa and R. Wibisono, "Integrated Water Level Control System Using Fuzzy Logic," no. 2012, 2019, doi: 10.4108/eai.20-1-2018.2281872.
- [6] M. Z. I. Murtadlo, I. R. Imaduddin, A. Herlina, and A. T. A. Salim, "Perancangan Kontrol Fuzzy Mamdani Untuk Ketinggian Pusaran Air Pada Basin Silinder Gravitation Water Vortex Power Plant," *JEECAE (Journal Electr. Electron. Control. Automot. Eng.)*, vol. 5, no. 2, pp. 1–7, 2020, doi: 10.32486/jeecae.v5i2.513.
- [7] F. Kurniawan, Y. Z. Maulana, and R. F. Christianti, "Sistem Kendali Level Ketinggian Air Berbasis Fuzzy Control Menggunakan Simulink," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 21, no. 1, pp. 17–30, 2022, doi: 10.31358/techné.v21i1.287.
- [8] A. Margiantoro and A. Kurniawan, "Pengendalian Tinggi Permukaan Cairan Berbasis Fuzzy," *J. Transform.*, vol. 6, no. 1, p. 27, 2008, doi: 10.26623/transformatika.v6i1.30.
- [9] T. Nugoro, "Kontrol Ketinggian Air pada Budidaya Ikan dan Tanaman Yumina Bumina Menggunakan Metode Fuzzy," *Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 2, no. 7, pp. 2730–2737, 2018.
- [10] D. Arif Insantama and B. Suprianto, "Rancang Bangun Kendali Level Air Otomatis Pada Tangki Dengan Servo Valve Berbasis Fuzzy Logic Controller RANCANG BANGUN KENDALI LEVEL AIR OTOMATIS PADA TANGKI DENGAN SERVO VALVE BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROLLER MENGGUNAKAN ARDUINO," *J. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 143–151, 2019.
- [11] F. Azmi, I. Fawwaz, Muhathir, and N. P. Dharshinni, "Design of Water Level Detection Using Ultrasonic Sensor Based On Fuzzy Logic," *J. Inf.*

- Technol. Educ. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 142–149, 2019, doi: 10.31289/JITE.V3I1.2668.
- [12] S. K. Laksono, A. Triwiyatno, and Sumardi, “Pengaturan sudut fasa berbasis logika fuzzy untuk sistem pengaturan temperatur,” pp. 1–11, 2011.
 - [13] M. Banzi, “What is Arduino?,” ARDUINO. Accessed: May 05, 2025. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction/>
 - [14] M. H. Al Khairi, “Cara Kerja Sensor Ultrasonik dan Aplikasinya Dalam Kehidupan,” Mahir Elektro. Accessed: May 05, 2025. <https://www.mahirelektro.com/2020/11/cara-kerja-sensor-ultrasonik-dan-aplikasinya.html>
 - [15] N. Naibaho and A. Supriyono, “Rancang Bangun Sistem Pengisian Air Menggunakan Sensor Yf-S401 Berbasis HMI,” *J. Ilm. Elektrokrisna*, vol. 8, pp. 89–96, 2020.
 - [16] Teknik Elektro Universitas Halu Oleo, “Display LCD,” Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo. Accessed: May 05, 2025. <https://te.eng.uho.ac.id/virtualab/manager/display.html>
 - [17] Syahrul, “Karakteristik dan Servomotor,” *J. UNIKOM*, vol. 8, no. 2, pp. 143–150, 2011.
 - [18] Teknik Elektro Universitas Halu Oleo, “Buzzer,” Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo. Accessed: May 05, 2025. <https://te.eng.uho.ac.id/virtualab/manager/buzzer.html>
 - [19] Teknik Elektro Universitas Halu Oleo, “LED,” Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo. Accessed: May 05, 2025. <https://te.eng.uho.ac.id/virtualab/manager/led.html>

Biodata



Nama	: Feryandi Rajagukguk
TTL	: Batam, 01 Juni 2000
Agama	: Kristen Protestan
Alamat	: Kav Sei Tering B2/20
E-mail	: feryandi2610@gmail.com
Pendidikan	
SD	: SDN 002 Batu Ampar
SMP	: SMPN 04 Batam
SMA	: SMKN 1 Batam

Lampiran A

Coding Arduino Uno

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Servo.h>

// Pin Konstanta
const int trigPin = 4;
const int echoPin = 5;
const int servoPin = 9;
const int flowInPin = 2;
const int flowOutPin = 3;
const int buzzerPin = 6;
const int ledPin = 7;

#define TINGGI_TANGKI 35.0

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
Servo myservo;

volatile unsigned long pulseInCount = 0;
volatile unsigned long pulseOutCount = 0;

// Flow Sensor In
const float calibrationFactorIn = 6.74;
const byte MA_FLOW_SIZE = 5;
float flowInBuffer[MA_FLOW_SIZE] = {0};
byte flowInIndex = 0;
float flowRateInAvg = 0.0;

// Flow Sensor Out
```

```

const float calibrationFactorOut = 6.76;
float flowOutBuffer[MA_FLOW_SIZE] = {0};
byte flowOutIndex = 0;
float flowRateOutAvg = 0.0;

// Ultrasonik Moving Average
#define MA_ULTRA_SIZE 10
float ultraBuffer[MA_ULTRA_SIZE];
byte ultraIndex = 0;
float tinggi = 0;

// Waktu
unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long lastUltraReadTime = 0;
const unsigned long ULTRA_READ_INTERVAL = 300;

// Anti-kedip
String prevLine[4] = {"", "", "", ""};

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(flowInPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(flowOutPin, INPUT_PULLUP);

  myservo.attach(servoPin);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowInPin), pulseInCounter, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowOutPin), pulseOutCounter, FALLING);

```

```

lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Initializing...");
for (byte i = 0; i < MA_ULTRA_SIZE; i++) {
    float jarak = -1;
    while (jarak == -1) {
        jarak = bacaSensor();
        delay(10);
    }
    ultraBuffer[i] = jarak;
}
lcd.clear();
}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Baca sensor ultrasonik
    if (currentMillis - lastUltraReadTime >= ULTRA_READ_INTERVAL) {
        lastUltraReadTime = currentMillis;
        float jarak = bacaSensor();
        if (jarak != -1) {
            jarak = filterUltrasonik(jarak);
            tinggi = TINGGI_TANGKI - jarak;
            tinggi = constrain(tinggi, 0, TINGGI_TANGKI);
        }
    }

    // Baca sensor flow
    if (currentMillis - previousMillis >= 500) {
        previousMillis = currentMillis;

```

```

detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowInPin));
detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowOutPin));

// ===== FLOW IN =====
float freqIn = pulseInCount / 0.5;
float currentFlowIn = freqIn / calibrationFactorIn;

flowInBuffer[flowInIndex] = currentFlowIn;
flowInIndex = (flowInIndex + 1) % MA_FLOW_SIZE;

float sumIn = 0;
for (byte i = 0; i < MA_FLOW_SIZE; i++) sumIn += flowInBuffer[i];
flowRateInAvg = sumIn / MA_FLOW_SIZE;

pulseInCount = 0;

// ===== FLOW OUT =====
float freqOut = pulseOutCount / 0.5;
float currentFlowOut = freqOut / calibrationFactorOut;

flowOutBuffer[flowOutIndex] = currentFlowOut;
flowOutIndex = (flowOutIndex + 1) % MA_FLOW_SIZE;

float sumOut = 0;
for (byte i = 0; i < MA_FLOW_SIZE; i++) sumOut += flowOutBuffer[i];
flowRateOutAvg = sumOut / MA_FLOW_SIZE;

pulseOutCount = 0;

// Aktifkan kembali interrupt
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowInPin), pulseInCounter, FALLING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(flowOutPin), pulseOutCounter, FALLING);

```

```

}

// Tambahan:
int OutputFuzzy = fuzzy(tinggi, flowRateInAvg);
int sudut;
if (OutputFuzzy <= 24) sudut = 0;
else if (OutputFuzzy <= 47) sudut = 45;
else sudut = 90;
myservo.write(sudut);

// Indikator LED & Buzzer (Sinkron dengan Fuzzy)
bool rendah = (ketinggian_rendah(tinggi) > 0.5);
bool sedang = (ketinggian_sedang(tinggi) > 0.5);
bool tinggiBanget = (ketinggian_tinggi(tinggi) > 0.5);

// Indikator LED & Buzzer
//bool rendah = (tinggi < 13);
//bool sedang = (tinggi >= 13 && tinggi <= 23);
//bool tinggiBanget = (tinggi > 23);

if (rendah) {
    static unsigned long lastBeep = 0;
    static bool beepState = false;
    if (millis() - lastBeep >= 500) {
        beepState = !beepState;
        digitalWrite(buzzerPin, beepState ? HIGH : LOW);
        lastBeep = millis();
    }
} else {
    digitalWrite(buzzerPin, LOW);
}

```

```

digitalWrite(ledPin, tinggiBanget ? HIGH : LOW);

// LCD Display
updatePartialLine(0, getKetinggianLabel(tinggi), String((int)tinggi) + " cm");
updatePartialLine(1,
getDebitLabel(flowRateInAvg),
String(flowRateInAvg, 2) + " L/m"
);
updateLine(2, padRight("Crips:" + String(OutputFuzzy), 9) + padRight("Servo:" +
String(sudut) + (char)223, 10));
updateLine(3,
padRight("IN:" + String(flowRateInAvg, 2), 9) +
padRight("OUT:" + String(flowRateOutAvg, 2), 9)
);

}

void pulseInCounter() {
pulseInCount++;
}

void pulseOutCounter() {
pulseOutCount++;
}

float bacaSensor() {
digitalWrite(trigPin, LOW);
delayMicroseconds(5);
digitalWrite(trigPin, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);
long durasi = pulseIn(echoPin, HIGH, 30000);

```

```

if (durasi == 0) return -1;
float jarak = durasi * 0.034 / 2;
return (jarak < 0.5 || jarak > TINGGI_TANGKI + 5) ? -1 : jarak;
}

```

```

float filterUltrasonik(float newVal) {
    ultraBuffer[ultraIndex] = newVal;
    ultraIndex = (ultraIndex + 1) % MA_ULTRA_SIZE;
    float sum = 0;
    for (int i = 0; i < MA_ULTRA_SIZE; i++) sum += ultraBuffer[i];
    return sum / MA_ULTRA_SIZE;
}

```

```

// Fungsi membership untuk Ketinggian Air
float ketinggian_rendah(float x) {
    if (x <= 8) return 1.0;
    else if (x > 8 && x <= 13) return (13.0 - x) / 5.0;
    else return 0.0;
}

```

```

float ketinggian_sedang(float x) {
    if (x > 8 && x <= 13) return (x - 8.0) / 5.0;
    else if (x > 13 && x <= 18) return (18.0 - x) / 5.0;
    else return 0.0;
}

```

```

float ketinggian_tinggi(float x) {
    if (x > 13 && x <= 18) return (x - 13.0) / 5.0;
    else if (x > 18) return 1.0;
    else return 0.0;
}

```

```

// Fungsi membership untuk Debit Air
float debit_pelan(float x) {
    if (x <= 1) return 1.0;
    else if (x > 1 && x <= 2) return (2.0 - x) / 1.0;
    else return 0.0;
}

float debit_sedang(float x) {
    if (x > 1 && x <= 2) return (x - 1.0) / 1.0;
    else if (x > 2 && x <= 4) return (4.0 - x) / 2.0;
    else return 0.0;
}

float debit_kencang(float x) {
    if (x > 3 && x <= 4) return (x - 3.0) / 1.0;
    else if (x > 4) return 1.0;
    else return 0.0;
}

// Fungsi utama fuzzy logic
int fuzzy(float ketinggian, float debit) {
    // Hitung membership values
    float k_rendah = ketinggian_rendah(ketinggian);
    float k_sedang = ketinggian_sedang(ketinggian);
    float k_tinggi = ketinggian_tinggi(ketinggian);

    float d_pelan = debit_pelan(debit);
    float d_sedang = debit_sedang(debit);
    float d_kencang = debit_kencang(debit);

    // Evaluasi rules (menggunakan minimum untuk AND)
    float rule1 = min(k_rendah, d_pelan);

```

```

float rule2 = min(k_sedang, d_pelan);
float rule3 = min(k_tinggi, d_pelan);
float rule4 = min(k_rendah, d_sedang);
float rule5 = min(k_sedang, d_sedang);
float rule6 = min(k_tinggi, d_sedang);
float rule7 = min(k_rendah, d_kencang);
float rule8 = min(k_sedang, d_kencang);
float rule9 = min(k_tinggi, d_kencang);

// Agregasi untuk setiap output (menggunakan maximum)
float terbuka_full = max(rule1, max(rule2, rule4)); // 0° (Kran Terbuka Penuh)
float setengah = max(rule3, max(rule5, rule7)); // 45° (Kran Terbubuka
Sebagian)
float tertutup = max(rule6, max(rule8, rule9)); // 90° (Kran Tertutup)

// Defuzzifikasi menggunakan Center of Gravity (COG)
float numerator = (terbuka_full * 0.0) + (setengah * 45.0) + (tertutup * 90.0);
float denominator = terbuka_full + setengah + tertutup;

if (denominator == 0) return 45; // Default setengah jika tidak ada rule aktif

int OutputFuzzy = round(numerator / denominator);
return OutputFuzzy;
}

String getKetinggianLabel(float x) {
    if (x < 10.5) return "Rendah"; // Titik potong grafik Rendah-Sedang
    else if (x <= 15.5) return "Sedang"; // Titik potong grafik Sedang-Tinggi
    else return "Tinggi";

//String getKetinggianLabel(float x) {

```

```

//if (x < 13) return "Rendah";
//else if (x <= 23) return "Sedang";
//else return "Tinggi";
}

```

```

String getDebitLabel(float x) {
    if (x <= 1.5) return "Pelan";    // Titik potong Pelan & Sedang
    else if (x <= 3.0) return "Sedang"; // Titik potong Sedang & Kencang
    else return "Kencang";
}

```

```

//String getDebitLabel(float x) {
//    if (x < 2) return "Pelan";
//    else if (x <= 4) return "Sedang";
//    else return "Kencang";
//}

```

```

String padRight(String text, int width) {
    while (text.length() < width) text += " ";
    return text;
}

```

```

void updatePartialLine(int row, String left, String right) {
    String fullText = padRight(left, 9) + padRight(right, 11);
    if (fullText != prevLine[row]) {
        lcd.setCursor(0, row);
        lcd.print("          ");
        lcd.setCursor(0, row);
        lcd.print(fullText);
        prevLine[row] = fullText;
    }
}

```

```
void updateLine(int row, String text) {  
    if (text != prevLine[row]) {  
        lcd.setCursor(0, row);  
        lcd.print("          ");  
        lcd.setCursor(0, row);  
        lcd.print(text);  
        prevLine[row] = text;  
    }  
}
```

Lampiran B

Gambar alat secara keseluruhan



Lampiran C

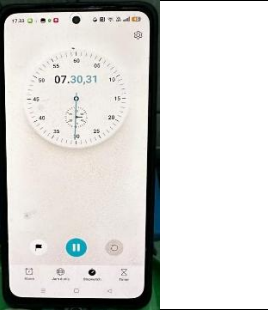
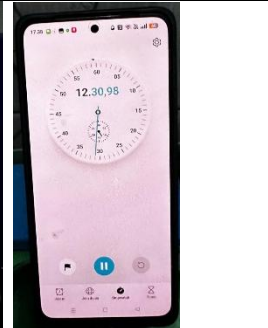
Dokumentasi Kalibrasi Sensor



Lampiran D

Pengujian 24 jam disimulasikan menjadi pengujian selama 1 jam, dengan asumsi bahwa perubahan kondisi air dalam rentang waktu tersebut telah mewakili karakteristik fluktuasi sistem. Data diambil secara periodik setiap 2,5 menit, sehingga dalam waktu 1 jam diperoleh 24 data pengukuran.

Gambar		Waktu (Jam)
		00:00
		01:00
		02:00

			03:00
			04:00
			05:00

			06:00
			07:00
			08:00
			09:00

		10:00
		11:00
		12:00
		13:00

		14:00
		15:00
		16:00

		17:00
		18:00
		19:00

		20:00
		21:00
		22:00

		23:00
		23:59