

SISTEM KONTROL DAN MONITORING FERMENTASI TEMPE BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) DENGAN PROTOCOL MESSAGE QUEUING TELEMETRY TRANSPORT (MQTT) DAN FUZZY LOGIC

¹⁾Ratnasari, ²⁾Isnawaty, ³⁾Rizal Adi Saputra, ⁴⁾L.M. Fid Aksara,

⁵⁾La Ode Muhammad Bahtiar Aksara, ⁶⁾Achmad Nur Aliansyah,

^{1,2,3,4,5,6)}Jurusan Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

¹⁾ratnasari200422@gmail.com, ²⁾isnawaty@uho.ac.id, ³⁾rizaladisaputra@uho.ac.id,

⁴⁾fid.aksara@uho.ac.id, ⁵⁾bahtiar.aksara@uho.ac.id, ⁶⁾ahmadnuraliansyah@uho.ac.id,

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 21 Mei 2026

Disetujui : 31 Mei 2026

Kata Kunci :

Tempe, Internet of things (IoT), Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), Fuzzy Logic, Fermentasi, Suhu dan Kelembaban.

ABSTRAK

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan penerapan sistem otomatis dalam proses fermentasi tempe yang sebelumnya masih dilakukan secara manual. Permasalahan yang dihadapi adalah sulitnya menjaga kestabilan suhu dan kelembaban secara konsisten, yang berpengaruh terhadap kualitas dan lama waktu fermentasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol dan monitoring fermentasi tempe berbasis IoT menggunakan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) dan metode Fuzzy Mamdani. Sistem memanfaatkan sensor suhu dan kelembaban untuk memperoleh data secara *real-time* yang dikirim melalui MQTT dengan mekanisme *publish-subscribe*. Metode Fuzzy Mamdani digunakan untuk menentukan aksi kontrol terhadap aktuator berdasarkan kondisi lingkungan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga suhu pada rentang 30–35°C dan kelembaban 60–80% sesuai kondisi optimal fermentasi. Selain itu, sistem mampu mempercepat waktu fermentasi menjadi sekitar 20 jam dibandingkan metode konvensional yang membutuhkan waktu 30–36 jam atau 1 hari 1 malam. Secara keseluruhan, sistem berjalan stabil, meningkatkan efisiensi proses, serta menghasilkan fermentasi yang lebih konsisten.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : May 21, 2026

Accepted : May 31, 2026

Keywords:

Tempeh, Internet of things (IoT), Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), Fuzzy Logic, Fermentation, Temperature and Humidity.

ABSTRACT

The development of Internet of Things (IoT) technology enables the implementation of automated systems in the tempeh fermentation process, which was previously carried out manually. The problem faced is the difficulty in maintaining stable temperature and humidity consistently, which affects the quality and duration of fermentation. This study aims to design and implement an IoT-based tempeh fermentation control and monitoring system using the Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol and the Fuzzy Mamdani method. The system utilizes temperature and humidity sensors to obtain real-time data sent via MQTT with a publish-subscribe mechanism. The Fuzzy Mamdani method is used to determine control actions on actuators based on environmental conditions. Test results show that the system is able to maintain a temperature in the range of 30–35°C and humidity of 60–80% according to optimal fermentation conditions. In addition, the system successfully

reduced fermentation time to approximately 20 hours compared to conventional fermentation methods compared to conventional methods which require 30–36 hours. Overall, the system runs stably, increases process efficiency, and produces more consistent fermentation.

1. PENDAHULUAN

Proses fermentasi tempe yang masih banyak dilakukan secara manual menyebabkan kondisi suhu dan kelembaban tidak terkontrol dengan baik (Gunawan *et al.*, 2020). Padahal, fermentasi tempe membutuhkan kondisi lingkungan yang stabil agar pertumbuhan jamur *Rhizopus oligosporus* dapat berlangsung optimal (Pardi *et al.*, 2024). Perubahan suhu dan kelembaban yang tidak sesuai dapat mengakibatkan proses fermentasi berlangsung secara tidak optimal, seperti tempe yang tidak padat, berbau asam, atau bahkan mengalami pembusukan (Habibi, *et al.*, 2024). Selain itu, perubahan kondisi lingkungan yang tidak stabil juga dapat memperlambat proses fermentasi yang umumnya membutuhkan waktu sekitar 30–36 jam, bahkan dapat mencapai 48 jam tergantung kondisi cuaca (Aji, *et al.*, 2024)

Terkait dengan kondisi tersebut, permasalahan serupa juga dialami oleh produsen tempe skala rumahan yang masih mengandalkan metode konvensional dalam proses fermentasi. Proses pemantauan suhu dan kelembaban masih dilakukan secara manual tanpa alat ukur yang akurat, sehingga sulit menjaga kondisi tetap berada pada rentang optimal, yaitu suhu 30–35°C dan kelembaban 60–80% RH (Maghfira, *et al.*, 2025). Selain itu, Perubahan cuaca yang tidak stabil menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi kestabilan proses fermentasi. Jika kondisi lingkungan tidak terkontrol dengan baik, maka hal ini berpotensi memperpanjang waktu produksi (Musa *et al.*, 2021).

Dari permasalahan tersebut, diperlukan suatu sistem yang mampu melakukan monitoring dan kontrol secara otomatis untuk menjaga kestabilan kondisi fermentasi. *Internet of Things* (IoT) merupakan konsep teknologi yang memungkinkan perangkat saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet (Isnawaty, *et al.*, 2022). Dalam penelitian ini, komunikasi data menggunakan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) yang memiliki karakteristik ringan dan efisien,

sehingga mampu mendukung pengiriman data sensor secara *real-time* dengan penggunaan bandwidth yang rendah (Hidayati *et al.*, 2022).

Secara umum, proses fermentasi tempe secara manual memerlukan waktu yang bervariasi, yaitu sekitar 30-36 jam, tergantung pada kondisi lingkungan. Proses ini umumnya berlangsung pada suhu antara 25–35°C dan kelembaban 60–80% RH (*Relative Humidity*) (Sari *et al.*, 2021). Namun, dalam praktiknya, banyak produsen tempe yang belum memiliki pemahaman yang memadai terkait pengendalian suhu dan kelembaban yang optimal selama proses fermentasi. Kondisi tersebut dapat menyebabkan proses fermentasi tidak berlangsung secara tepat waktu serta berpotensi menurunkan kualitas tempe yang dihasilkan (Nuroctavia *et al.*, 2021).

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini merancang sistem monitoring dan kontrol fermentasi tempe berbasis IoT dengan mengintegrasikan sensor DHT22 untuk mendeteksi suhu dan kelembaban, mikrokontroler ESP32, serta metode Fuzzy Logic Mamdani untuk pengambilan keputusan secara otomatis (Rahmat *et al.*, 2024). Selain itu, sistem memanfaatkan protokol MQTT sebagai media komunikasi data sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara *real-time* melalui *dashboard* web. (Hidayah, *et al.*, 2020). Sistem ini tidak hanya menjaga kestabilan suhu dan kelembaban, tetapi juga mampu mempercepat proses fermentasi menjadi sekitar 20 jam dibandingkan metode konvensional yang membutuhkan waktu 30–36 jam.

Penelitian ini tidak hanya mengimplementasikan monitoring berbasis IoT, tetapi juga mengintegrasikan kontrol otomatis dua aktuator menggunakan metode Fuzzy Mamdani serta evaluasi performa komunikasi MQTT melalui parameter *Quality of Service* (QoS). Integrasi tersebut memungkinkan sistem menjaga kestabilan suhu dan kelembaban secara *real-time* sehingga proses fermentasi menjadi

lebih konsisten dan waktu fermentasi dapat dipercepat hingga sekitar 20 jam.

Penelitian sebelumnya umumnya hanya berfokus pada monitoring suhu dan kelembaban berbasis IoT tanpa pengendalian otomatis menggunakan metode fuzzy. Pada penelitian ini, sistem tidak hanya melakukan monitoring secara *real-time*, tetapi juga mampu mengontrol kondisi fermentasi secara otomatis menggunakan metode Fuzzy Mamdani sehingga proses fermentasi menjadi lebih stabil dan efisien.

Penelitian ini memiliki kebaruan pada integrasi metode Fuzzy Logic Mamdani dengan protokol MQTT berbasis *Internet of Things* untuk proses fermentasi tempe secara *real-time*. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada monitoring suhu dan kelembaban, sistem yang dikembangkan pada penelitian ini mampu melakukan monitoring sekaligus kontrol otomatis terhadap kondisi fermentasi menggunakan lampu pijar dan kipas DC. Selain itu, sistem juga mampu mempercepat waktu fermentasi menjadi sekitar 20 jam dengan komunikasi data yang stabil berdasarkan parameter *Quality of Service* (QoS).

- a. Penelitian terdahulu dan kebaruan penelitian

Tabel 1 Penelitian Terdahulu

Peneliti	Sistem	Metode kontrol	Komunikasi	kekurangan
Gunawan et al. (2020)	Monitoring fermentasi tempe	Threshold	IoT	Belum menggunakan fuzzy
Nuroctavia et al. (2021)	Kontrol suhu fermentasi	PID	Tidak menggunakan MQTT	Monitoring belum <i>real-time</i>
Musa et al. (2021)	Monitoring suhu dan	Manual	IoT	Tidak ada kontrol otomatis

	kelembaban			
Penelitian ini	Monitoring dan kontrol fermentasi tempe	Fuzzy Mamdani	MQTT	Monitoring real time dan kontrol dua aktuator

Berdasarkan penelitian terdahulu, sebagian besar sistem fermentasi tempe berbasis IoT hanya berfokus pada monitoring atau pengendalian sederhana menggunakan metode threshold maupun PID. Penelitian ini menawarkan kebaruan berupa integrasi metode Fuzzy Mamdani dengan komunikasi MQTT untuk melakukan monitoring dan kontrol suhu serta kelembaban secara *real-time* menggunakan dua aktuator, yaitu lampu pijar dan kipas DC. Selain itu, penelitian ini juga melakukan pengujian *Quality of Service* (QoS) untuk mengevaluasi kestabilan komunikasi data pada sistem fermentasi.

2. METODE

Metode pengembangan yang diterapkan pada penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model 4D yang terdiri dari tahap *Define, Design, Develop, dan Disseminate*. (Rio et al., 2022). Metode ini diterapkan untuk merancang serta mengembangkan sistem kontrol dan monitoring fermentasi tempe berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan memanfaatkan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). (MQTT) dan metode *Fuzzy Logic Mamdani* (Umam et al., 2023). Alur pengembangan sistem mengikuti tahapan model 4D yang dijelaskan sebagai berikut:

- a) Define (Pendefinisian)

Tahap ini dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan pada proses fermentasi tempe yang masih dilakukan secara manual, terutama terkait kondisi suhu dan kelembaban yang kurang stabil. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan studi literatur serta analisis kebutuhan sistem guna menentukan spesifikasi perangkat dan parameter yang digunakan. serta fungsi

sistem yang akan dikembangkan (Putriningsih *et al.*, 2022).

b) *Design* (Perancangan)

Tahap perancangan dilakukan dengan menyusun arsitektur sistem yang mencakup perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras yang digunakan meliputi mikrokontroler ESP32, sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban, serta aktuator berupa kipas dan lampu pijar. Sementara itu, perangkat lunak dirancang menggunakan Arduino IDE sebagai media pemrograman sistem. sistem komunikasi MQTT dengan mekanisme *publish-subscribe*, serta web *dashboard* untuk monitoring secara *real-time* (Achmad *et al.*, 2023). Selain itu, pada tahap ini juga dirancang sistem Fuzzy Mamdani yang mencakup variabel *input*, fungsi keanggotaan, serta aturan (*rule base*) (Cahyani *et al.*, 2023).

Pada tahap perancangan, sistem menggunakan metode Fuzzy Logic Mamdani dengan dua variabel *input* yaitu suhu dan kelembaban, serta dua variabel output yaitu intensitas lampu dan kecepatan kipas (Yunas *et al.*, 2020). Masing-masing variabel dibagi ke dalam beberapa himpunan fuzzy dengan parameter tertentu.

Tabel 2 Fungsi Keanggotaan Himpunan Fuzzy

No	Variabel	Himpunan fuzzy	Parameter
1.	suhu	Rendah	<30°C
		Normal	30°C - 35°C
		Tinggi	>35°C
2.	Kelembaban	Rendah	<60%RH
		Normal	60%RH - 80%RH
		Tinggi	>80%RH
3.	Lampu	Redup	0, 20, 40
		Normal	30, 50, 70
		Terang	65, 80, 100
4.	Kipas	Pelan	0, 20, 40
		Normal	30, 50, 70

		Kencang	65, 80, 100
--	--	---------	-------------

Basis aturan fuzzy digunakan untuk menentukan aksi kontrol berdasarkan kondisi suhu dan kelembaban. Aturan disusun dalam bentuk IF-THEN yang menghubungkan variabel *input* dengan output sistem .

Tabel 3 Aturan Fuzzy (Fuzzy Rule Base)

No	Kondisi (IF)	Output (THEN)	No
R1	Suhu dingin AND kelembaban rendah	Lampu Terang, Kipas Pelan	Suhu dingin AND kelembaban rendah
R2	Suhu dingin AND kelembaban normal	Lampu Terang, Kipas Normal	Suhu dingin AND kelembaban normal
R3	Suhu dingin AND kelembaban tinggi	Lampu Terang, Kipas Kencang	Suhu dingin AND kelembaban tinggi
R4	Suhu normal AND kelembaban rendah	Lampu Normal, Kipas Pelan	Suhu normal AND kelembaban rendah
R5	Suhu normal AND kelembaban normal	Lampu Normal, Kipas Normal	Suhu normal AND kelembaban normal
R6	Suhu normal AND kelembaban tinggi	Lampu Normal, Kipas Kencang	Suhu normal AND kelembaban tinggi
R7	Suhu panas AND kelembaban rendah	Lampu Redup, Kipas Normal	Suhu panas AND kelembaban rendah
R8	Suhu panas AND kelembaban normal	Lampu Redup, Kipas Kencang	Suhu panas AND kelembaban normal
R9	Suhu panas AND kelembaban tinggi	Lampu Redup, Kipas Pelan	Suhu panas AND kelembaban tinggi

Berdasarkan tabel aturan fuzzy di atas, sistem akan menyesuaikan kondisi inkubator secara otomatis. Misalnya, ketika suhu tinggi dan kelembaban tinggi, maka lampu akan diredupkan dan kipas dijalankan dengan kecepatan tinggi

untuk menurunkan suhu dan kelembaban. Sebaliknya, jika suhu rendah, lampu akan dinyalakan lebih terang untuk meningkatkan suhu.

Fungsi keanggotaan pada variabel suhu dan kelembaban menggunakan kurva bahu dan kurva segitiga untuk merepresentasikan derajat keanggotaan setiap variabel fuzzy.

a. suhu (°C):

$$\mu_{dingin}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 28 \\ \frac{30-x}{30-28} & 28 < x < 30 \\ 0 & x \geq 30 \end{cases}$$

$$\mu_{normal}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 30 \\ \frac{x-30}{32.5-30} & 30 < x \leq 32.5 \\ \frac{35-x}{35-32.5} & 32.5 < x < 35 \\ 0, & x \geq 35 \end{cases}$$

$$\mu_{panas}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 34 \\ \frac{x-34}{1} & 34 < x < 35 \\ 1 & x \geq 35 \end{cases}$$

b. kelembaban(%RH)

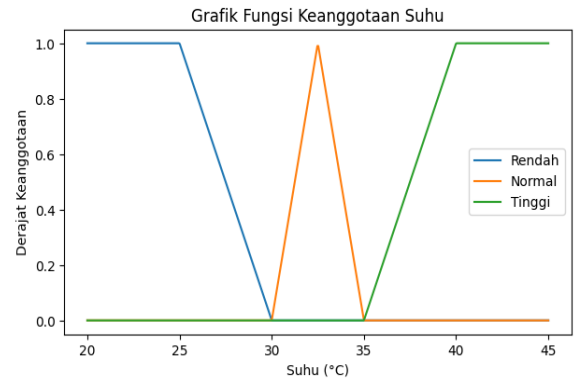
$$\mu_{rendah}(h) = \begin{cases} 1 & h \leq 55 \\ \frac{60-h}{60-55} & 55 < h < 60 \\ 0 & x \geq 60 \end{cases}$$

$$\mu_{normal}(h) = \begin{cases} 0, & h \leq 60 \\ \frac{h-60}{10} & 60 < h \leq 70 \\ \frac{80-h}{10} & 70 < h < 80 \\ 0, & h \geq 80 \end{cases}$$

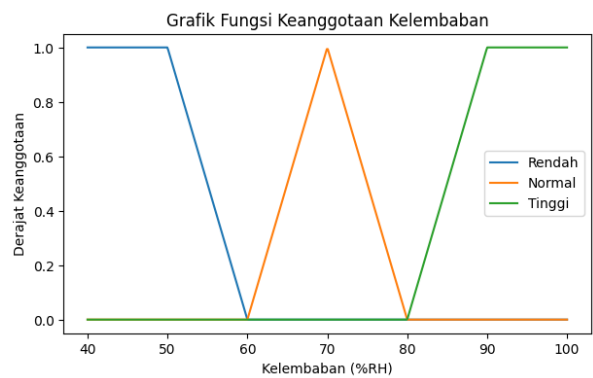
$$\mu_{tinggi}(h) = \begin{cases} 0 & h \leq 80 \\ \frac{h-80}{85-80} & 80 < h < 85 \\ 1 & x \geq 85 \end{cases}$$

Overlap antar himpunan fuzzy digunakan agar transisi perubahan suhu berlangsung secara halus. Dengan tabel fungsi keanggotaan suhu dan

kelembaban dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 1 Grafik fungsi keanggotaan suhu



Gambar 2 Grafik fungsi keanggotaan kelembaban

c) *Develop* (Pengembangan dan Implementasi)

Pada tahap ini dilakukan proses pembuatan dan integrasi sistem berdasarkan rancangan yang telah disusun. Selanjutnya, sistem diuji untuk memastikan seluruh komponen dapat berfungsi dengan baik. Pengujian dilakukan pada sensor, aktuator, serta komunikasi data menggunakan protokol MQTT. (Pratama et al., 2023). Data suhu dan kelembaban dikirim secara *real-time* ke dashboard web sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara langsung.

d) Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem secara keseluruhan. Metode pengujian yang digunakan adalah *black-box testing* untuk memastikan fungsi sistem berjalan sesuai dengan yang diharapkan. Pengujian kualitas komunikasi jaringan dilakukan dengan menerapkan parameter *Quality of*

Service (QoS) yang terdiri dari *delay*, *throughput*, *packet loss*, dan *jitter* untuk menilai kinerja transmisi data pada sistem. (Wahyudi *et al.*, 2024). Pengujian juga dilakukan dengan membandingkan waktu fermentasi menggunakan sistem dengan metode konvensional.

e) Evaluasi Sistem

Pada tahap ini dilakukan evaluasi terhadap hasil pengujian sistem. Jika sistem belum bekerja secara optimal, maka dilakukan perbaikan pada perangkat keras maupun perangkat lunak, kemudian dilakukan pengujian ulang hingga sistem berjalan sesuai dengan yang diharapkan.

f) Disseminate (Implementasi dan Penyebaran)

Tahap akhir dilakukan dengan menerapkan sistem pada proses fermentasi tempe serta menyajikan hasil penelitian dalam bentuk laporan dan publikasi ilmiah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut adalah hasil perancangan sistem kontrol dan monitoring fermentasi tempe berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) dan metode Fuzzy Logic Mamdani yang dikembangkan berdasarkan tahapan-tahapan yang telah dijelaskan pada metode penelitian.

3.1 Analisis Kebutuhan Hardware

Tabel 4 Perangkat Keras

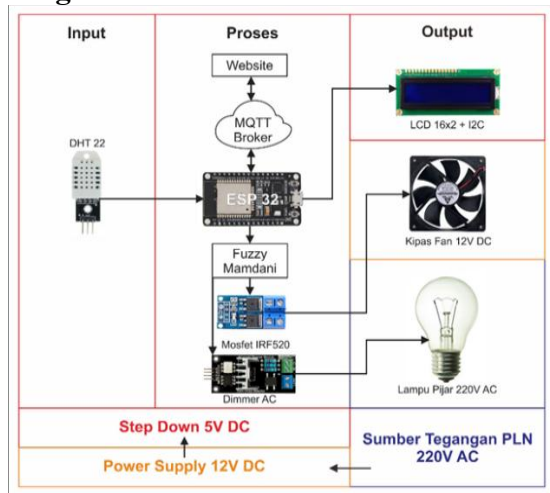
Nama Perangkat	Jenis Komponen	Deskripsi
NodeMCU ESP32	Proses	NodeMCU ESP32 digunakan sebagai <i>host</i> atau modul komunikasi dalam jaringan wifi
Sensor DHT22	<i>Input</i>	Sebagai alat pemantau suhu dan kelembaban
Lampu Pijar	<i>Output</i>	Berfungsi sebagai sumber

		panas untuk menjaga suhu proses fermentasi tetap stabil.
Kipas DC	<i>output</i>	Digunakan untuk menurunkan suhu jika terlalu panas dan menjaga sirkulasi udara.
Mosfet IRF520	<i>Output/Driver</i>	digunakan sebagai komponen driver atau saklar elektronik untuk mengendalikan beban seperti kipas DC secara efisien.
Dimmer AC	<i>Output/Kontrol Daya</i>	digunakan untuk mengatur besar kecilnya daya listrik yang dialirkan ke lampu pijar.
Tempe	Objek	Bahan yang mengalami proses fermentasi dan menjadi fokus pemantauan suhu dan kelembaban.

Berdasarkan Tabel 1, Sistem ini memanfaatkan NodeMCU ESP32 sebagai pusat kendali yang terhubung dengan sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban. Selain itu, sistem dilengkapi aktuator berupa kipas DC yang dikontrol menggunakan MOSFET IRF520 serta lampu pijar yang dikendalikan melalui dimmer AC. Data hasil pemantauan kemudian dikirim menggunakan protokol MQTT dan ditampilkan pada website secara *real-time* guna mendukung proses monitoring fermentasi tempe. Sensor DHT22 digunakan untuk membaca suhu dan kelembaban dengan rentang pengukuran suhu -40°C hingga 80°C dan kelembaban 0–100%RH berdasarkan spesifikasi

datasheet sensor. Sensor memiliki akurasi pengukuran suhu $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban $\pm 2-5\% \text{RH}$ sehingga cukup sesuai digunakan pada sistem monitoring fermentasi tempe.

3.2. Diagram Blok dan Flowchart Sistem



Gambar 3 Blok Diagram

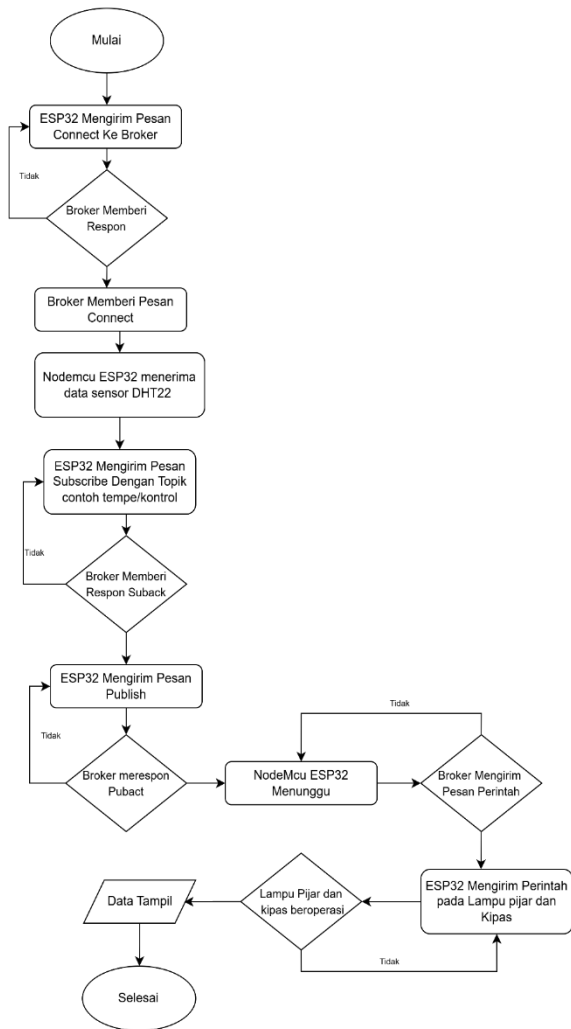
Berdasarkan Gambar 3, sistem dirancang menjadi tiga bagian utama, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Sensor DHT22 berfungsi sebagai perangkat *input* untuk mendeteksi nilai suhu dan kelembaban. Data yang diperoleh kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Selanjutnya, data dikirim melalui protokol MQTT ke website sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara *real-time*. *Output* sistem berupa kipas DC dan lampu pijar yang dikendalikan otomatis untuk menjaga kondisi fermentasi tetap optimal, serta LCD sebagai tampilan lokal. Sistem didukung oleh catu daya 220V AC yang dikonversi menjadi 12V dan 5V DC.



Gambar 4 Flowchart Alur Sistem

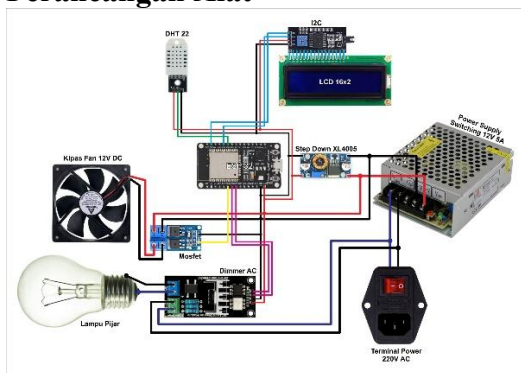
Berdasarkan *flowchart* pada Gambar 4, sistem dimulai dengan proses inisialisasi sensor DHT22 dan koneksi WiFi. Sensor kemudian membaca nilai suhu dan kelembaban yang dikirim ke mikrokontroler ESP32 untuk diproses menggunakan metode Fuzzy Mamdani.

Hasil analisis fuzzy digunakan untuk menentukan kondisi keluaran berupa pengaturan lampu dan kipas berdasarkan kombinasi suhu (dingin, normal, panas) dan kelembaban (rendah, normal, tinggi). Selanjutnya, data hasil monitoring dan kontrol dikirim ke MQTT broker dan ditampilkan pada website secara *real-time*. Proses ini berlangsung secara berulang hingga sistem dihentikan.



Gambar 5 Flowchart Alur Protokol MQTT

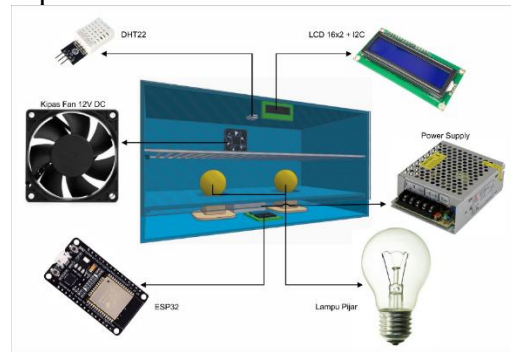
3.3. Perancangan Alat



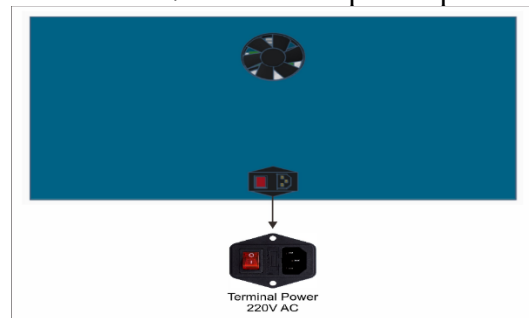
Gambar 6 Rangkaian Alat

Gambar 6 menunjukkan rangkaian sistem yang terdiri dari ESP32 sebagai pusat kendali yang terhubung dengan sensor DHT22 untuk membaca suhu dan kelembaban. Data ditampilkan secara lokal melalui LCD 16x2 menggunakan modul I2C. Sistem menggunakan power supply 12V DC yang diturunkan menjadi

5V menggunakan modul step-down untuk mensuplai ESP32.



Gambar 7 Desain Tampak Depan



Gambar 8 Desain Tampak Belakang

Gambar 7 menunjukkan rancangan sistem inkubator fermentasi tempe berbasis IoT yang terbuat dari bahan tripleks dengan ukuran panjang 60 cm serta lebar dan tinggi masing-masing 30 cm. Sensor DHT22 ditempatkan pada bagian tengah atas ruang fermentasi agar pembacaan suhu dan kelembaban lebih representatif terhadap kondisi ruang inkubator, Lampu pijar ditempatkan pada bagian bawah sebagai sumber panas, sedangkan kipas DC dipasang pada sisi belakang inkubator untuk menjaga sirkulasi udara. serta menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama. Proses pengendalian suhu dilakukan menggunakan lampu pijar dan kipas DC 12V. Informasi hasil pemantauan ditampilkan secara *real-time* melalui web *dashboard*. Serta gambar 8 menunjukkan tampak belakang inkubator yang dilengkapi terminal power 220V dan saklar sebagai sumber serta pengendali utama daya sistem.

3.4. Hasil Pengujian

3.4.1. Hasil Pengujian Sensor DHT22

Pengujian sensor DHT22 dilakukan untuk mengevaluasi akurasi dan keandalan sensor dalam mengukur suhu. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan

sensor DHT22 dengan alat ukur standar yaitu termometer. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui selisih pengukuran serta tingkat error dari sensor. persamaan lebih ringkas.

$$\text{Nilai Error}(\%) = \frac{\text{Nilai Sensor} - \text{Nilai Alat ukur Manual}}{\text{Nilai Alat ukur Manual}} \times 100\% \quad (1)$$

Tabel 5 Pengujian Sensor DHT22 (Suhu)

Pengujian Ke-	Nilai Input		Selisih (°C)	Error (%)
	DHT22 (°C)	Thermometer (°C)		
1	32.1	31.5	0.6	1.90%
2	34.9	34.3	0.6	1.75%
3	35.0	34.5	0.5	1.45%
4	36.7	35.7	1.0	2.80%
5	37.1	36.4	0.7	1.92%
Rata-rata nilai error				1.96%

Tabel 6 Pengujian Sensor DHT22 (Kelembaban)

Pengujian Ke-	Nilai Input		Selisih (%)	Error (%)
	DHT22 (%)	Higrometer (%)		
1	60	59	1	1.69%
2	63	61	2	3.28%
3	65	64	1	1.56%
4	66	65	1	1.54%
5	64	62	2	3.23%
Rata-rata nilai error				2.26%

Berdasarkan Tabel 4, hasil pengujian sensor DHT22 pada suhu menunjukkan nilai *error* berkisar antara 1,45% hingga 2,80% dengan rata-rata sebesar 1,96%, yang menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik dalam pengukuran suhu. Serta pada tabel 5, hasil pengujian sensor DHT22 pada kelembaban menunjukkan nilai *error* berkisar antara 1,54% hingga 3,28% dengan rata-rata sebesar 2,26%, yang menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat akurasi yang baik dalam pengukuran kelembaban. Berdasarkan spesifikasi sensor DHT22, toleransi error pengukuran suhu berada pada ±0.5°C dan kelembaban ±2–5%RH sehingga hasil pengujian masih berada dalam batas toleransi sensor.

3.4.2. Pengujian Perhitungan Fuzzy Pada Alat

Tabel 7 Tabel Pengujian Fuzzy Pada Lampu

Suhu (°C)	Kelembaban (%RH)	Hasil Perhitungan	Output Lampu	Hasil
32.1	77	37.4	Normal	Sesuai
35.0	64	50.0	Normal	Sesuai
34.8	65	48.6	Normal	Sesuai
36.3	64	32.8	Redup	Sesuai
37.1	61	28.4	Redup	Sesuai

Tabel 8 Tabel Pengujian Fuzzy Pada Kipas

Suhu (°C)	Kelembaban (%RH)	Hasil Perhitungan	Output Kipas	Hasil
32.1	77	62.3	Kencing	Sesuai
35.0	64	50.0	Normal	Sesuai
34.8	65	54.8	Kencing	Sesuai
36.3	64	60.2	Kencing	Sesuai
37.1	61	52.6	Normal	Sesuai

Kategori “sesuai” pada hasil pengujian diperoleh berdasarkan perbandingan antara hasil perhitungan manual metode Fuzzy Mamdani dengan *output* yang dihasilkan oleh sistem pada ESP32. Hasil pengujian menunjukkan bahwa keluaran sistem memiliki kesesuaian dengan proses inferensi fuzzy yang telah dirancang.

Contoh perhitungan:

Suhu = 32.1°C dan Kelembaban = 77%RH

A. *Fuzzyfikasi* variabel suhu

Diketahui:

- Rendah < 30
- Normal (30–35)
- Tinggi > 35

Karena 32.1 berada di antara 30–35, maka: Naik (menuju tinggi):

$$\mu_{tinggi}(x) = \frac{x - 30}{35 - 30}$$

$$\mu_{tinggi} = \frac{32.1 - 30}{5} = 0.42$$

Turun (normal)

$$\mu_{normal} = \frac{35 - 32.1}{5} = 0.58$$

B. Variabel kelembaban

Diketahui: Normal (60–80)

$$\mu_{tinggi} = \frac{77 - 60}{20} = 0.85$$

$$\mu_{normal} = \frac{80 - 77}{20} = 0.15$$

Inferensi (*rule base*) Menggunakan operator MIN:

$$\alpha = (\mu_1, \mu_2)$$

R5 IF suhu normal AND kelembaban normal

→ lampu normal, kipas normal →

$$\alpha_5 = \min(0.58, 0.15) = 0.15$$

R6 IF suhu normal AND kelembaban tinggi

→ lampu normal, kipas kencang →

$$\alpha_6 = \min(0.58, 0.85) = 0.58$$

R8 IF suhu tinggi AND kelembaban normal

→ lampu redup, kipas kencang →

$$\alpha_8 = \min(0.42, 0.15) = 0.15$$

R9 IF suhu tinggi AND kelembaban tinggi

→ lampu redup, kipas pelan →

$$\alpha_9 = \min(0.42, 0.85) = 0.42$$

Agregasi output

Lampu:

- Normal = $\max(0.15, 0.58) = 0.58$
- Redup = $\max(0.15, 0.42) = 0.42$

Kipas:

- Normal = 0.15
- Kencang = $\max(0.58, 0.15) = 0.58$
- Pelan = 0.42

Defuzzifikasi (Centroid)

A. Lampu

Parameter:

- Redup = 20
- Normal = 50

$$z = \frac{\sum \alpha_i z_i}{\sum \alpha_i}$$

$$z = \frac{(0.42 \times 20) + (0.58 \times 50)}{0.42 + 0.58}$$

$$z = \frac{8.4 + 29}{1}$$

$$z = 37.4$$

B. Kipas

Parameter:

- Pelan = 20
- Normal = 50
- Kencang = 80

$$z = \frac{(0.42 \times 20) + (0.15 \times 50) + (0.58 \times 80)}{0.42 + 0.15 + 0.58}$$

$$z = \frac{8.4 + 7.5 + 46.4}{1.15} = 62.3$$

Hasil Akhir

Lampu = 37.4 → Normal dan Kipas = 62.3 → Kencang maka R6 → “IF suhu normal AND kelembaban tinggi THEN lampu normal, kipas kencang” yang aktif.

Berdasarkan hasil perhitungan metode Fuzzy Mamdani dengan proses fuzzifikasi, inferensi menggunakan operator MIN, agregasi menggunakan operator MAX, serta defuzzifikasi metode centroid, diperoleh nilai output lampu sebesar 37.4 yang termasuk dalam kategori normal, dan nilai output kipas sebesar 62.3 yang termasuk dalam kategori kencang.

Berdasarkan kedua tabel, sistem fuzzy logic mamdani mampu menentukan output lampu dan kipas sesuai dengan kondisi suhu dan kelembaban yang terdeteksi. Hasil pengujian menunjukkan adanya kesesuaian antara hasil perhitungan dan output yang dihasilkan, sehingga sistem kontrol dapat dikatakan bekerja dengan baik.

3.4.3. Perbandingan Tempe

Pada tahap ini dilakukan pengujian tempe yang difermentasi di dalam inkubator dengan tempe yang difermentasi secara manual. Berikut tampilan tempe yang di fermentasi menggunakan alat inkubator dengan tempe yang di fermentasi secara manual dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 9 Tempe Yang Di Fermentasi Manual Setelah 20 Jam



Gambar 10 Tempe Yang Di Fermentasi Di Dalam Inkubator Setelah 20 Jam

Selain pengamatan visual, hasil fermentasi menggunakan inkubator menunjukkan tekstur tempe yang lebih padat dan pertumbuhan jamur *Rhizopus* yang lebih merata dibandingkan metode manual. Kondisi ini menandakan proses fermentasi berlangsung lebih optimal karena suhu dan kelembaban dapat dijaga secara stabil selama proses fermentasi. Pada fermentasi manual, pertumbuhan jamur cenderung tidak merata akibat perubahan suhu lingkungan yang tidak terkontrol. Parameter kualitas yang diamati meliputi tingkat kepadatan tempe, persebaran jamur dan warna permukaan tempe.

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10, dilakukan perbandingan hasil fermentasi tempe antara metode manual dan menggunakan inkubator selama 20 jam. Pada fermentasi manual, pertumbuhan jamur terlihat kurang merata dan tekstur tempe belum terbentuk secara optimal. Sementara itu, pada proses fermentasi yang menggunakan inkubator, pertumbuhan jamur terlihat lebih merata dan padat sehingga menghasilkan tekstur tempe yang lebih baik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan inkubator mampu menjaga kestabilan suhu dan kelembaban dibandingkan metode fermentasi secara manual.

Evaluasi hasil fermentasi pada penelitian ini difokuskan pada pengendalian kondisi lingkungan fermentasi berupa suhu dan kelembaban serta pengamatan visual terhadap hasil tempe. Pengujian kualitas produk seperti kadar protein, tekstur, maupun uji organoleptik belum dilakukan sehingga aspek mutu produk belum dapat dianalisis secara kuantitatif dan menjadi rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

Tabel 9 Tabel Hasil Monitoring Tempe didalam Inkubator Selama 20 Jam

Waktu Pengujian	Suhu (°C)	Kelembaban (%RH)	Kipas	Lampu	Kondisi Tempe
18.00 / 28-04-2026	32.1 °C	77 %	62 %	49 %	Belum fermentasi
22.00 / 28-04-2026	34.9 °C	66%	79 %	20 %	Tempe berembun
08.00 / 29-04-2026	35.0	64 %	75 %	18 %	Mulai tumbuh jamur
11.00 / 29-04-2026	35.1 °C	69 %	82	17 %	Jamur hampir menyeluruh
14.00 / 29-04-2026	37.4°C	60%	50 %	17 %	Terfermentasi sempurna

Berdasarkan tabel pengujian, proses fermentasi tempe menunjukkan perkembangan yang bertahap seiring perubahan suhu dan kelembaban. Pada tahap awal, tempe belum mengalami fermentasi, kemudian mulai berembun, hingga akhirnya ditumbuhi jamur secara merata. Pada kondisi suhu 37,4°C dan kelembaban 60%RH, tempe mencapai kondisi terfermentasi sempurna. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu dan kelembaban berpengaruh terhadap keberhasilan proses fermentasi tempe.

3.4.4. Pengujian *Quality Of Service* (QoS)

Pengujian *Quality of Service* (QoS) dilakukan untuk mengetahui kualitas jaringan pada sistem monitoring inkubator tempe berbasis IoT. Parameter yang diuji meliputi *packet loss, throughput, delay*, dan *jitter*. Proses pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan memanfaatkan aplikasi *Wireshark* untuk menangkap serta menganalisis paket data yang ditransmisikan melalui jaringan Wi-Fi.

Berdasarkan standar TIPHON, nilai delay di bawah 150 ms termasuk kategori sangat baik. Nilai *packet loss* sebesar 0% menunjukkan kualitas transmisi data sangat baik. Selain itu, nilai jitter yang rendah menunjukkan kestabilan pengiriman data pada sistem monitoring fermentasi berbasis MQTT. Dengan demikian, komunikasi data pada sistem mampu mendukung proses monitoring dan kontrol fermentasi secara *real-time* dengan baik.

Tabel 10 Pengujian Delay

No	Total delay (ms)	Paket diterima	Delay Rata-rata (ms)
1.	611.333	87.924	6.95
2.	20.236	5608	3.61
3.	95.287	16326	5.84
4.	169.881	26152	6.50
5.	59.883	9692	6.18

Tabel 11 Pengujian Throughput

No	Waktu pengamatan (detik)	Total data di terima (kb)	Throughput (kbps)
1.	611,333	84988354	1112
2.	615,566	80373934	1044
3.	462,950	93757877	1620
4.	418,666	87269797	1667
5.	225.329	7001138	248

Tabel 12 Pengujian Packet Loss

No	Data yang di terima	Paket data yang dikirim	Packet loss (%)
1.	74559	74559	0%
2.	87924	87924	0%
3.	94775	94775	0%
4.	87266	87266	0%
5.	84623	84623	0%

Tabel 13 Pengujian Jitter

No	Total variasi delay (ms)	Paket diterima	jitter(ms)
1.	101.529.089	9692	10.4756
2.	119101.155	9706	12.2709
3.	201117.535	17424	11.5426
4.	311438.227	34519	9.0222
5.	68862.11	9015	7.6386

Berdasarkan hasil pengujian QoS, nilai delay rata-rata yang diperoleh berada pada rentang 3,61 ms hingga 6,95 ms, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu respon yang relatif cepat. Pada pengujian *throughput*, nilai yang dihasilkan berkisar antara 248 kbps hingga 1667 kbps, yang menunjukkan bahwa kemampuan sistem dalam mentransmisikan data cukup baik. Hasil pengujian *packet loss* menunjukkan nilai sebesar 0% pada seluruh percobaan, yang menandakan tidak adanya kehilangan data selama proses transmisi. Sementara itu, nilai jitter yang diperoleh berada pada rentang 7,64 ms hingga 12,27 ms, yang menunjukkan bahwa variasi delay masih tergolong stabil. Secara keseluruhan, hasil pengujian QoS menunjukkan

bahwa sistem komunikasi yang diterapkan mampu bekerja secara stabil dan optimal dalam proses pengiriman data. Nilai delay dan *packet loss* yang rendah menunjukkan bahwa proses pengiriman data suhu dan kelembaban melalui protokol MQTT dapat berjalan secara *real-time* dan stabil. Hal ini mendukung proses monitoring fermentasi sehingga perubahan kondisi inkubator dapat dipantau dengan baik tanpa kehilangan data yang signifikan. Dengan komunikasi data yang stabil, sistem kontrol fuzzy dapat merespons perubahan suhu dan kelembaban secara lebih cepat dan akurat selama proses fermentasi berlangsung.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, sistem kontrol dan monitoring fermentasi tempe berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan protokol MQTT dan metode Fuzzy Logic Mamdani berhasil diimplementasikan dengan baik. Sistem mampu melakukan monitoring suhu dan kelembaban secara *real-time* serta mengendalikan lampu dan kipas secara otomatis sesuai kondisi fermentasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga suhu pada rentang 30–35°C dan kelembaban 60–80%RH sehingga proses fermentasi menjadi lebih optimal. Selain itu, sistem berhasil mempercepat waktu fermentasi menjadi sekitar 20 jam dibandingkan metode konvensional yang membutuhkan waktu 30–36 jam. Berdasarkan hasil pengujian QoS, komunikasi data pada sistem juga berjalan stabil dengan nilai *delay*, *throughput*, *packet loss*, dan *jitter* yang masih berada dalam kategori baik. Penelitian ini masih terbatas pada pengamatan visual hasil fermentasi tempe berdasarkan warna, tekstur, dan kepadatan miselium. Pengujian kuantitatif seperti kadar protein, kadar air, dan uji organoleptik belum dilakukan sehingga dapat menjadi pengembangan pada penelitian selanjutnya.

4.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengembangan sistem dalam skala yang lebih besar agar dapat diterapkan pada industri tempe skala UMKM maupun industri rumah tangga. Selain itu, penelitian berikutnya

dapat menambahkan integrasi *machine learning*, serta pengujian kualitas tempe menggunakan parameter kuantitatif seperti kadar protein, tekstur, dan uji organoleptik sehingga hasil penelitian menjadi lebih komprehensif.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, V. *et al.* (2023) “Analisa QoS pada MQTT untuk website monitoring dan pengendalian pintu air,” *Jurnal Elkolind*, 10(3), hal. 379–386.
- Aji, G.M., Pratiwi, A.F. dan Utami, S.W. (2024) “Rancang Bangun Inkubator Tempe Untuk Mempercepat Waktu Fermentasi,” *AGROTEKNIKA*, 7(4), hal. 488–497.
- Cahyani, S.E. *et al.* (2023) “Implementasi fuzzy logic pada sistem pengairan sawah dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air berbasis IoT Implementation of fuzzy logic in paddy field irrigation systems to improve IoT-based water use efficiency,” *INFOTECH: Jurnal Informatika Teknologi*, 4(1), hal. 37–46.
- Gunawan, B. dan Sukardi (2020) “Rancang Bangun Pengontrolan Suhu dan Kelembaban pada Proses Fermentasi Tempe Berbasis Internet of Things,” *JTEIN: JURNAL TEKNIK ELEKTRO INDONESIA*, 1(2), hal. 168–173.
- Habibi, Isac Ilham Akbar Wirayoga, S., Huda, M. dan Astono, G.Y. (2024) “Application of Fuzzy Logic for Android-Based Tempeh Fermentation Process Control and Monitoring,” *JIST Indonesian Journal of Social Technology*, 5(12), hal. 5883–5894.
- Hidayah, M., Prihartono, E. dan Santoso, B. (2020) “Automatic Room Temperature Regulator for Making Tempe Based on Arduino with Fuzzy Logic Method,” *INFORM: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 5(1), hal. 39–44.
- Hidayati, Q., Jamal, N. dan Bolang, F.A. (2022) “Sistem monitoring pada jaringan sensor banjir jalan raya menggunakan protokol MQTT,” *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, 2(2), hal. 119–128.
- Isnawaty, Subardin dan Normawan, L.L. (2022) “Penerapan Internet Of Things (Iot) Pada Sistem Monitoring Tempat Sampah

- Rumah Tangga Menggunakan Metode Haversine Formula,” *Digital Transformation Technology (Digitech)* |, 2(2), hal. 35–44.
- Maghfira, Shabrina Putri Suprianto, B., Rakhmawati, L. dan Firmansyah, R. (2025) “Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu dan Kelembaban Berbasis IOT dengan Fuzzy Logic untuk Optimasi Proses Fermentasi pada Pengolahan Tempe,” *Jurnal Teknik Elektro*, 14(3), hal. 257–263.
- Musa, W. *et al.* (2021) “Pengontrolan Energi Panas Dan Kelembaban Menggunakan Sensor Dht22 Dan Esp32 Pada Proses Fermentasi Tempe Gembus,” *IJREE Journal Of Renewable Energy Engineering*, 2(1), hal. 50–55.
- Nuroctavia, A.F., Murtono, A. dan Priyadi, B. (2021) “Sistem Kendali Suhu Dan Kelembaban Pada Proses Fermentasi Tempe Dengan Metode PID,” *Jurnal Elkolind*, 8(9), hal. 261–269. Tersedia pada: <https://doi.org/10.33795/elkolind.v8i3/304>.
- Pardi *et al.* (2024) “Sosialisasi Dan Edukasi Manfaat Tempe Sebagai Pangan Fungsional Untuk Mencegah Anemia Gizi Pada Remaja Putri Di Smk Negeri 3 Banda Aceh Socialization and Education on The Benefits of Tempe as a Functional Food to Prevent Nutritional Anemia in Adolescent W,” *Jurnal Pengabdian Masyarakat (Kesehatan)*, 6(2), hal. 95–100.
- Pratama, F.R., Raihan W, R.S. dan Pramudhita, A.N. (2023) “Perancangan dan implementasi protokol mqtt pada sistem parkir cerdas berbasis iot,” *ITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, 11(3), hal. 475–483.
- Putriningsih, E. *et al.* (2022) “Desain Sistem Informasi Monitoring Berbantuan Website Untuk Memantau Perkembangan Hasil Belajar Siswa,” *JURNAL LITBANG KOTA PEKALONGAN*, 20(1), hal. 51–58.
- Rahmat, N., Syarifah N,A., La Ode, M,I., Rizal Adi S., (2024) “Implementasi Logika Fuzzy Mamdani Dalam Prediksi Curah Hujan Di Kota Kendari,” *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(1), hal. 1138–1145.
- Rio, R. dan Musril, H.A. (2022) “Perancangan Jaringan Local Area Network sebagai Monitoring Pembelajaran di Laboratorium Komputer,” *Indonesian Journal of Innovation Learning and Technology*, 01(01), hal. 1–10.
- Sari, R.S., Nuryanto dan Widiyanto, A. (2021) “Temperature and Humidity Control System for Tempe Gembus Fermentation Process Based on Internet of Things Sistem Kendali Suhu dan Kelembaban pada Proses Fermentasi Tempe Gembus Berbasis Internet of Things,” *Urecol Journal*, 1(1), hal. 39–45.
- Umam, M.S., Wibowo, S.A. dan Pranoto, Y.A. (2023) “Implementasi Protokol Mqtt Pada Aplikasi Smart Garden Berbasis Iot (Internet Of Things),” *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 7(1), hal. 899–906.
- Wahyudi, D., Mujiono, M. dan Fu’ad, M.N. (2024) “Analisis Quality of Service (QoS) pada Jaringan Nirkabel di Akademi Komunitas Negeri Putra Sang Fajar Blitar Berdasarkan Standar Parameter TIPHON : Studi Kasus Program Studi Administrasi Server dan Jaringan Komputer,” *JAMI: Jurnal Ahli Muda Indonesia Volume*, 5(2), hal. 164–171.
- Yunas, R.P. dan Pulungan, A.B. (2020) “Sistem Kendali Suhu dan Kelembaban pada Proses Fermentasi Tempe,” *JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DANVOKASIONAL)*, 06(01), hal. 103–113.
-