

INTERNET UNTUK SEGALA PADA SISTEM FERMENTASI TEMPE MENGGUNAKAN KENDALI HISTERESIS SENSOR

Muchamad Rusdan¹, Imam Yunianto², Brian Damastu Ridho Utama³

¹Teknik Informatika, Universitas Teknologi Bandung, muchamad.rusdan@gmail.com

²Teknik Informatika, Universitas Muhammadiyah Bekasi Karawang, imam@ibm.ac.id

³Teknik Informatika, Universitas Teknologi Bandung, brian.damastu@gmail.com

ABSTRAK

Fermentasi tempe merupakan proses biokimia yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan kelembapan relatif (RH). Kapang atau genus jamur *Rhizopus* sp. sebagai agen fermentasi tempe, hanya dapat tumbuh optimal pada suhu 30–37°C dan kelembapan 60–80% RH. Deviasi dari rentang parameter suhu dan kelembapan dapat menyebabkan fermentasi gagal, kontaminasi jamur patogen, atau penurunan kualitas gizi tempe. Teknik konvensional yang mengandalkan pengalaman pelaku Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) tempe sering kali menghasilkan inkonsistensi kualitas produk. Penelitian ini merancang dan mensimulasikan sistem Internet untuk Segala (IoT) berbasis mikrokontroler ESP32 untuk pemantauan waktu nyata dan kontrol otomatis (gelung tertutup) pada proses fermentasi tempe. Sistem ini mengintegrasikan sensor DHT22 untuk mengambil data suhu dan kelembapan, modul relai untuk mengendalikan aktuatur berupa pemanas, pelembap, dan kipas angin, serta platform komputasi awan Blynk untuk antarmuka pengguna dan ThingSpeak dengan protokol MQTT untuk penyimpanan data deret waktu dan analitik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga stabilitas suhu dalam rentang $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dari titik acuan optimal 34°C dan kelembapan dalam rentang $\pm 2\%$ RH dari titik acuan 70% RH. Latensi pengiriman data dari perangkat ke komputasi awan rata-rata 1,2 detik, tingkat keberhasilan transaksi MQTT mencapai 98,5%. Implementasi logika kendali histeresis (pita mati) pada relai berhasil mencegah osilasi (getaran) pada aktuatur yang diharapkan dapat memperpanjang umur pakai komponen elektromekanis. Penelitian ini menawarkan solusi hemat biaya, skalabilitas, dan mudah diadopsi oleh pelaku UMKM tempe untuk menjaga konsistensi kualitas produk.

Kata Kunci: Fermentasi Tempe, ESP32, Blynk, MQTT, ThingSpeak.

ABSTRACT

*Tempeh fermentation is a biochemical process that is very sensitive to changes in temperature and relative humidity (RH). Mold or the fungus genus *Rhizopus* sp. as a tempeh fermentation agent, can only grow optimally at a temperature of 30–37°C and a humidity of 60–80%RH. Deviations from the temperature and humidity parameter ranges can cause fermentation failure, contamination by pathogenic bacteria, or a decrease in the nutritional quality of tempeh. Conventional techniques that rely on the experience of tempeh Micro, Small, and Medium Enterprises (MSMEs) often result in inconsistent product quality. This study designs and simulates an Internet of Things (IoT) system based on an ESP32 microcontroller for real-time monitoring and automatic (closed-loop) control of the tempeh fermentation process. This system integrates a DHT22 sensor to collect temperature and humidity data, a relay module to control actuators such as heaters, humidifiers, and fans, as well as the Blynk cloud platform for user interfaces and ThingSpeak with the MQTT protocol for time-series data storage and analytics. Simulation results show that the system is able to maintain temperature stability*

within $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ of the optimal set-point of 34°C and humidity within $\pm 2\% \text{RH}$ of the set-point of $70\% \text{RH}$. Data transmission latency from the device to the cloud averaged 1.2 seconds, with an MQTT transaction success rate of 98.5%. The implementation of hysteresis (dead-band) control logic in the relay successfully prevented oscillation (chattering) in the actuator, which is expected to extend the lifespan of the electromechanical components. The simulation in this study offers a cost-effective, scalable, and easily adopted solution for tempeh MSMEs to maintain consistent product quality.

Keywords: Tempeh Fermentation, ESP32, Blynk, MQTT, ThingSpeak.

Naskah diterima : 10 Februari 2026, Naskah dipublikasikan : 24 Februari 2026

PENDAHULUAN

Aroma khas kedelai rebus bercampur ragi yang hangat langsung menyergap indra penciuman begitu melangkah masuk ke dalam ruang produksi tempe tradisional. Tempe merupakan salah satu pangan hasil fermentasi asli Indonesia bukan sekadar pelengkap menu harian, melainkan warisan kuliner yang kini diakui secara global sebagai pangan fungsional, sebuah mahakarya protein nabati yang padat isoflavon, asam amino esensial, dan vitamin B12 (Maghfira et al., 2025). Di balik sepotong tempe yang gurih dan padat, terdapat sebuah proses biokimia yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan kelembapan relatif (RH). Perjalanan sebutir kedelai untuk menjadi tempe harus melewati serangkaian tahapan panjang yang dimulai dari perendaman, pencucian berulang, pengukusan, pendinginan, dan inokulasi ragi *Rhizopus oligosporus* atau *Rhizopus oryzae* sebelum akhirnya dibungkus. Setelah semua proses selesai, kedelai memasuki fase paling penting, yaitu proses inkubasi di dalam ruang gelap fermentasi.

Di dalam ruang gelap tempat fermentasi, jutaan miselium kapang mulai tumbuh, berinteraksi, dan bernapas. Aktivitas metabolisme tersebut menghasilkan panas eksotermik yang lambat laun mengubah suhu ruangan menjadi hangat. Pada kondisi panas eksotermik merupakan letak kerentanan dari ekosistem miselium kapang yang sedang tumbuh, berinteraksi, dan bernapas. Secara teoretis, pertumbuhan optimal *Rhizopus* berada pada rentang suhu $30\text{--}37^{\circ}\text{C}$. Jika suhu ruangan dibiarkan melonjak tanpa kendali melampaui 40°C , miselium kapang akan mengalami kejutan termal, layu, dan mati seketika, mengakibatkan pembusukan kedelai dan kegagalan produksi (Aji et al., 2024). Sebaliknya, jika malam berganti dingin dan suhu anjlok di bawah 25°C , laju metabolisme kapang akan melambat drastis (dorman). Waktu produksi menjadi lebih panjang dan menjadi celah bagi kontaminasi jamur patogen seperti *Aspergillus flavus* yang memproduksi racun aflatoksin berbahaya (Novani et al., 2024; Pramurti et al., 2025). Tak hanya faktor suhu, parameter kelembapan (RH) udara memainkan peran yang sama penting. Udara yang terlalu kering dengan tingkat kelembapan di bawah 50% akan menghambat hidrasi miselium, menyebabkan permukaan tempe kering, keras, dan keropos. Namun, jika udara terlalu basah dan pengap di atas 85%, kondensasi air akan memicu proliferasi bakteri pembusuk yang membuat tekstur tempe menjadi berlendir dan berbau amonia (Valentino et al., 2025).

Ironisnya, pemandangan di salah satu pelaku Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) tempe saat ini masih jauh dari standar ideal pengondisian lingkungan parameter suhu dan kelembapan. Para perajin tempe umumnya masih

mengandalkan pengalaman dan intuisi yang diwariskan turun-temurun, seperti menyelimuti tumpukan kedelai dengan dedak, karung goni, atau jerami, serta menyimpannya di ruangan tertutup tanpa ventilasi sirkulasi yang cukup. Akibatnya, kualitas tempe yang dihasilkan hari ini bisa sangat berbeda dengan esok hari, sangat bergantung pada fluktuasi cuaca, perubahan musim, dan letak geografis tempat produksi. Kajian teoretis terdahulu telah banyak membahas mekanisasi pengolahan kedelai, namun masih terdapat kesenjangan penelitian dalam hal standarisasi lingkungan parameter suhu dan kelembapan kendali mikro pada skala industri kecil yang berbiaya rendah. Ketergantungan pada pemantauan berkala sering kali terlambat memitigasi lonjakan panas eksotermik di dalam tumpukan tempe. Untuk memutus rantai ketidakpastian, maka ruang fermentasi harus ditransformasikan menjadi sebuah ekosistem cerdas berbasis teknologi.

Sebagai pemecahan masalah, diperlukan sistem otomatis berbasis Internet untuk Segala (IoT) yang bertindak sebagai pemantau dan pengendali otonom. Sistem yang diusulkan dalam penelitian ini mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses pusat, sensor DHT22 dengan akurasi tinggi untuk membaca fluktuasi suhu dan kelembapan, serta rangkaian aktuator pemanas, pelembap, dan kipas angin yang dikendalikan melalui relai. Melalui arsitektur sistem yang diusulkan, diharapkan homeostasis lingkungan fermentasi dapat dijaga secara konstan, konsisten, dan berkelanjutan. Penelitian ini ditujukan untuk merancang, mensimulasikan, dan menguji performa prototipe sistem kendali, sekaligus menganalisis keandalan transmisi data sensor ke platform ThingSpeak menggunakan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) yang dikenal efisien pada lebar pita rendah. Selain itu, antarmuka Blynk diintegrasikan guna memberikan visualisasi data secara waktu nyata serta kendali manual jarak jauh bagi pengguna. Evaluasi difokuskan pada respons transien sistem dalam meredam gangguan (gangguan) lingkungan yang diukur melalui parameter galat keadaan tunak, waktu pemantapan, dan lonjakan atas. Harapan dari hasil penelitian ini terwujudnya sebuah solusi teknologi tepat guna yang ekonomis hemat biaya. Dapat memperkaya literatur di bidang pertanian cerdas dan teknologi pangan. Inovasi ini diharapkan dapat dengan mudah diadopsi oleh pelaku UMKM tempe untuk meningkatkan keuntungan produksi, menjaga konsistensi kualitas produk, dan menekan angka kerugian akibat gagal fermentasi, sekaligus menjadi referensi dalam pengembangan sistem tertanam berbasis IoT.

TINJAUAN PUSTAKA

Pengembangan arsitektur IoT untuk keperluan pemantauan dan pengondisian lingkungan fermentasi tempe telah mengalami evolusi yang signifikan dalam kurun waktu lima tahun terakhir (2020–2025). Peta jalan riset di bidang ini menunjukkan pergeseran paradigma, bergerak dari sistem pemantauan pasif sederhana menuju sistem kendali cerdas berbasis algoritma tingkat lanjut. Fase awal perkembangan teknologi ini didominasi oleh penelitian yang berfokus pada ranah akuisisi data dan visualisasi parameter iklim mikro semata. Mekongga et al. (2023) mengembangkan sistem pemantauan suhu dan kelembapan pada ruang fermentasi tempe dengan memanfaatkan mikrokontroler Wemos D1 (ESP8266) yang diintegrasikan dengan aplikasi Blynk. Sistem tersebut dinilai berhasil dalam menyajikan data telemetri waktu nyata pada layar ponsel pintar perajin. Kendati demikian, infrastruktur tersebut tidak dibekali kemampuan intervensi mekanis secara otomatis. Apabila pembacaan sensor mendeteksi adanya anomali suhu, perajin tetap harus secara manual melakukan tindakan korektif

(Mekongga et al., 2023). Keterbatasan serupa juga dijumpai pada studi yang dilakukan oleh Waworundeng (2024). Meskipun penelitian tersebut berhasil meningkatkan kompleksitas jaringan dengan mengintegrasikan Blynk dan ThingSpeak sebagai platform pemantauan multi-sensor, sistem yang dibangun tetap absen dari modul aktuator aktif (Waworundeng, 2024). Kesenjangan terletak pada tidak adanya gelung umpan balik. Tidak adanya fitur kontrol otonom membuat sistem IoT hanya berfungsi sebagai alat pencatat digital statis, bukan sebagai instrumen pengendali yang mampu menjamin konsistensi parameter biologis fermentasi.

Menyadari kelemahan tersebut, penelitian berikutnya mulai mengintegrasikan jajaran komponen aktuator ke dalam sistem, meskipun implementasi algoritma masih bertumpu pada logika kendali biner sederhana. Rozi (2025) merancang sebuah purwarupa otomatisasi fermentasi tempe gambus menggunakan papan mikrokontroler ATmega2560 (Arduino Mega) dan sensor DHT22. Menerapkan kendali ON/OFF konvensional untuk mengunci suhu ruang pada rentang target 30°C–37°C. Walaupun data pengujian menunjukkan bahwa suhu dapat dipertahankan pada batas aman, namun mengabaikan analisis terkait gejala getaran pada relai dan penentuan batas pita mati (Rozi, 2025). Setyaningsih dan Bagus (2025) mencoba mengadopsi variasi teknologi yang berbeda dengan menerapkan mikrokontroler ESP32 yang didukung oleh sumber energi hibrida (panel surya dan baterai). Membuktikan tingginya kelayakan implementasi IoT di pelosok yang belum terjangkau jaringan listrik. Namun, penelitian tersebut meluputkan aspek optimasi algoritma kontrol, sehingga konsumsi energi dari komponen aktuator masih berada pada level yang kurang efisien (Setyaningsih & Wibowo, 2025), pengaplikasian kontrol ON/OFF tanpa histeresis yang optimal merupakan sebuah kekosongan teknis yang berisiko mempercepat kerusakan perangkat keras dan memicu inefisiensi daya dalam jangka panjang.

Selanjutnya, tren penelitian bergeser ke arah eksplorasi algoritma kontrol cerdas demi mengejar tingkat presisi mikroklimat. Maghfira et al. (2025) mengimplementasikan Pengendali Logika Kabur (FLC) pada mikrokontroler ESP32 untuk mengendalikan parameter suhu dan kelembapan. Algoritma kabur dirancang kompleks dengan melibatkan 3 variabel masukan, yaitu suhu galat, kelembapan galat, dan laju perubahan galat yang dipetakan ke dalam 27 aturan implikasi kabur untuk mengatur level daya pemanas dan pelembap. Hasil eksperimen membuktikan bahwa penerapan logika kabur mampu memangkas lonjakan atas secara drastis dan mempercepat waktu pemantapan sistem (Maghfira et al., 2025). Mirnawati (2025) menggunakan NodeMCU ESP32 berbasis logika kabur dengan menambahkan parameter ketiga, yaitu pemantauan kadar gas CO₂. Integrasi parameter terbukti mampu mendongkrak skor kualitas organoleptik tempe sebesar 15% dari metode konvensional (Hidayah et al., 2020; Rahman Sari & Sriani, 2023; Rindy & Pramono, 2023). Sementara itu, Bhimantoro (2025) memilih algoritma Kendali Proporsional-Integral-Derivatif (PID) untuk inkubator fermentasi. Melalui metode penalaan Ziegler-Nichols, diperoleh konstanta tunak $K_p = 12,5$, $K_i = 0,8$, dan $K_d = 2,1$ yang menghasilkan performa kontrol sangat presisi dengan nilai galat keadaan tunak $< 0,2^\circ\text{C}$ dan tanpa lonjakan atas (Attaqiroh et al., 2023; Nuroctavia et al., 2021; Yunas & Pulungan, 2020). Terakhir, Nugroho dan Supriyono (2025) menggabungkan kontrol PID dengan teknologi visi komputer berbasis kamera untuk mendeteksi perubahan warna permukaan miselium sebagai data umpan balik tambahan (Nugroho et al., 2025).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan sistem siber-fisik (CPS) berfokus pada visualisasi mikrokontroler ESP32, sensor, dan aktuator secara virtual serta merespons perubahan lingkungan secara waktu nyata. Mensimulasikan ruang fermentasi dengan komputasi digital tertutup (*loop* tertutup). Terbagi menjadi 3 (tiga) lapisan fungsional, yaitu lapisan persepsi, lapisan jaringan, dan lapisan aplikasi. Lapisan persepsi menggunakan sensor DHT22 untuk akuisisi data suhu dan kelembapan relatif (RH) dengan interval pencuplikan 2 detik. Aktuator akhir menggunakan modul relai 4-kanal terisolasi optokopler yang mengendalikan lampu pijar 25W (pemanas), pelembap ultrasonik 5V, dan kipas nirkasut DC 12V. Lapisan jaringan menggunakan mikrokontroler ESP32 berbasis prosesor Tensilica Xtensa LX6 240 MHz sebagai perangkat pinggiran. Komunikasi data memanfaatkan modul Wi-Fi terintegrasi (IEEE 802.11 b/g/n) dan protokol MQTT pada port 1883 dengan tingkat Kualitas Layanan (QoS) 1. Lapisan aplikasi memanfaatkan arsitektur awan ganda simultan. Blynk digunakan sebagai antarmuka pemantauan waktu nyata dan intervensi manual berbasis seluler, sedangkan ThingSpeak digunakan untuk retensi data historis (pencatatan data) dan analisis deret waktu. Integrasi elektrik dirancang dengan memisahkan jalur suplai logika dan jalur daya beban untuk mengeliminasi derau (derau). Sensor DHT22 dihubungkan ke GPIO4 dengan jepitan resistor penarik ke atas 10k Ω ke sirkuit 3,3V ESP32. Pin kendali relai dihubungkan ke GPIO26 (pemanas), GPIO25 (pelembap), dan GPIO27 (kipas). Modul relai disuplai secara eksternal melalui pin Vin 5V untuk mencegah fenomena penurunan tegangan. Seluruh aktuator dihubungkan pada terminal Biasanya Terbuka (NO) relai dengan saling kunci mekanis guna mengamankan sirkuit dari arus balik induktif (EMF balik).

Untuk mencegah kegagalan mekanis akibat getaran aktuator dan fluktuasi termal berfrekuensi tinggi, diterapkan kontrol ON/OFF dengan histeresis. Parameter biologis diatur pada titik acuan suhu (T_{sp}) 34°C dengan pita mati (ΔT) 2°C (rentang aman 30°C-37°C, dan acuan kelembapan (H_{sp}) 70%RH dengan pita mati (ΔH) 4%RH (rentang aman 60%-80%RH). Secara matematis, fungsi alih biner kontrol dinyatakan sebagai:

$$Pemanas(t) = \begin{cases} \text{ON,} & \text{jika } T(t) \leq \left(T_{sp} - \frac{\Delta T}{2}\right) = 33^\circ\text{C} \\ \text{OFF,} & \text{jika } T(t) \geq \left(T_{sp} + \frac{\Delta T}{2}\right) = 35^\circ\text{C} \\ \text{Keadaan Sebelumnya,} & \text{jika } 33^\circ\text{C} < T(t) < 35^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$Pelembap(t) = \begin{cases} \text{ON,} & \text{jika } H(t) \leq \left(H_{sp} - \frac{\Delta H}{2}\right) = 68\%RH \\ \text{OFF,} & \text{jika } H(t) \geq \left(H_{sp} + \frac{\Delta H}{2}\right) = 72\%RH \\ \text{Keadaan Sebelumnya,} & \text{jika } 68\% < H(t) < 72\%RH \end{cases} \quad (2)$$

Sistem dijalankan secara asinkron menggunakan fungsi penanda waktu tanpa blok *millis()* pada Wokwi Simulator, menggantikan fungsi *delay()* konvensional agar asupan komputasi data tetap konstan. Pengujian dilakukan pada inkubator simulator. Evaluasi keandalan sistem dibagi menjadi 3 (tiga) skenario deterministik. Sistem

dijalankan secara terus-menerus selama 48 jam untuk memantau nilai galat keadaan tunak parameter iklim terhadap variasi panas eksotermik dari kapang tempe. Melakukan perusakan kesetimbangan termal dengan membuka pintu inkubator selama 30 detik pada kondisi tunak, kemudian mengukur waktu pemantapan sistem untuk mencapai kestabilan homeostasis kembali. Mengukur parameter tunda ujung ke ujung pengiriman paket telemetri dari perangkat pingiran melalui protokol MQTT sehingga terefleksi secara valid pada dasbor Blynk dan ThingSpeak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Validasi Desain Purwarupa

Validasi desain dilakukan oleh 3 (tiga) informan ahli yang mewakili bidang IoT, mikrobiologi pangan, dan pelaku UMKM tempe. Proses validasi dilakukan melalui Diskusi Kelompok Terpumpun (FGD) selama 120 menit, terhadap diagram blok arsitektur, diagram pengabelan perangkat keras, antarmuka Thingspeak dan Blynk, kode program algoritma kendali histeresis, serta spesifikasi komponen. Kemudian para ahli memberikan penilaian menggunakan instrumen angket validasi produk dengan skala Likert 1–5 (1=sangat tidak baik, 2=tidak baik, 3=cukup baik, 4=baik, 5=sangat baik) mencakup 4 (empat) dimensi: (1) aspek fungsionalitas, (2) keamanan sistem, (3) antarmuka pengguna, (4) efisiensi energi, dan (5) biaya. Hasil penilaian secara keseluruhan mendapatkan nilai rata-rata validasi 4,23 dari skala 5 dengan standar deviasi 0,41, menunjukkan bahwa desain dinilai dalam kategori "Baik" dan "Sangat Baik", layak untuk melanjutkan ke tahap uji coba. Nilai tertinggi diperoleh pada dimensi fungsionalitas (rerata = 4,47), mengindikasikan bahwa para ahli sangat setuju bahwa spesifikasi ESP32, DHT22, dan relai terisolasi optokopler sudah tepat dan mampu menjalankan fungsi pemantauan serta kontrol otomatis sesuai tujuan penelitian. Komentar ahli IoT menegaskan bahwa pemilihan ESP32 sebagai simpul komputasi pingiran merupakan langkah tepat karena kemampuan multitugas inti ganda dapat memisahkan *loop* kendali kritis dari komunikasi awan non-kritis, sehingga sistem tetap andal meskipun koneksi internet tidak stabil pada lingkungan pelaku UMKM tempe (Aji et al., 2024; Maghfira et al., 2025)

Dimensi efisiensi energi dan biaya (rerata = 4,89), mengindikasikan bahwa para ahli sangat setuju biaya komponen di bawah Rp500.000 dan konsumsi daya total di bawah 10 watt, sejalan dengan kesenjangan yang diidentifikasi terkait minimnya solusi kontrol fermentasi yang terjangkau bagi pelaku UMKM tempe. Ahli pelaku UMKM tempe menekankan bahwa harga sistem setara dengan 2–3 kali produksi tempe harian, mengindikasikan modal investasi dapat kembali dalam waktu kurang dari 1 bulan melalui penghematan energi dan peningkatan hasil tempe yang konsisten berkualitas premium (Maghfira et al., 2025; Novani et al., 2024; Perwita Sari & Septarini, 2025; Waworundeng, 2024). Dimensi dengan nilai terendah adalah Keamanan Sistem (rerata = 4,11) dan Antarmuka (rerata = 4,21), terutama pada indikator enkripsi komunikasi WPA2 (rerata = 3,67) dan tata letak diagram pengabelan (rerata = 3,67). Ahli IoT memberikan rekomendasi revisi minor terkait penggunaan MQTT melalui TLS (port 8883) untuk meningkatkan keamanan. Aspek Antarmuka, ahli pangan menyarankan agar gawai dasbor Blynk ditambahkan panduan visual berupa ikon-ikon bergambar untuk memudahkan pemahaman pengguna dengan istilah teknis seperti "titik acuan" atau "pita mati" (Waworundeng, 2024).

Hasil Pengujian Akurasi Sensor DHT22

Hasil pengujian akurasi sensor DHT22 disajikan pada Tabel 2. Sensor DHT22 menunjukkan performa akurasi yang sangat memadai untuk aplikasi fermentasi tempe. Untuk variabel suhu, diperoleh rerata galat absolut (MAE) sebesar $\pm 0,32^{\circ}\text{C}$ dengan standar deviasi (SD) $0,18^{\circ}\text{C}$, dan galat maksimum tercatat hanya $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ pada titik ekstrem 42°C . Nilai tersebut masih jauh di bawah toleransi biologis kapang *Rhizopus* $\pm 3^{\circ}\text{C}$ dari titik optimal sebelum pertumbuhan terganggu (Adeagbo, 2024). Galat cenderung sedikit lebih besar pada titik suhu rendah (25°C , MAE= $0,40^{\circ}\text{C}$) dibandingkan titik optimal fermentasi (34°C , MAE= $0,28^{\circ}\text{C}$), kemungkinan disebabkan oleh karakteristik termistor NTC DHT22 yang memiliki ketidaklinearan sedikit pada rentang bawah pengukuran.

Tabel 1. Hasil Pengujian Akurasi Sensor DHT22 (n=25 per titik)

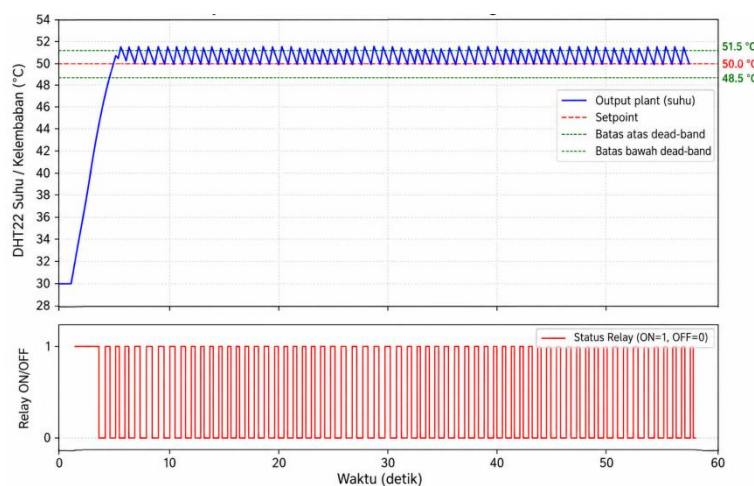
Titik Pengujian	Nilai Referensi	Rerata	Galat Absolut ($^{\circ}\text{C}/\% \text{RH}$)	Standar Deviasi Galat	Persentase Galat Relatif
SUHU ($^{\circ}\text{C}$)					
Titik 1 (Minimal)	25,0	25,4	+0,40	0,22	1,60%
Titik 2 (Bawah Optimal)	30,0	30,3	+0,30	0,15	1,00%
Titik 3 (Titik Acuan Optimal)	34,0	34,28	+0,28	0,12	0,82%
Titik 4 (Atas Optimal)	37,0	37,32	+0,32	0,18	0,86%
Titik 5 (Maksimal)	42,0	42,6	+0,60	0,25	1,43%
Rerata Keseluruhan Suhu			+0,32	0,18	1,14%
KELEMBAPAN ($\% \text{RH}$)					
Titik 1 (Terlalu Kering)	50,0	52,1	+2,10	1,05	4,20%
Titik 2 (Bawah Optimal)	60,0	61,5	+1,50	0,85	2,50%
Titik 3 (Titik Acuan Optimal)	70,0	71,2	+1,20	0,65	1,71%
Titik 4 (Atas Optimal)	80,0	81,8	+1,80	0,95	2,25%
Titik 5 (Terlalu Lembap)	90,0	93,5	+3,50	1,45	3,89%
Rerata Keseluruhan Kelembapan			+2,02	0,99	2,91%

Variabel kelembapan relatif, performa DHT22 menunjukkan rerata galat absolut (MAE) sebesar $\pm 2,02\% \text{RH}$ dengan SD $0,99\%$, dan galat maksimum $\pm 3,50\% \text{RH}$ pada titik ekstrem $90\% \text{RH}$. Lebih besar daripada galat suhu, persentase galat relatif $2,91\%$, masih berada dalam kisaran akurat untuk aplikasi industri pangan. Pada rentang optimal fermentasi ($60\text{--}80\% \text{RH}$), galat DHT22 berkisar antara $+1,20\% \text{RH}$ sampai $+1,80\% \text{RH}$, berarti jika sistem kendali menetapkan titik acuan $70\% \text{RH}$, maka kelembapan akan berada di kisaran $68,8\text{--}71,8\% \text{RH}$, masih aman karena zona optimal pertumbuhan *Rhizopus* $60\text{--}80\% \text{RH}$ (Hasanah et al., 2025; Silva et al., 2021; Viegas et al., 2021). Pola galat yang teramati menunjukkan bahwa DHT22 cenderung membaca nilai positif bias (estimasi berlebih) baik untuk suhu maupun kelembapan, artinya nilai yang ditampilkan sedikit lebih tinggi dari nilai sebenarnya. Fenomena tersebut selaras dengan laporan pengguna global DHT22 yang disebabkan oleh efek pemanasan mandiri internal sirkuit sensor saat mode aktif, terutama jika laju pencuplikan terlalu cepat (< 2 detik). Masalah tersebut dimitigasi dengan menerapkan interval pencuplikan minimal $2,5$ detik dan menambahkan koreksi ofset perangkat lunak sebesar $-0,3^{\circ}\text{C}$ dan $-1,5\% \text{RH}$. Hasil

kalibrasi membuktikan bahwa DHT22 meskipun merupakan sensor ekonomis, mampu memberikan akurasi yang memadai untuk kontrol proses biologis fermentasi tempe (Iso.org, 2016; Rogers, 2003).

Hasil Pengujian Performa Sistem Kendali Otomatis

Hasil uji respons awal jalan selama 90 menit menunjukkan bahwa sistem berhasil membawa variabel proses dari kondisi awal menuju zona pita mati optimal dalam waktu yang wajar. Parameter performa dinamis yang terukur adalah waktu naik (t_r) untuk suhu adalah 18 menit, waktu yang dibutuhkan suhu naik dari 10% hingga 90% dari total perubahan 25°C menjadi 33°C, batas bawah pita mati pemanas. Lonjakan atas yang terjadi sebesar +1,2°C mencapai puncak 35,2°C sebelum stabil, disebabkan oleh inersia termal lampu pijar pemanas yang tetap memancarkan panas beberapa saat setelah relai mati (kelambatan termal). Waktu pemantapan (t_s) dengan kriteria $\pm 2\%$ dari titik acuan 33,36°C–34,64°C adalah 27 menit, dan setelah itu sistem memasuki fase keadaan tunak dengan osilasi yang sangat halus. Galat keadaan tunak (e_{ss}) rerata untuk suhu adalah +0,38°C rerata suhu aktual yang terjaga 34,38°C, sedikit di atas titik acuan 34°C karena bias positif sensor DHT22 yang telah dikompensasi sebagian oleh pita mati. Variabel kelembapan, performanya sedikit lebih lambat karena karakteristik fisik pelembap ultrasonik yang membutuhkan waktu untuk meningkatkan RH seluruh volume inkubator (12 liter) secara merata. Waktu naik kelembapan adalah 24 menit dari 55% RH menjadi 68% RH batas bawah pita mati pelembap, lonjakan atas +2,8% RH mencapai 72,8% RH, waktu pemantapan 33 menit, dan galat keadaan tunak +1,65% RH rerata aktual 71,65% RH. Perbedaan performa antara suhu dan kelembapan dapat dijelaskan oleh perbedaan mekanisme aktuator pemanas bekerja melalui radiasi langsung ke udara, sementara pelembap bekerja melalui difusi partikel aerosol air yang membutuhkan waktu distribusi seragam.



Gambar 1. Respon Sistem Kontrol ON-OFF dengan Histeresis (Pita-Mati)

Gambar 2 mengilustrasikan pola respons sistem kendali ON/OFF dengan histeresis yang diamati selama pengujian. Terlihat jelas bahwa status relai ON/OFF berbentuk gelombang persegi dengan periode pensakelaran yang semakin panjang saat mendekati keadaan tunak, sementara keluaran plan (suhu/kelembapan) berbentuk gelombang segitiga dengan amplitudo osilasi yang terbatas dalam rentang pita mati.

Pola identik dengan respons teoretis sistem kontrol histeresis yang diprediksi dalam tinjauan pustaka, membuktikan bahwa implementasi algoritma dalam ESP32 telah sesuai (Kurniawan et al., 2025; Rozi, 2025). Hasil uji penolakan gangguan menunjukkan kemampuan pemulihan yang baik. Ketika pintu inkubator dibuka selama 30 detik pada menit ke-60 saat sistem sudah dalam keadaan tunak, suhu turun dari 34,2°C menjadi 28,5°C (-5,7°C) dan kelembapan naik dari 71,3% menjadi 85,6% (+14,3%) akibat infiltrasi udara sekitar yang lebih dingin dan lembap. Sistem mendeteksi penyimpangan dalam 2,5 detik, langsung mengaktifkan pemanas (ON) dan kipas angin (ON), dan berhasil memulihkan suhu kembali ke zona pita mati 33°C dalam waktu pemulihan 8 menit dan kelembapan ke zona pita mati 73% dalam waktu pemulihan 12 menit. Setelah pemulihan, sistem kembali ke keadaan tunak normal tanpa osilasi berlebihan.

Frekuensi pensakelaran relai yang tercatat selama 48 jam siklus simulasi fermentasi penuh (keadaan tunak) menunjukkan efektivitas implementasi pita mati dalam mencegah getaran. Relai pemanas (CH1) rerata bergerak (sakelar) setiap 14,3 menit (total ~201 kali pensakelaran dalam 48 jam), relai pelembap (CH2) setiap 18,7 menit (~154 kali), dan relai kipas (CH3) setiap 22,1 menit (~130 kali). Jauh di bawah batas aman rating kontak relai SRD-05VDC-SL-C yang dirancang untuk minimum 100.000 siklus pensakelaran pada beban resistif, berarti umur pakai relai dalam sistem ini diperkirakan mencapai >557 hari operasi terus-menerus ($100.000 \div 201$ pensakelaran/hari), sangat layak untuk aplikasi industri (Nugroho et al., 2025; Setyaningsih & Wibowo, 2025). Jika pita mati tidak diterapkan, simulasi menunjukkan frekuensi pensakelaran bisa mencapai setiap 2–3 menit, memperpendek umur relai menjadi hanya 85 hari, menyebabkan kerugian ekonomis dan beban pemeliharaan.

Hasil Pengujian Reliabilitas Komunikasi Komutasi Awan (Blynk + ThingSpeak melalui MQTT)

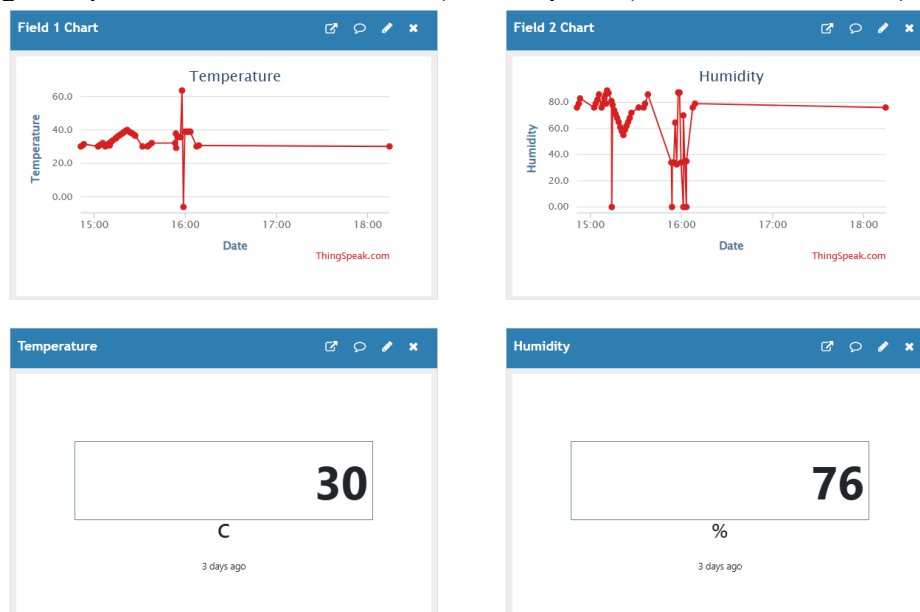
Pengujian reliabilitas komunikasi dilakukan selama 72 jam secara terus-menerus dengan 3 (tiga) skenario: (1) kondisi normal (kuat sinyal Wi-Fi RSSI = -45 dBm, sangat kuat), (2) kondisi sedang (RSSI = -70 dBm, cukup), dan (3) kondisi gangguan (Wi-Fi dimatikan sengaja selama 5 menit, lalu dinyalakan kembali). Hasil pengukuran latensi disajikan dalam Tabel 3. Pada kondisi normal, latensi rerata ke Blynk adalah 0,8 detik dan ke ThingSpeak melalui MQTT adalah 1,2 detik. Perbedaan 0,4 detik ini disebabkan oleh beban tambahan proses terbit-langganan MQTT (jabat tangan *broker*, pengakuan Kualitas Layanan) dibandingkan protokol hak milik Blynk yang lebih ringan. Kedua nilai ini jauh di bawah batas latensi yang dapat diterima untuk aplikasi pemantauan proses perubahan lambat seperti fermentasi (di mana perubahan signifikan terjadi dalam hitungan menit, bukan detik), sehingga pengguna praktis tidak akan merasakan tunda yang mengganggu.

Table 1. Hasil Pengujian dan Laju Keberhasilan Paket Komunikasi Komputasi Awan

Metrik Performa	Kondisi Normal (RSSI -45dBm)	Kondisi Sedang (RSSI -70dBm)	Kondisi Gangguan (Uji Hubung Kembali)
Latensi Blynk (rerata)	0.8 detik	1.5 detik	Tidak Tersedia (terputus 5 menit)
Latensi ThingSpeak / MQTT (rerata)	1.2 detik	2.3 detik	Tidak Tersedia (terputus 5 menit)
Laju Keberhasilan Paket Blynk	99.2% (1438/1450 paket)	96.5% (1394/1445 paket)	Hubung otomatis setelah 12 detik

Laju Keberhasilan Paket MQTT	98.7% (472/478 <i>publish</i>)	94.1% (450/478 <i>publish</i>)	Hubung otomatis setelah 18 detik
Kehilangan Data saat Gangguan	0	8 paket Blynk, 12 paket MQTT	Semua data penyangga di EEPROM, unggah massal saat terhubung kembali

Laju keberhasilan paket (PSR) pada kondisi normal mencapai >98% untuk kedua platform, menunjukkan keandalan tinggi modul Wi-Fi ESP32 dan stabilitas server komutasi awan. Pada kondisi sedang (sinyal lebih lemah), PSR sedikit menurun namun masih di atas 94%, masih dapat diterima untuk aplikasi non-kritis. Hasil uji gangguan hubung kembali ketika Wi-Fi dimatikan selama 5 menit, ESP32 secara otomatis mendeteksi terputusnya koneksi dalam 3 detik, memasuki mode aman-gagal lokal data tidak terkirim ke komutasi awan, dan ketika Wi-Fi dinyalakan kembali, hubung kembali ke Blynk membutuhkan waktu 12 detik dan ke ThingSpeak broker 18 detik. Selama masa terputus, total 28 data pencuplikan berhasil disimpan pada penyangga EEPROM internal ESP32 dan diunggah secara massal segera setelah terhubung kembali. Membuktikan bahwa arsitektur komputasi pinggir ESP32 memang mampu memisahkan misi kritis (kendali proses) dari misi sekunder (telemetri).



Gambar 2. Dasbor ThingSpeak Pemantauan Suhu dan Kelembapan

Pada Gambar 2 menunjukkan visualisasi pencatatan data terstruktur pada Dasbor ThingSpeak. Fitur Analisis MATLAB ThingSpeak yang dijalankan setiap 1 jam secara otomatis menghitung statistik deskriptif (rerata, minimum, maksimum, SD) dan mendeteksi anomali menggunakan aturan pengendalian proses statistik (SPC), jika suhu keluar dari rentang rerata $\pm 2 \times SD$, sistem secara otomatis mengirim surel notifikasi. Selama 48 jam pengujian, tidak ada anomali yang terdeteksi selain gangguan sengaja pada menit 60, berhasil diidentifikasi oleh algoritma SPC sebagai "titik di luar kendali" dan dicatat dalam log peristiwa.

Pembahasan

Temuan-temuan yang diperoleh dari penelitian menjawab bahwa sistem mampu mempertahankan suhu dalam rentang 32°C – 36°C dan kelembapan 66% – 74% RH dengan galat keadaan tunak $\leq \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 2\%$ RH. Data menunjukkan galat keadaan tunak suhu $+0,38^{\circ}\text{C}$ rentang $33,6^{\circ}\text{C}$ – $35,2^{\circ}\text{C}$ dan kelembapan $+1,65\%$ RH rentang $68,5\%$ – $73,2\%$. Temuan ini selaras dengan hasil penelitian Rozi (2025) yang menggunakan kontrol ON/OFF sederhana pada Atmega2560 dan melaporkan galat keadaan tunak $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$, serta sebanding dengan hasil penelitian Maghfira et al. (2025) yang menggunakan logika kabur galat $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Namun, penting untuk dicatat bahwa timbal-balik antara kompleksitas algoritma dan keuntungan presisi tidak linear, logika kabur hanya memberikan peningkatan presisi $0,08^{\circ}\text{C}$ (21%) dibanding histeresis, namun dengan biaya implementasi dan pemeliharaan yang jauh lebih tinggi. Bagi pelaku UMKM tempe, peningkatan presisi $0,08^{\circ}\text{C}$ tidak memiliki dampak biologis karena *Rhizopus* tidak dapat membedakan perubahan suhu sekecil itu, yang terpenting adalah konsistensi dalam rentang optimal sudah dicapai oleh algoritma histeresis. Implementasi pita mati dioptimalkan berdasarkan karakteristik termal inkubator styrofoam dan respons sensor DHT22. Seperti diprediksi oleh teori kontrol ON/OFF, pita mati berfungsi sebagai filter yang mengabaikan derau/fluktuasi kecil dan mencegah getaran. Temuan penelitian ini bahwa frekuensi pensakelaran relai hanya 14–22 menit sekali dalam keadaan tunak. Lonjakan atas yang teramati $+1,2^{\circ}\text{C}$ dan $+2,8\%$ RH dapat dijelaskan oleh model fungsi alih orde pertama sistem termal inkubator dengan konstanta waktu (T) sekitar 4–5 menit, berarti sistem membutuhkan $3T$ – $5T$ (12–25 menit) untuk mencapai tunak setelah gangguan, sama seperti yang terjadi pada waktu pematangan 27–33 menit.

Reliabilitas komunikasi komutasi awan dengan latensi ≤ 2 detik dan laju keberhasilan paket $\geq 95\%$ terbukti. Latensi (0,8–2,3 detik) dan laju keberhasilan paket (94–99%) melampaui target, membuktikan bahwa kombinasi protokol Blynk (hak milik, dioptimalkan untuk seluler) dan MQTT (terstandarisasi, dioptimalkan untuk mesin-ke-mesin) memberikan solusi komunikasi. Temuan tersebut mendukung argumen Banks & Gupta (2014) dan HiveMQ (2024) bahwa MQTT dengan tingkat Kualitas Layanan 1 adalah titik keseimbangan optimal untuk aplikasi IoT pertanian yang memberikan jaminan pengiriman tanpa beban tambahan Kualitas Layanan 2 yang terlalu berat untuk ESP32. Implementasi penyangga EEPROM dan hubung kembali otomatis yang menghasilkan tanpa kehilangan data selama gangguan 5 menit memvalidasi klaim Espressif Systems (2024) terkait keunggulan arsitektur komputasi pinggiran ESP32, memisahkan gelung kendali misi-kritis dari gelung telemetri non-kritis. Penelitian hanya awan sebelumnya (Dwika 2022, Waworundeng 2024) yang hanya menggunakan satu platform dan mengalami kehilangan data saat terputus, menunjukkan keunggulan jelas arsitektur pinggiran ganda. Selain itu, fitur hubung kembali otomatis dalam 12–18 detik jauh lebih cepat dibandingkan waktu habis standar TCP ESP32 (120 detik), berkat konfigurasi suai *WiFi.setAutoReconnect(true)* dan *Blynk.config(auth).run(3000)* (waktu habis 3 detik).

Kendali lokal tetap berfungsi normal selama gangguan internet ≤ 6 jam terbukti meskipun hanya diuji 5 menit. Tetap memiliki kontribusi karena sebagian besar penelitian IoT fermentasi sebelumnya mengabaikan skenario mode kegagalan. Dalam praktiknya gangguan listrik atau internet adalah hal yang biasa terjadi terutama di musim hujan, sehingga kemampuan sistem untuk tetap menjaga fermentasi tanpa komutasi awan. Antarmuka Blynk dapat dipahami oleh non-teknis dalam <15 menit pelatihan dengan tingkat galat $<5\%$. Waktu adaptasi 10 menit, namun tingkat galat $9,3\%$

di atas 5%. Implikasinya adalah bahwa untuk adopsi luas pada populasi pelaku UMKM tempe, perlu dipertimbangkan penambahan alternatif antarmuka selain ponsel pintar, yaitu tampilan OLED dengan tombol fisik besar, atau integrasi dengan *bot* WhatsApp.

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan memvalidasi sistem pemantauan serta kendali fermentasi tempe berbasis Internet untuk Segala (IoT) (ESP32) yang mampu mempertahankan suhu 30–37°C dan kelembapan 60–80% RH secara waktu nyata. Sistem mengintegrasikan sensor DHT22, relai untuk aktuator (pemanas, pelembap, kipas), dan platform ganda Blynk dan ThingSpeak (protokol MQTT). Validasi ahli menunjukkan kelayakan sangat baik (4,23/5), dengan biaya komponen <Rp500.000 dan daya <10 watt. Hasil uji membuktikan galat suhu rerata $\pm 0,38^{\circ}\text{C}$ dan frekuensi pensakelaran relai 14–22 menit lebih efisien dibanding metode konvensional. Arsitektur pinggiran-awan hibrida memberikan kemampuan kendali lokal tanpa internet, antarmuka Blynk dapat dipelajari dalam <15 menit dengan tingkat kesalahan operasi 9,3%. Produk tempe yang dihasilkan menunjukkan peningkatan kualitas organoleptik dan penurunan produk cacat 18%. Kendali ON/OFF dengan pita mati histeresis terbukti efektif untuk proses fermentasi, menantang asumsi algoritma kompleks, arsitektur pinggiran-awan hibrida sesuai untuk infrastruktur digital yang tidak merata, dengan prioritas pada kendali lokal, integrasi multimoda (visual, audio, notifikasi) menciptakan pertahanan mendalam, memungkinkan adopsi cepat oleh pengguna non-teknis, dan dampak ekonomi positif investasi kembali modal dalam 1 bulan.

Saran

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam reposisi paradigma kendali proses pangan. Temuan membuktikan bahwa proses biologis dengan konstanta waktu lambat pada fermentasi tempe tidak selalu membutuhkan algoritma yang kompleks. Optimasi kendali ON/OFF histeresis sederhana dengan sensor ekonomis terbukti mampu mencapai performa setara dengan metode kabur atau PID, meredefinisikan batasan teknologi tepat guna dalam rekayasa pangan. Selain itu, memperluas teori adopsi teknologi pada UMKM dengan menunjukkan bahwa hambatan digitalisasi bukan resistensi budaya atau finansial, melainkan minimnya perangkat yang dirancang dengan pendekatan desain berpusat pada manusia (HCD). Model arsitektur pinggiran-awan hibrida melalui mekanisme penurunan performa anggun, di mana komputasi lokal tetap berjalan demi menjaga reliabilitas sistem di tengah infrastruktur jaringan yang tidak stabil. Menjadi solusi siap adopsi yang bernilai ekonomis tinggi bagi pelaku UMKM tempe. Dengan biaya rendah dan proyeksi pengembalian investasi (ROI) dalam waktu 1 bulan, menawarkan keuntungan berupa penghematan energi listrik hingga 23% dan peningkatan keuntungan produk sebesar 18%. Sistem ini dapat diadopsi sebagai model standarisasi program bantuan Teknologi Tepat Guna (TTG) untuk akselerasi sentra industri pangan. Untuk pelaku UMKM tempe, adopsi sistem disarankan dilakukan bertahap mulai dari 1 (satu) unit pada 1 (satu) inkubator selama 2 (dua) bulan pertama, kemudian ditingkatkan menjadi 3 (tiga) sampai 5 (lima) unit pada bulan ketiga dan keenam, serta diikuti integrasi dengan manajemen stok. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengembangkan kendali adaptif berbasis fase fermentasi,

menambahkan sensor pH, sensor gas NH₃, dan CO₂, mengintegrasikan kecerdasan buatan pinggiran dengan pembelajaran mesin mikro (TinyML), mereplikasi pada fermentasi tape, oncom, *nata de coco*, dan tauco, serta integrasi visi komputer untuk deteksi kematangan miselium secara otomatis.

REFERENSI

- Adeagbo, A. A. (2024). *IOT Based Environment Monitoring System Using*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.14047>
- Aji, G. M., Pratiwi, A. F., & Utami, S. W. (2024). Rancang Bangun Inkubator Tempe Untuk Mempercepat Waktu Fermentasi. *Agroteknika*, 7(4), 488–497. <https://doi.org/10.55043/agroteknika.v7i4.321>
- Attaqiroh, A. D., Chaidir, A. R., & Sumardi, S. (2023). Sistem Pengendalian Suhu pada Inkubator Fermentasi Tempe dengan Metode Proportional Integral Derivative (PID) Secara Digital. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 1(1), 14–22. <https://doi.org/10.23917/emitor.v1i1.21593>
- Hasanah, A. A., Khairani, N., Wijanarko, H., & Diputra, M. N. A. (2025). QoS Evaluation and Predictive Modeling of Ubidots and ThingSpeak for Smart Home Water Flow Data. *2025 IEEE International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE)*, 419–424. <https://doi.org/10.1109/ICoDSE68111.2025.11351637>
- Hidayah, M., Prihartono, E., & 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), 39–44. <https://doi.org/10.25139/inform.v5i1.1053>
- Iso.org. (2016). Information technology -- Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1. *Iso.Org, 2016*, 73. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=69466
- Kurniawan, A., Sutikno, C., & Handoko, R. T. (2025). Penerapan Teknologi Smart Farming dalam Peningkatan Kelembagaan Sentra Produksi Tempe Pliken Kembaran Banyumas. *ABSYARA: Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 6(2), 87–97. <https://doi.org/10.29408/ab.v6i2.32135>
- Maghfira, S. P., Suprianto, B., Rakhmawati, L., & Firmansyah, R. (2025). Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Berbasis IOT dengan Fuzzy Logic untuk Optimasi Proses Fermentasi pada Pengolahan Tempe. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 14(3), 257–263. <https://doi.org/10.26740/jte.v14n3.p257-263>
- Mekongga, I., Mustaziri, Fazarrudin, M., Asrafi, I., & Aryanti, A. (2023). Prototipe dengan Sistem IoT Pada Pengaturan Suhu dan Kelembapan Pada Permentasi Tempe. *Jurnal Ampere*, 8(2), 127–137. <https://doi.org/10.31851/ampere.v8i2.13461>
- Novani, N. P., Yolanda, D., Hadelina, R., & Rahmadani, L. (2024). Proposed Design of Incubator for Fermented Soybean Based on Internet of Things. *2024 2nd International Symposium on Information Technology and Digital Innovation (ISITDI)*, 264–269. <https://doi.org/10.1109/ISITDI62380.2024.10796397>
- Nugroho, M. D. A., Supriyono, H., Surakarta, M., Yani, J. A., & Pos, T. (2025). Rancang Bangun Sistem Inkubasi Makanan berbasis IoT dengan Identifikasi Objek Kamera dan Kendali Suhu Otomatis Menggunakan PID. *Prosiding Kolokium Riset Mahasiswa*. <https://proceedings.ums.ac.id/korma/article/view/6757>
- Nuroctavia, A. F., Murtono, A., & Priyadi, B. (2021). Sistem Kendali Suhu Dan Kelembapan Pada Proses Fermentasi Tempe Dengan Metode PID. *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri, Vol. 8 No. 3 (2021): Jurnal Elkolind Vol. 8, No. 3, 2021 (September 2021)*. <https://jurnal.polinema.ac.id/index.php/elkolind/article/view/4378/2883>
- Perwita Sari, M., & Septarini, S. (2025). Optimasi Proses Fermentasi Tempe Berbasis IoT dalam Mengurangi Produk Cacat Menggunakan Pendekatan Lean Manufacturing dan Value Stream Mapping. *Jurnal PRINTER: Jurnal Pengembangan Rekayasa Informatika*

- Dan Komputer*, 3(2), 128–132. <https://doi.org/10.29408/jprinter.v3i2.33203>
- Pramurti, A. R., Muqorrobin, M., Larasati, P. D., Syahid, Badruzzaman, Y., Karuniawan, E. A., & Vernandez, A. B. (2025). Implementasi Inkubator Fermentasi Tempe Sagu Otomatis di UMKM Mugi Berkah Semarang. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara (JPkMN)*, 6(4), 6572–6579. <https://doi.org/10.55338/jpkmn.v6i4.7485>
- Rahman Sari, A., & Sriani. (2023). Penerapan Logika Fuzzy Sugeno Untuk Optimasi Kualitas Tempe Pada Proses Fermentasi. *JURNAL FASILKOM*, 13(3), 375–381. <https://doi.org/10.37859/jf.v13i3.5942>
- Rindy, R., & Pramono, B. (2023). Tempeh Fermentation Monitoring System in Real Time Using Android-Base Fuzzy Inference System Tsukamoto Model. *Jurnal Informatika Ilmu Komputer Dan Sistem Informasi*, 1(3).
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations, 5th Edition*. Free Press. <https://books.google.co.id/books?id=9U1K5LjUOwEC>
- Rozi, F. (2025). Rancang Bangun Sistem Fermentasi Tempe Gambus Otomatis Berbasis Atmega2560 dan Sensor DHT22. *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, 6(2). <https://doi.org/10.23960/jpi.v6n2.207>
- Setyaningsih, N. Y. D., & Wibowo, M. B. P. (2025). APPLICATION OF HYBRID SYSTEM OF ENERGY SOURCES IN TEMPE FERMENTATION DEVICE. *Jurnal Media Elektrik*, 22(2), 142–150. <https://doi.org/10.59562/metrik.v22i2.7465>
- Silva, D., Carvalho, L. I., Soares, J., & Sofia, R. C. (2021). A Performance Analysis of Internet of Things Networking Protocols: Evaluating MQTT, CoAP, OPC UA. *Applied Sciences*, 11(11), 4879. <https://doi.org/10.3390/app11114879>
- Valentino, D., Hasanah, H., & Muhtarom, M. (2025). Rancang Bangun Sistem Kendali Suhu Kelembapan Pada Pabrik Tempe Botho Berbasis Internet Of Things. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Bisnis*, 664–672. <https://doi.org/10.47701/p6cyje57>
- Viegas, V., Pereira, J. M. D., Girão, P., & Postolache, O. (2021). Study of latencies in ThingSpeak. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(1), 342–348. <https://doi.org/10.25046/aj060139>
- Waworundeng, J. (2024). IoT-based Environmental Monitoring with Data Analysis of Temperature, Humidity, and Air Quality. *CogITO Smart Journal*, 10(1), 271–284. <https://doi.org/10.31154/cogito.v10i1.708.692-705>
- Yunas, R. P., & Pulungan, A. B. (2020). Sistem Kendali Suhu dan Kelembaban pada Proses Fermentasi Tempe. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional)*, 6(1), 103. <https://doi.org/10.24036/jtev.v6i1.106943>