

Pengendalian Suhu Otomatis Berbasis ESP32 dan MQTT pada Simulasi Penyimpanan Jagung

ESP32- and MQTT-Based Automatic Temperature Control in a Simulated Corn Storage Facility

¹Sri Mulyati, ²Sumardi, ³Rigan Alfarez

² Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Tangerang, Tangerang, Indonesia

^{2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Tangerang, Tangerang, Indonesia

Email Coresponden: srimumlyati@umt.ac.id

Received: 15 Oktober 2026

Accepted: 26 Oktober 2026

Abstract

Storing corn at high temperatures accelerates quality loss, while blower operation that depends on operators is prone to delays and human error. This study aims to design and test an ESP32-based automatic blower temperature controller integrated with the Internet of Things (IoT) through the MQTT protocol in a simulated corn storage room. The prototype uses a DHT11 sensor for temperature, a capacitive moisture sensor for grain moisture, a relay, a 12 VDC fan, and an I2C LCD; data are displayed locally and sent to an MQTT broker, Node-RED, Firebase Realtime Database, and an MIT App Inventor application. Control is a threshold ON/OFF logic with a 35 °C setpoint that can be changed remotely. The research method is experimental engineering consisting of functional testing, sensor comparison with reference instruments (MX-I200A and Sartorius MA35), actuation logic testing, and network delay and packet loss measurement. Data were analyzed using absolute deviation and relative percentage error. All subsystems worked and data were synchronized across all interfaces. The DHT11 sensor has a mean deviation of -0.82 °C with a mean relative error of 2.54%, the blower switched on and off correctly at the setpoint in all seven test points, the mean network delay was 183.1 ms (Good under TIPHON), and packet loss was 0%. The capacitive moisture sensor has a mean deviation of -10.74 percentage points, so it is unsuitable for absolute measurement without calibration. The prototype can serve as a basis for developing an IoT-based temperature controller for corn storage.

Keywords: ESP32; MQTT; Internet of Things; threshold control; corn storage; Node-RED

Abstrak

Penyimpanan jagung pada suhu tinggi mempercepat penurunan mutu, sedangkan pengoperasian *blower* yang bergantung pada operator rentan terhadap keterlambatan dan kesalahan manusia. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji purwarupa pengendali suhu *blower* otomatis berbasis ESP32 yang terintegrasi dengan *Internet of Things* (IoT) melalui protokol MQTT pada simulasi ruang penyimpanan jagung. Purwarupa menggunakan sensor DHT11 untuk suhu, sensor kelembapan kapasitif untuk kadar air, relay, kipas DC 12 V, dan LCD I2C; data ditampilkan secara lokal serta dikirim ke broker

MQTT, Node-RED, Firebase Realtime Database, dan aplikasi MIT App Inventor. Pengendalian memakai logika ambang ON/OFF dengan *setpoint* 35 °C yang dapat diubah dari jarak jauh. Metode yang digunakan adalah rekayasa eksperimental yang meliputi pengujian fungsional, perbandingan sensor dengan instrumen referensi (MX-1200A dan Sartorius MA35), pengujian logika aktuasi, serta pengukuran *delay* dan *packet loss* jaringan. Data dianalisis menggunakan deviasi absolut dan persentase kesalahan relatif. Hasil pengujian menunjukkan seluruh subsistem berfungsi dan data tersinkron pada semua antarmuka. Sensor DHT11 memiliki deviasi rata-rata -0,82 °C dengan galat relatif rata-rata 2,54%, *blower* menyala dan mati sesuai *setpoint* pada seluruh tujuh titik uji, *delay* jaringan rata-rata 183,1 ms (kategori Bagus menurut TIPHON), dan *packet loss* 0%. Sensor kelembapan kapasitif memiliki deviasi rata-rata -10,74 poin persentase sehingga belum layak untuk pengukuran absolut tanpa kalibrasi. Purwarupa ini dapat menjadi dasar pengembangan pengendali suhu penyimpanan jagung berbasis IoT.

Kata kunci: ESP32; MQTT; Internet of Things; kontrol ambang; penyimpanan jagung; Node-RED

1. Pendahuluan

Jagung merupakan komoditas penting, tidak hanya sebagai sumber pangan tetapi juga sebagai bahan baku utama pakan ternak, terutama unggas (Purba, 2020; Retnasari, 2019). Mutu biji jagung sangat ditentukan oleh penanganan pascapanen, termasuk kondisi penyimpanan. Suhu dan kelembapan merupakan dua faktor utama yang memengaruhi mutu biji-bijian selama penyimpanan (Chen dkk., 2023), dan akumulasi kelembapan udara yang tinggi dapat meningkatkan kadar air biji (Aziz dkk., 2025). Penyimpanan jagung pada suhu ruang di atas 30 °C juga dilaporkan menurunkan mutu fisik dan kimia jagung (Souza dkk., 2024). Pengendalian suhu ruang penyimpanan, misalnya melalui sirkulasi udara dengan *blower*, karena itu menjadi bagian penting dari manajemen mutu bahan baku pakan.

Pada banyak fasilitas, pengoperasian *blower* masih bergantung pada pengawasan operator. Ketergantungan ini menimbulkan celah inefisiensi: kelalaian pengawasan dapat membuat perangkat beroperasi di luar waktu yang semestinya sehingga energi terbuang (Liando dkk., 2025), dan kesalahan manusia (*human error*) sering menjadi penyebab utama inefisiensi pada sistem pengendalian industri (Wicaksono, 2021). Peralihan dari kendali berbasis operator menuju sistem otomasi telah banyak dikaji pada konteks bangunan dan lingkungan kerja (Garzia dkk., 2023), sementara teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh secara waktu nyata (Babichev dkk., 2025; Shafique dkk., 2020).

Dari sisi teknologi, protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) dipilih karena ringan dan stabil untuk mendistribusikan data sensor antara perangkat dan *server* (Hermawan dkk., 2025), Node-RED dapat berperan sebagai pusat pemrosesan dan visualisasi yang berlangganan pada broker MQTT (He dkk., 2024), dan mikrokontroler ESP32 dengan konektivitas Wi-Fi terintegrasi lazim dipakai pada aplikasi IoT (Vdovichenko dkk., 2024). Kombinasi ketiganya telah dipakai pada berbagai sistem

pemantauan, tetapi sebagian besar penelitian yang ditelaah pada Tabel 1 berfokus pada pemantauan pasif tanpa aktuasi otomatis.

Fadhlur dkk. (2025) memantau suhu rantai dingin vaksin dengan ESP32, sensor DS18B20, MQTT, dan Node-RED dengan akurasi pembacaan 98,05%, tetapi tanpa mekanisme kendali. Angappan dkk. (2025) mengembangkan sistem pemantauan dan notifikasi untuk gudang pendingin pintar berbasis IoT yang juga tidak mencakup kendali otomatis. Situmeang (2025) memantau suhu dan kelembapan ruang fermentasi tempe dengan ESP32 dan DHT22, sedangkan Sarmin (2025) memakai ESP32 dan DHT11 pada jaringan sensor nirkabel dengan selisih pembacaan DHT11 sebesar 0,8 °C untuk suhu. Guerbaoui dkk. (2025) menunjukkan efektivitas kombinasi ESP32, DHT11, MQTT, dan Node-RED untuk pemantauan lingkungan berbasis *cloud*. Untuk komoditas jagung, Winarso dkk. (2022) mengembangkan pengendali suhu dan kelembapan jagung berbasis IoT dengan metode *fuzzy*, dan Satriawan dkk. (2022) serta Hidayah dkk. (2024) menunjukkan pengendalian suhu ruangan dengan ESP32.

Tabel 1. Ringkasan penelitian terdahulu dan posisi penelitian ini

Penelitian	Fokus dan Teknologi	Keterbatasan Relatif Terhadap Penelitian Ini
Fadhlur dkk. (2025)	Pemantauan suhu <i>cold chain</i> vaksin; ESP32, DS18B20, MQTT, Node-RED	Pemantauan pasif, tanpa aktuasi
Angappan dkk. (2025)	Pemantauan multi-parameter gudang pendingin pintar dengan notifikasi ambang	Tanpa kendali otomatis
Situmeang (2025)	Pemantauan suhu dan kelembapan ruang fermentasi tempe; ESP32, DHT22	Tanpa intervensi otomatis saat kondisi menyimpang
Sarmin (2025)	Pemantauan pencemaran udara; ESP32, DHT11, WSN, notifikasi	Tanpa tindakan korektif otomatis
Guerbaoui dkk. (2025)	Pemantauan lingkungan; ESP32, DHT11, MQTT, Node-RED, Grafana	Tanpa kendali aktuator

Berdasarkan telaah tersebut, penelitian ini mengisi celah berupa sistem yang menggabungkan kendali ambang otomatis pada *blower* dengan pemantauan multi-kanal (LCD lokal, Node-RED, Firebase, dan aplikasi *mobile*) serta perubahan *setpoint* dari jarak jauh pada skenario penyimpanan jagung, dan mengevaluasinya secara kuantitatif terhadap instrumen referensi. Tujuan penelitian ini adalah (1) merancang dan membangun purwarupa pengendali suhu *blower* otomatis berbasis ESP32 dengan komunikasi MQTT; (2) menguji akurasi sensor suhu dan kadar air terhadap instrumen referensi; (3) menguji

logika aktuasi berbasis ambang pada *setpoint* 35 °C; dan (4) mengevaluasi kinerja jaringan berupa *delay* dan *packet loss*.

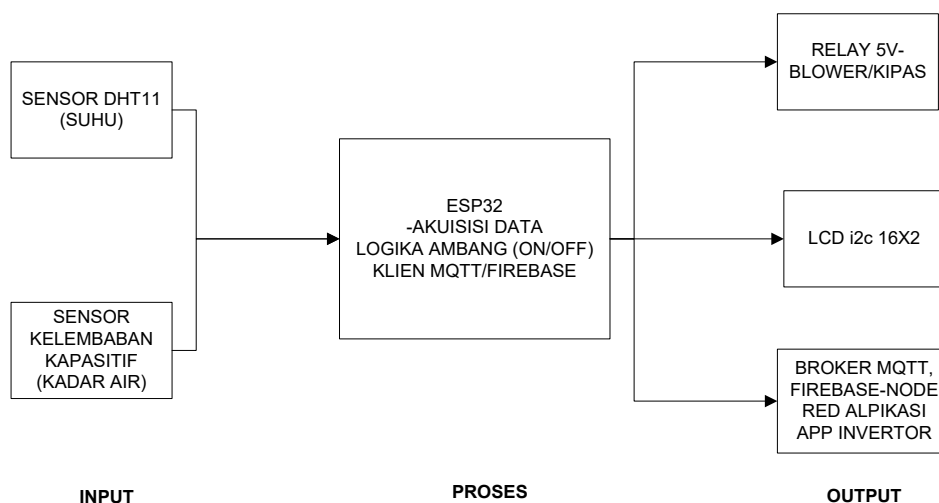
2. Metode

2.1 Rancangan penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa eksperimental (*engineering research*) dengan tahapan studi literatur dan observasi fasilitas penyimpanan jagung PT XYZ, perancangan sistem, perakitan perangkat keras, integrasi perangkat lunak dan IoT, pengujian, serta analisis. Observasi lapangan dipakai untuk menetapkan batasan operasional alat. Pengujian dilakukan pada purwarupa skala laboratorium yang menyimulasikan ruang penyimpanan; pengujian tidak dilakukan langsung pada silo atau gudang skala industri.

2.2 Perancangan perangkat keras

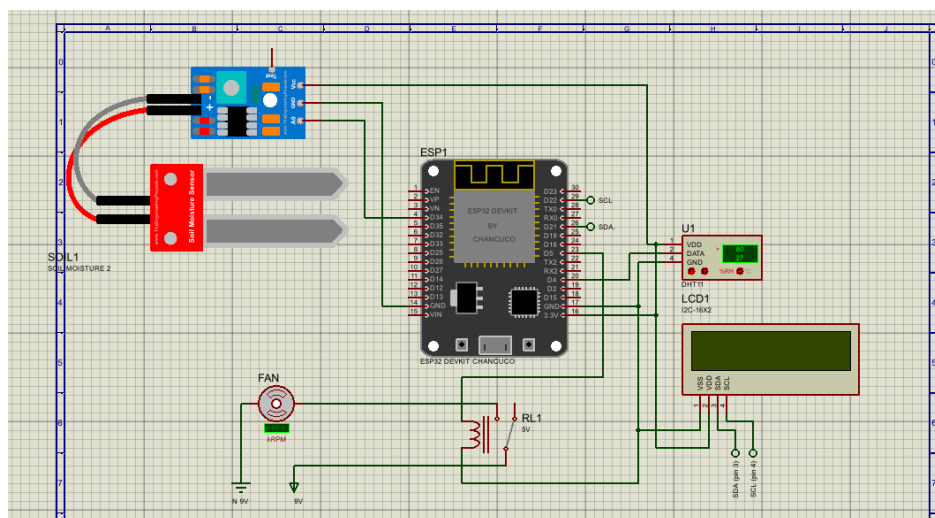
Sistem terdiri atas blok masukan, proses, dan keluaran (Gambar 1). Blok masukan memuat sensor DHT11 untuk suhu ruang dan sensor kelembapan kapasitif (*capacitive soil moisture sensor*) untuk kadar air jagung. Mikrokontroler ESP32 berperan sebagai unit pemroses yang membaca sensor, mengeksekusi logika ambang, dan berkomunikasi melalui Wi-Fi. Keluarannya berupa modul relay 5 V yang menyambung dan memutuskan catu kipas DC 12 V, layar LCD I2C 16×2 untuk tampilan lokal, serta data telemetri ke broker MQTT dan Firebase Realtime Database. Relay digunakan karena koil terisolasi dari kontak beban sehingga logika 3,3 V ESP32 terpisah dari sirkuit aktuator (Ningbo Songle Relay, 2025). Sensor DHT11 dipilih karena murah, tersedia pustaka yang lengkap, serta cakupan pengukurannya sesuai rentang suhu penyimpanan yang disimulasikan (25–40 °C); spesifikasi toleransinya adalah ± 2 °C untuk suhu dan $\pm 5\%$ RH untuk kelembapan (Aosong Electronics, 2024; Tiya dkk., 2025). Penetapan pin ESP32 diberikan pada Tabel 2 dan rangkaian elektronik pada Gambar 2.



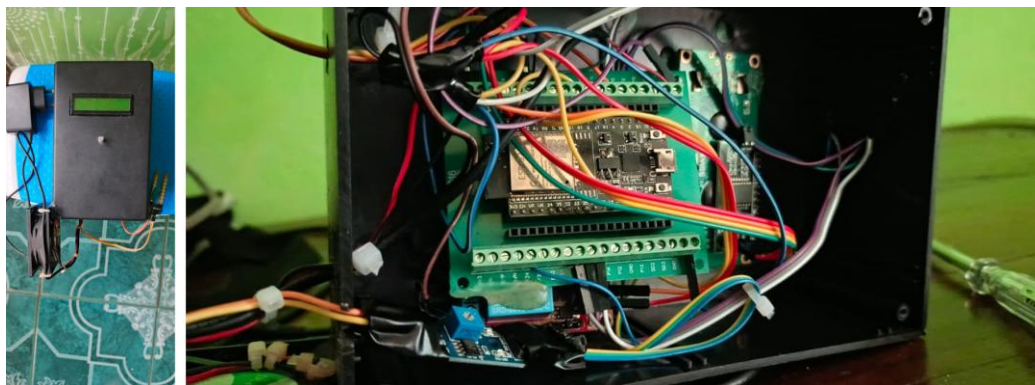
Gambar 1. Diagram blok sistem pengendali suhu *blower* otomatis

Tabel 2. Penetapan pin ESP32

Komponen	Fungsi	Pin ESP32
Sensor DHT11	Pembacaan suhu	GPIO4
Sensor kelembapan kapasitif	Pembacaan kadar air (ADC 12-bit)	GPIO34
LCD I2C (SDA, SCL)	Tampilan lokal	GPIO21, GPIO22
Rotary encoder (CLK, DT, SW)	Pengaturan <i>setpoint</i> lokal	GPIO25, GPIO26, GPIO27
Modul relay	Kendali <i>blower</i>	GPIO5



Gambar 2. Skematik Rangkaian Elektronik



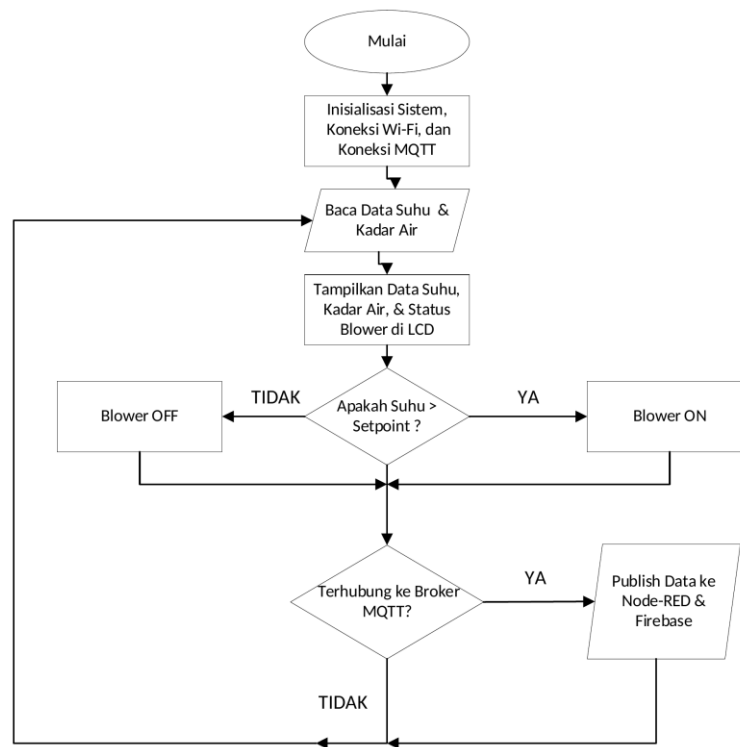
Gambar 3. Perangkat Keras (A) Tampak Luar Dan (B) Tampak Dalam

2.3 Perancangan perangkat lunak dan logika kendali

Firmware ESP32 ditulis dengan Arduino IDE menggunakan pustaka DHT sensor library (Adafruit Industries, 2023) untuk sensor suhu dan PubSubClient (O’Leary, 2024) untuk komunikasi MQTT, serta pustaka tambahan untuk LCD I2C, JSON, dan Firebase. Alur program (Gambar 4) dimulai dengan inisialisasi sistem dan koneksi Wi-Fi serta MQTT, kemudian berulang: membaca suhu dan kadar air, menampilkan data dan status *blower* pada LCD, mengevaluasi logika ambang, dan mempublikasikan data ke broker dan

Firestore apabila koneksi tersedia. Logika kendali berupa kendali ambang ON/OFF: relay diaktifkan ketika suhu melampaui *setpoint* dan dimatikan kembali ketika suhu tidak lagi melampauinya. *Setpoint* disimpan pada EEPROM sehingga bertahan setelah daya dimatikan, dan dapat diubah melalui *rotary encoder*, perintah MQTT, Firestore, maupun aplikasi MIT App Inventor. Perintah manual *blower* melalui MQTT juga tersedia dan kembali ke mode otomatis setelah 30 detik.

Data telemetri dikirim dalam format JSON yang memuat suhu, kadar air, *setpoint*, dan status *blower* melalui topik telemetri, sedangkan status perangkat (*online/offline*) dikirim melalui topik status dengan pesan *last will*. Interval pengiriman data pada pengamatan sekitar 3 detik. Keluaran sensor kelembapan dikonversi dari ADC 12-bit (0–4095) menjadi persentase secara linear dengan persamaan persen = $\text{ADC}/4095 \times 100$, tanpa kurva kalibrasi khusus jagung. Node-RED menampilkan *dashboard* berisi pengukur suhu, kadar air, dan status *blower*.



Gambar 4. Diagram Alir Perangkat Lunak Pengendali

2.4 Skenario pengujian

Pengujian dibagi menjadi lima bagian. **(a) Pengujian fungsional** memeriksa inisialisasi ESP32, tampilan LCD, pembacaan kedua sensor, kondisi relay OFF dan ON, serta kesesuaian data pada LCD, MQTTX, Node-RED, Firestore, dan aplikasi *mobile*. **(b) Akurasi suhu** dilakukan dengan menempatkan DHT11 dan probe termokopel MX-1200A berdampingan di ruang uji terkendali, menaikkan dan menurunkan suhu dengan sumber panas eksternal, lalu mencatat 10 pasang pembacaan. **(c) Akurasi kadar air** membandingkan keluaran purwarupa dengan *Sartorius MA35 Moisture Analyzer* (metode gravimetri termal) pada lima sampel jagung bubuk dengan kadar air bervariasi dari

laboratorium *quality control*. **(d) Pengujian aktuasi** menetapkan *setpoint* 35 °C melalui aplikasi *mobile*, memanaskan sensor DHT11 secara bertahap dan membiarkannya mendingin, kemudian mencatat status relay dan *blower* pada tujuh titik. **(e) Pengujian kinerja jaringan** mengukur *delay* dengan *ping* ke alamat broker (broker.hivemq.com) saat purwarupa beroperasi dan mencatat *packet loss* dari statistik *ping*; hasil *delay* dikategorikan dengan standar TIPHON (Raharjo dkk., 2025).

2.5 Analisis data

Penyimpangan pembacaan dihitung sebagai deviasi absolut dan persentase kesalahan relatif terhadap nilai referensi (Holman, 2012):

$$E_{dev} = V_{ukur} - V_{ref} \quad (1)$$

$$E_{\%} = (V_{ukur} - V_{ref}) / V_{ref} \times 100\% \quad (2)$$

dengan V_{ukur} nilai yang dibaca purwarupa dan V_{ref} nilai pada instrumen referensi. Galat relatif rata-rata dihitung dari nilai mutlak $E_{\%}$ seluruh titik uji. Pada data kadar air yang berjumlah lima sampel, koefisien korelasi Pearson (r) dipakai untuk menilai apakah keluaran sensor mengikuti tren nilai referensi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian fungsional

Purwarupa berhasil dirakit dalam kotak pelindung dan terhubung dengan *blower* yang meniru sistem pendingin silo (Gambar 3). Seluruh subsistem dinyatakan berfungsi (Tabel 3): ESP32 menyala dan terdeteksi aktif pada broker, nilai suhu dan kadar air tampil pada LCD sekaligus masuk ke Firebase, Node-RED, MQTTX, dan aplikasi *mobile*, serta status relay OFF dan ON tercermin konsisten pada LCD dan antarmuka jarak jauh. Kesesuaian data pada seluruh antarmuka menunjukkan bahwa jalur pengiriman data dari ESP32 ke setiap *platform* bekerja sebagaimana dirancang.

Tabel 3. Ringkasan hasil pengujian fungsional

Subsistem	Indikator lokal	Indikator IoT	Status
ESP32	Alat menyala, LCD menampilkan antarmuka awal	Perangkat terdeteksi aktif pada broker	Valid
DHT11	Suhu tampil dan diperbarui pada LCD	Data masuk ke Firebase, Node-RED, MQTTX, dan aplikasi	Valid
Sensor kelembapan	Persentase kadar air tampil pada LCD	Data masuk ke seluruh <i>platform</i>	Valid
Relay OFF	Suhu normal, kipas tidak berputar	Status "OFF" pada MQTTX dan aplikasi	Valid
Relay ON	Suhu panas, kipas berputar	Status "ON" pada MQTTX dan aplikasi	Valid

3.2 Akurasi sensor suhu DHT11

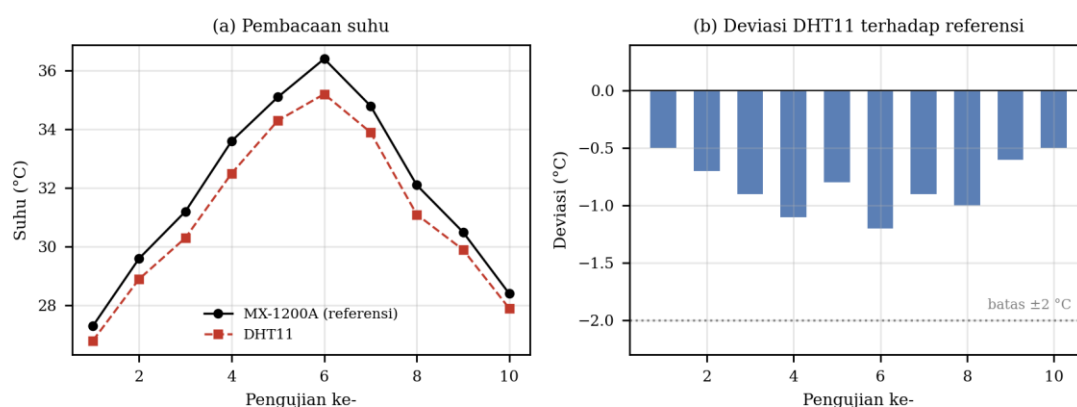
Tabel 4 dan Gambar 5 membandingkan pembacaan DHT11 dengan MX-1200A pada rentang 27,3–36,4 °C. DHT11 membaca lebih rendah daripada referensi pada seluruh 10

titik uji, dengan deviasi antara $-0,5$ dan $-1,2$ °C. Deviasi rata-rata adalah $-0,82$ °C, galat relatif rata-rata $2,54\%$, dan deviasi maksimum $1,2$ °C. Sebagai contoh, pada pengujian ke-4 nilai referensi $33,6$ °C dan pembacaan DHT11 $32,5$ °C menghasilkan $E_{dev} = -1,1$ °C dan $E_{\%} = -3,27\%$. Seluruh deviasi berada dalam toleransi ± 2 °C yang dispesifikasikan pabrikan (Aosong Electronics, 2024; Tiya dkk., 2025), dan selisih rata-rata ini sejalan dengan selisih $0,8$ °C yang dilaporkan Sarmin (2025) pada sensor yang sama.

Tabel 4. Perbandingan suhu DHT11 terhadap MX-1200A

Pengujian ke-	Referensi MX-1200A (°C)	DHT11 (°C)	Deviasi (°C)	Galat relatif (%)
1	27,3	26,8	-0,5	-1,83
2	29,6	28,9	-0,7	-2,36
3	31,2	30,3	-0,9	-2,88
4	33,6	32,5	-1,1	-3,27
5	35,1	34,3	-0,8	-2,28
6	36,4	35,2	-1,2	-3,30
7	34,8	33,9	-0,9	-2,59
8	32,1	31,1	-1,0	-3,12
9	30,5	29,9	-0,6	-1,97
10	28,4	27,9	-0,5	-1,76
Rata-rata			-0,82	2,54*

*Rata-rata dari nilai mutlak galat relatif.



Gambar 5. Perbandingan pembacaan suhu DHT11 dan MX-1200A: (a) pembacaan, (b) deviasi

Karena deviasi bersifat negatif secara konsisten (simpangan baku deviasi hanya $0,24$ °C), galat DHT11 pada rentang ini lebih berupa bias sistematis daripada derau acak. Regresi linear pembacaan DHT11 terhadap referensi menghasilkan kemiringan $0,934$ dengan $R^2 = 0,998$. Dengan demikian, koreksi *offset* konstan sekitar $+0,8$ °C pada *firmware* layak dipertimbangkan agar pembacaan mendekati suhu sebenarnya dan relay tidak terlambat beraksi saat *setpoint* tercapai. Efektivitas koreksi tersebut belum diuji dalam penelitian ini dan perlu diverifikasi dengan pengujian ulang. Perlu dicatat pula bahwa pengujian hanya

mencakup rentang 27–36 °C pada ruang uji skala laboratorium, sehingga hasil ini tidak serta-merta berlaku pada kondisi silo.

3.3 Akurasi sensor kelembapan kapasitif

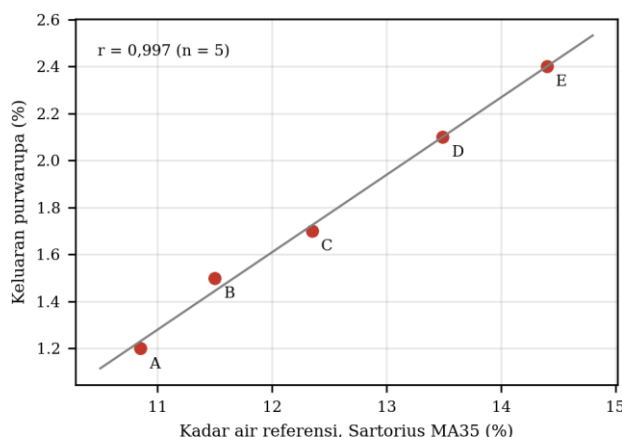
Sensor kelembapan kapasitif menghasilkan nilai yang jauh lebih rendah daripada referensi (Tabel 5). Keluaran purwarupa berkisar 1,2–2,4% sedangkan referensi Sartorius MA35 berkisar 10,85–14,40%, dengan deviasi rata-rata –10,74 poin persentase dan galat relatif rata-rata sekitar 86%. Sensor ini karena itu tidak dapat dipakai untuk mengukur kadar air jagung secara absolut dalam konfigurasi saat ini.

Tabel 5. Perbandingan kadar air purwarupa terhadap Sartorius MA35

Sampel	Referensi MA35 (%)	Purwarupa (%)	Deviasi (poin %)	Galat relatif (%)
A	10,85	1,2	–9,65	–88,94
B	11,50	1,5	–10,00	–86,96
C	12,35	1,7	–10,65	–86,23
D	13,49	2,1	–11,39	–84,43
E	14,40	2,4	–12,00	–83,33
Rata-rata			–10,74	85,98*

*Rata-rata dari nilai mutlak galat relatif.

Beberapa faktor kemungkinan berkontribusi. Pertama, kedua instrumen bekerja dengan prinsip berbeda: MA35 mengukur susut massa akibat penguapan air (gravimetri termal), sedangkan sensor kapasitif mengukur sifat listrik probe secara tidak langsung. Kedua, sensor yang dipakai dirancang untuk media tanah (DFRobot, 2024) sehingga responsnya terhadap bubuk jagung belum tentu sama. Ketiga, konversi ADC ke persen pada *firmware* bersifat linear tanpa kurva kalibrasi jagung. Meskipun nilai absolutnya meleset, keluaran sensor naik monoton mengikuti kadar air referensi dengan koefisien korelasi $r = 0,997$ (Gambar 6). Hubungan ini menunjukkan bahwa sensor masih dapat menangkap tren kadar air, dan hasil regresi pada kelima sampel mengindikasikan potensi kalibrasi linear (kadar air referensi $\approx 3,02 \times \text{keluaran} + 7,14$). Namun, regresi tersebut hanya didasarkan pada lima sampel pada rentang 10,85–14,40% dan tidak divalidasi pada data terpisah, sehingga tidak boleh diekstrapolasi. Kalibrasi multi-titik dengan sampel lebih banyak dan rentang lebih luas diperlukan sebelum sensor ini dipakai untuk keputusan operasional.



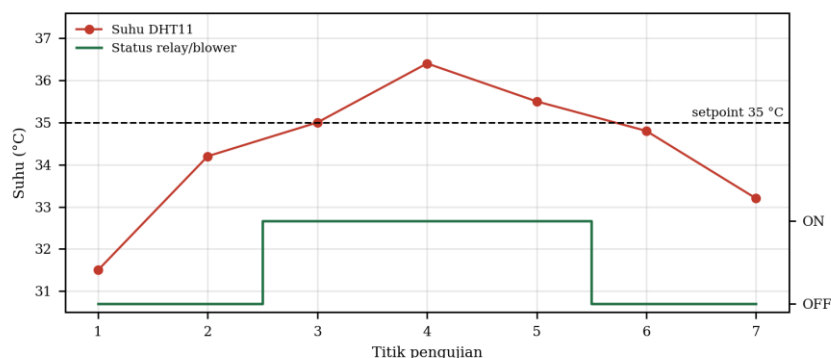
Gambar 6. Hubungan kadar air referensi (Sartorius MA35) dan keluaran sensor purwarupa

3.4 Pengujian logika aktiasi

Dengan *setpoint* 35 °C, relay dan *blower* berada pada status OFF selama suhu 31,5 °C dan 34,2 °C, beralih ON ketika suhu mencapai 35,0 °C, tetap ON pada 36,4 °C dan 35,5 °C selama fase pendinginan, dan kembali OFF ketika suhu turun ke 34,8 °C (Tabel 6 dan Gambar 7). Ketujuh titik uji sesuai dengan logika yang dirancang, sehingga logika ambang terbukti bekerja pada skenario pemanasan dan pendinginan yang diuji.

Tabel 6. Hasil pengujian aktiasi pada *setpoint* 35 °C

No	Fase simulasi	Suhu DHT11 (°C)	Kondisi logika	Relay/ <i>blower</i>	Ket.
1	Normal	31,5	$T < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	Sesuai
2	Pemanasan	34,2	$T < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	Sesuai
3	Mencapai batas	35,0	$T \geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	ON	Sesuai
4	Melewati batas	36,4	$T > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	ON	Sesuai
5	Suhu turun	35,5	$T > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	ON	Sesuai
6	Kembali normal	34,8	$T < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	Sesuai
7	Pendinginan berlanjut	33,2	$T < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	Sesuai



Gambar 7. Status relay/ *blower* terhadap suhu pada *setpoint* 35 °C

Terdapat dua catatan. Pertama, logika yang diuji adalah kendali ambang tunggal tanpa histeresis, sehingga *blower* menyala dan mati pada nilai ambang yang sama. Bila suhu berfluktuasi di sekitar *setpoint*, relay berpotensi berpindah keadaan berulang kali yang mempercepat keausan kontak; pita histeresis (misalnya mati pada *setpoint* dikurangi beberapa derajat) perlu dipertimbangkan. Kedua, waktu respons aktuasi tidak diukur secara kuantitatif; pada pengamatan, relay berpindah keadaan saat suhu pada LCD melewati ambang, tetapi interval waktu yang tepat belum tercatat. Selain itu, pengujian ini membuktikan ketepatan logika kendali, bukan efektivitas *blower* dalam menurunkan suhu massa jagung pada silo nyata, yang memerlukan pengujian lapangan.

3.5 Kinerja jaringan IoT

Pengukuran *delay* dengan *ping* ke broker menghasilkan nilai 182–184 ms dengan rata-rata 183,1 ms (simpangan baku 0,74 ms), yang berada pada kategori Bagus menurut TIPHON (150–300 ms) (Raharjo dkk., 2025). Seluruh paket yang dikirim diterima sehingga *packet loss* tercatat 0%, dan interval pengiriman data telemetri terpantau konsisten sekitar 3 detik pada catatan klien MQTTX (Tabel 7). Kinerja ini memadai untuk pemantauan suhu penyimpanan yang berubah lambat.

Tabel 7. Ringkasan kinerja jaringan

Parameter	Hasil	Kategori/keterangan
<i>Delay</i> minimum–maksimum (ms)	182–184	—
<i>Delay</i> rata-rata (ms), n = 10	183,1	Bagus (TIPHON)
<i>Packet loss</i> (%)	0	Seluruh paket diterima
Interval pengiriman telemetri	± 3 detik	Konsisten pada MQTTX

Hasil ini perlu ditafsirkan hati-hati. *Ping* mengukur waktu tempuh ICMP jaringan ke alamat broker, bukan *delay* ujung ke ujung dari publikasi ESP32 hingga diterima pelanggan MQTT, dan statistik *ping* tidak mewakili kehilangan pesan MQTT. Telemetri pada purwarupa dipublikasikan dengan QoS 0 (maksimal sekali kirim tanpa konfirmasi),

sehingga kehilangan pesan pada tingkat MQTT tidak terdeteksi oleh pengujian ini. Pengukuran *delay* ujung ke ujung dengan penanda waktu pada *payload* serta penghitungan pesan terkirim dan diterima direkomendasikan pada penelitian lanjutan. Selain itu, broker yang dipakai bersifat publik dan koneksi MQTT dikonfigurasi tanpa autentikasi dan tanpa enkripsi; hal ini dapat diterima untuk purwarupa tetapi tidak untuk penerapan industri.

3.6 Keterbatasan penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian dilakukan pada purwarupa skala laboratorium dengan sampel terbatas (10 titik suhu, 5 sampel kadar air, 7 titik aktuasi, 10 pengukuran *delay*), sehingga hasilnya bersifat indikatif dan belum mendukung kesimpulan statistik yang kuat. Sensor DHT11 dan sensor kapasitif adalah komponen berbiaya rendah dengan batasan akurasi, kendali bersifat ON/OFF tanpa histeresis, sistem belum memiliki catu daya cadangan, dan konsumsi energi, aliran udara, serta dampak *blower* terhadap mutu jagung tidak dianalisis.

4. Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji purwarupa pengendali suhu *blower* otomatis berbasis ESP32 dan MQTT untuk simulasi penyimpanan jagung. Seluruh subsistem berfungsi dan data tersinkron pada LCD, MQTTX, Node-RED, Firebase, dan aplikasi *mobile*. Logika ambang menyalakan dan mematikan *blower* secara tepat pada *setpoint* 35 °C di seluruh tujuh titik uji. Sensor DHT11 memiliki deviasi rata-rata -0,82 °C (galat relatif rata-rata 2,54%) dan masih dalam toleransi pabrikan, sedangkan sensor kelembapan kapasitif menyimpang rata-rata -10,74 poin persentase sehingga belum layak untuk pengukuran absolut, tetapi mengikuti tren kadar air referensi ($r = 0,997$; $n = 5$). Pengukuran jaringan menunjukkan *delay* rata-rata 183,1 ms (kategori Bagus) dan *packet loss* 0%, dengan catatan bahwa metode pengukurannya belum mengukur *delay* dan kehilangan pesan MQTT ujung ke ujung.

Pengembangan selanjutnya mencakup kalibrasi multi-titik sensor kadar air atau penggantian dengan sensor berpresisi lebih tinggi, koreksi dan verifikasi *offset* suhu, penambahan histeresis, pengukuran *delay* dan kehilangan pesan MQTT ujung ke ujung, pengamanan komunikasi (autentikasi dan TLS), notifikasi peringatan dini, basis data historis, catu daya cadangan, serta pengujian pada silo atau gudang skala nyata.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT XYZ atas dukungan akses observasi dan sampel uji, serta kepada dosen pembimbing dan Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Tangerang atas bimbingan selama penelitian.

Daftar Pustaka

- Adafruit Industries. (2023). *DHT sensor library* [Perangkat lunak]. GitHub.
<https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library>
- Angappan, S., dkk. (2025). Development of an internet of things based smart cold storage with inventory monitoring system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 89–98.
- Aosong Electronics Co., Ltd. (2024). *DHT11 temperature and humidity module product manual*. <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>

- Aziz, A., dkk. (2025). Moisture sensing technologies for grain storage: From single sensors to intelligent multisensory system. *Precision Agriculture Science and Technology*, 7(4).
- Babichev, Y., dkk. (2025). Modular IoT architecture for monitoring and control of office environments based on Home Assistant. *IoT*, 6(4), 69.
- Chen, K., dkk. (2023). Inner cyclic cooling aeration on stored maize in large commercial warehouses in Northeast China. *International Journal of Food Properties*, 26(2), 3376–3389.
- DFRobot. (2024). *Analog capacitive soil moisture sensor V1.2 product wiki & datasheet*. https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- Fadhlur, R., dkk. (2025). Sistem monitoring suhu menggunakan Internet of Things pada cold chain storage vaksin. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIK)*.
- Garzia, F., dkk. (2023). Meeting user needs through building automation and control systems: A review of impacts and benefits in office environments. *Buildings*, 13(10), 2530.
- Guerbaoui, M., dkk. (2025). From data to decisions: A smart IoT and cloud approach to environmental monitoring. *E3S Web of Conferences*.
- He, W., dkk. (2024). An open-source supervisory control and data acquisition architecture for photovoltaic system monitoring using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED. *Energies*, 17(10), 2295.
- Hermawan, R., dkk. (2025). Implementasi sistem monitoring greenhouse berbasis IoT dan evaluasi kinerja server menggunakan NodeRED dan MQTT. *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, 14(1).
- Hidayah, R. R., dkk. (2024). Implementasi pengaturan suhu menggunakan mikrokontroler ESP32. *METROTECH (Journal of Mechanical and Electrical Technology)*.
- Holman, J. P. (2012). *Experimental methods for engineers*. McGraw-Hill.
- Liando, F., dkk. (2025). Sistem kendali otomatis ruang kelas berbasis ESP32 pada Universitas Widya Dharma Pontianak. *Jurnal InTekSis*, 12(1).
- Ningbo Songle Relay Co., Ltd. (2025). *SRD-05VDC-SL-C 5V DC electromechanical relay datasheet*. <http://www.songlerelay.com/?l=en>
- O’Leary, N. (2024). *PubSubClient: A client library for MQTT messaging* [Perangkat lunak]. GitHub. <https://github.com/knolleary/pubsubclient>
- Purba, J. (2020). Adaptasi varietas dan galur jagung pada lahan marginal. *Agrohita Jurnal Agroteknologi*, 82–93.
- Raharjo, M. A., dkk. (2025). Desain dan analisis quality of service pada sistem otomasi rumah menggunakan wireless sensor network. *Journal of Information System Research (JOSH)*, 6(3).
- Retnasari, T. (2019). Pengembangan database untuk analisa pembuatan pakan pada agribisnis peternakan unggas. *Journal of Information Engineering and Educational Technology*.

- Sarmin, I. M. (2025). Sistem monitoring lingkungan berbasis IoT dan WSN untuk mendeteksi pencemaran udara. *Jurnal Informatika*, 67–76.
- Satriawan, P. G. G., dkk. (2022). Sistem kontrol otomatis dan monitoring temperatur ruangan menggunakan ESP-32 untuk mengendalikan motor DC pada motorized valve. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (JAMETECH)*, 99–103.
- Shafique, K., dkk. (2020). Internet of Things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios. *IEEE Access*, 8, 23022–23040.
- Situmeang, D. Y. (2025). *Implementasi sistem monitoring suhu dan kelembaban pada ruangan fermentasi tempe menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor DHT22 berbasis Internet of Things*. Universitas Sumatera Utara.
- Souza, D. G., dkk. (2024). CO2 levels, technical breakage and quality of maize grains stored under different conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28(8).
- Tiyas, A. W., dkk. (2025). Peningkatan akurasi sensor suhu dan kelembaban DHT11 dengan kalibrasi suhu. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia (JPTI)*, 5(3).
- Vdovichenko, O., dkk. (2024). Analysis of product range of microcontrollers for creation of elements of home automation. *Aerospace Technic and Technology*, 118–126.
- Wicaksono, A. S. (2021). Analisis human error pada sistem pengendalian proses industri menggunakan metode SHERPA. *Jurnal Teknik Industri*, 16(2), 89–96.
- Winarso, K., dkk. (2022). Internet of thing based corn temperature and humidity control with fuzzy method. *International Journal of Science, Engineering, and Information Technology*.