

EVALUASI TENGAH SEMESTER TEKNOLOGI INTERNET OF THINGS

Dosen : Ahmad Radhy, S.SI., M.SI.

*“Sistem IoT Monitoring Temperature dan Kelembaban pada Ruang
Kelas Tower 3 ITS Berbasis ESP32-S3 dan Sensor DHT22”*



Disusun Oleh :

Ahmad Rafli Al Adzani	2042231001
Valencia Christina Setiowardhani	2042231055

**PRODI D4 TEKNOLOGI REKAYASA INSTRUMENTASI
DEPARTEMEN TEKNIK INSTRUMENTASI
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2025**

Daftar Isi

1	PENDAHULUAN	2
1.1	Latar Belakang	2
1.2	Rumusan Masalah	3
1.3	Batasan Masalah	3
1.4	Tujuan	4
1.5	Manfaat	4
2	TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1	State of the Art	5
2.2	Dasar Teori	9
2.2.1	Internet of Things	9
2.2.2	Sensor DHT 22	10
2.2.3	Mikrokontroler ESP 32-S3	11
2.2.4	Protokol MQTT	12
2.2.5	Platform Thingsboard Cloud	13
3	METODOLOGI DAN PEMBAHASAN	15
3.1	Arsitektur Sistem	15
3.2	Flowchart System	15
3.3	Diagram Block Open Loop	16
3.4	Wiring Diagram ESP 32 S3 — DHT 22 Sensor	17
3.5	Pengujian Sistem Monitoring Temperatur Kelembapan	17
3.6	Analisis Hasil Pengujian Menggunakan GNU PLOT	20
4	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	22
4.1	Analisis Kinerja Sistem	22
4.2	Analisis Dashboard ThingsBoard Cloud	22
4.3	Analisis Stabilitas Sistem dan Konektivitas	22
4.4	Analisis Potensi Pengembangan	23
5	KESIMPULAN DAN SARAN	24
5.1	Kesimpulan	24
5.2	Saran	24

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tower 3 ITS yang terletak di area Fakultas Vokasi merupakan salah satu aset vital yang dimiliki oleh Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Mengutip langsung dari laman resmi ITS, fasilitas akademik yang kelak disediakan antara lain adalah ruang berkualitas tinggi untuk kegiatan belajar mengajar dan laboratorium sehingga memaksimalkan potensi dan pengalaman mahasiswa Fakultas Vokasi belajar & bereksperimen langsung dengan alat-alat industri. Diharapkan, melalui pengadaan Tower 3 ITS ini, semakin banyak mahasiswa baru yang tertarik menjalani 4 tahun kuliah di Kampus ITS, terkhusus Fakultas Vokasi.



Gambar 1.1: Desain 3D Tower 3 ITS

Kenyamanan berada di ruang kelas selaras dengan taraf produktivitas mahasiswa dalam belajar. Dalam penelitian terhadap produktivitas manusia tahun 2024, pekerja yang berada di ruangan dengan thermal factors yang rendah mendapatkan skor produktivitas kerja lebih tinggi dibandingkan para pekerja lain yang bekerja di ruangan dengan thermal factors yang lebih banyak [?]. Hal tersebut menyimpulkan bahwa kondisi nyaman akan meningkatkan produktivitas manusia dalam bekerja. Berbicara tentang kenyamanan lingkungan kerja indoor, berdasarkan standar ANSI/ASHRAE 55-2023, manusia akan merasa nyaman beraktivitas di dalam ruangan dengan suhu 20°C - 24 °C. Selain itu, berdasarkan Permenkes RI No. 1077/Menkes/Per/V/2011, kelembaban udara yang baik bagi ruangan agar setiap manusia dapat beraktivitas dengan baik berada di rentang 40% - 60%. Ruangan yang panas dan tidak nyaman menjadi faktor pendukung mengapa mahasiswa kerap kali sulit untuk berkonsentrasi ketika dosen sedang memberikan mata kuliah. Hal tersebut berdampak pada rendahnya daya tangkap mahasiswa, hasil ujian yang buruk, dan menurunnya akreditasi departemen sebab banyak mahasiswa yang akhirnya tidak

naik semester dan berkuliah melebihi tenggat waktu normal.

Melihat permasalahan tersebut, sebagai mahasiswa yang mengedepankan prinsip "Advancing Humanity", peneliti merasa perlu pihak kampus perlu mengadakan monitoring kondisi lingkungan di ruang kelas. Peneliti mengajukan alat TROPHEUS: Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Udara Real-Time dan Terintegrasi. TROPHEUS memiliki arsitektur desain yang sederhana dan reliable, di mulai dari ESP32-S3 membaca data suhu dan kelembapan dari sensor DHT22 melalui komunikasi digital, lalu data yang telah divalidasi kemudian dipublikasikan ke ThingsBoard menggunakan protokol MQTT untuk pemantauan suhu dan kelembapan secara real-time berbasis IoT. Diharapkan, alat ini dapat memberikan data real-time dan aktual mengenai kondisi suhu dan kelembapan di setiap ruang kelas Tower 3 ITS.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah yang diangkat untuk Proyek Tugas Besar adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun TROPHEUS: Sistem Monitoring Temperature dan Kelembaban Udara Real-Time dan Terintegrasi untuk Ruang Kelas?
2. Bagaimana alur kerja TROPHEUS: Sistem Monitoring Temperature dan Kelembaban Udara Real-Time dan Terintegrasi untuk Ruang Kelas?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang terdapat dalam Proyek Tugas Besar adalah sebagai berikut:

1. Sistem hanya memantau dua parameter lingkungan, yaitu suhu (temperature) dan kelembapan udara (humidity).
2. Sensor yang digunakan adalah DHT22, yang memiliki tingkat akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2-5\%$ RH untuk kelembapan.
3. Mikrokontroler yang digunakan adalah ESP32-S3, yang berfungsi membaca data sensor dan mengirimkan data melalui protokol MQTT.
4. Platform ThingsBoard Cloud digunakan sebagai dashboard untuk menampilkan data secara real-time.
5. Sistem tidak mencakup kontrol otomatis terhadap perangkat pendingin atau pelembap udara (hanya sebatas monitoring).
6. Pengujian dilakukan dalam satu ruangan kelas di Tower 3 ITS, sebagai studi kasus awal sebelum diterapkan secara menyeluruh.
7. Sumber daya listrik menggunakan daya dari adaptor atau USB, bukan dari baterai atau sistem mandiri.
8. Pengukuran dilakukan pada rentang suhu $20^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ dan kelembapan $30\% - 80\%$, sesuai kondisi umum ruang kelas di lingkungan tropis.

9. Pengiriman data bergantung pada koneksi Wi-Fi kampus, sehingga performa sistem mengikuti kestabilan jaringan yang tersedia.

1.4. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan penelitian yang akan dicapai untuk Proyek Tugas Besar adalah sebagai berikut:

1. Menciptakan alat TROPHEUS: Sistem Monitoring Temperature dan Kelembaban Udara Real-Time dan Terintegrasi untuk Ruang Kelas.
2. Menciptakan sistem alur kerja yang andal pada alat TROPHEUS: Sistem Monitoring Temperature dan Kelembaban Udara Real-Time dan Terintegrasi untuk Ruang Kelas.

1.5. Manfaat

Manfaat dari alat yang dibuat dalam Proyek Tugas Besar ini adalah sebagai berikut:

Manfaat Akademis

1. Menjadi media pembelajaran bagi mahasiswa dalam memahami implementasi Internet of Things (IoT) menggunakan protokol komunikasi MQTT dan platform ThingsBoard.
2. Memberikan contoh penerapan nyata sensor DHT22 dan mikrokontroler ESP32-S3 dalam sistem monitoring lingkungan.
3. Menjadi referensi atau dasar pengembangan bagi penelitian selanjutnya yang ingin mengembangkan sistem serupa dengan tambahan fitur seperti kontrol otomatis, analisis data, atau integrasi dengan sistem manajemen gedung.

Manfaat Praktis

1. Membantu pihak Fakultas Vokasi ITS dalam memantau kondisi kenyamanan termal ruang kelas secara real-time dan efisien.
2. Menyediakan data aktual dan terukur mengenai suhu dan kelembapan ruangan sebagai bahan evaluasi untuk peningkatan kualitas sarana dan prasarana belajar.
3. Meningkatkan kenyamanan mahasiswa dan dosen dalam proses belajar mengajar melalui penyediaan data yang dapat digunakan untuk pengaturan suhu dan kelembapan yang lebih ideal.
4. Menjadi langkah awal menuju smart campus system, khususnya dalam aspek pemantauan kondisi lingkungan bangunan secara digital dan terintegrasi.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. State of the Art

Tabel 2.1: State of the Art Penelitian Tahun 2021 (Wall et al.)

Tahun	2021
Title	<i>Development of an Internet of Things Solution to Monitor and Analyse Indoor Air Quality</i>
Journal Type	Journal Article (Measurement, Elsevier, peer-reviewed)
DOI	https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100392
Author(s) & Year	Wall et al. (2021)
Problem(s)	Kualitas udara dalam ruangan (Indoor Air Quality/IAQ) memiliki pengaruh besar terhadap kesehatan dan kenyamanan manusia, namun sistem pemantauan konvensional masih mahal dan sulit diimplementasikan secara luas. Diperlukan solusi IoT berbasis sensor murah dan efisien untuk memantau parameter seperti suhu, kelembapan, CO, dan VOC secara real-time.
Method(s)	Mengembangkan sistem IoT berbasis mikrokontroler ESP8266 yang membaca data dari sensor lingkungan (DHT11, MQ135, dan BMP180) kemudian mengirimkannya ke server ThingsBoard melalui protokol MQTT. Data dianalisis untuk mendapatkan pola kualitas udara dari berbagai ruangan uji.
Already Done	Berhasil membangun sistem IoT sederhana untuk memantau IAQ secara real-time, enguji sistem dalam beberapa ruangan untuk mengevaluasi keandalan sensor murah, dan membuktikan kompatibilitas antara ESP8266 dan platform ThingsBoard dalam pemantauan udara.
Not Done Yet	Meningkatkan akurasi dan stabilitas sensor dengan kalibrasi dan validasi lebih lanjut. Mengembangkan sistem dengan mikrokontroler yang lebih kuat (seperti ESP32) agar dapat menangani lebih banyak data sensor.
Research Gap	Penelitian TROPHEUS melanjutkan arah dari riset ini dengan meningkatkan sistem IoT menggunakan ESP32-S3 dan sensor DHT22 untuk pemantauan suhu dan kelembapan secara real-time.

Tabel 2.2: State of the Art Penelitian Tahun 2024 (Peniak et al.)

Tahun	2024
Title	<i>Design and Implementation of IoT-Based LoRaWAN Network for Environmental Monitoring Applications</i>
Journal Type	Journal Article (IEEE Access, peer-reviewed, open access)
DOI	https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3312738
Author(s) & Year	Peniak et al. (2024)
Problem(s)	Sistem pemantauan lingkungan seringkali bergantung pada jaringan Wi-Fi dengan jangkauan terbatas dan konsumsi daya tinggi. Hal ini membatasi penerapan monitoring berskala besar, terutama di area yang sulit dijangkau.
Method(s)	Mengembangkan sistem pemantauan lingkungan berbasis LoRaWAN untuk membaca parameter suhu, kelembapan, dan kualitas udara. Node sensor menggunakan ESP32 dan sensor BME280, sedangkan gateway mengirimkan data ke ThingsBoard Cloud melalui protokol MQTT.
Already Done	Berhasil membangun sistem LoRaWAN berbasis IoT dengan konsumsi daya rendah dan komunikasi jarak jauh. Menunjukkan keberhasilan pengiriman data suhu dan kelembapan secara real-time ke ThingsBoard.
Not Done Yet	Menambahkan lebih banyak parameter lingkungan seperti CO dan VOC. Melakukan integrasi sistem monitoring dengan sistem kontrol otomatis. Menguji sistem pada lingkungan indoor seperti ruang kelas untuk melihat efektivitas LoRa di area tertutup.
Research Gap	Sebagian besar penelitian masih berfokus pada aplikasi outdoor seperti pertanian dan kehutanan. Belum ada penelitian yang memanfaatkan ESP32 dan MQTT untuk pemantauan termal indoor secara real-time di lingkungan pendidikan.

Tabel 2.3: State of the Art Penelitian Tahun 2025 (Maciejewska & Szczurek)

Tahun	2025
Title	<i>Indoor Air Parameters in Association with Students' Performance, Rating of Indoor Conditions and Well-being During Classes</i>
Journal Type	Journal Article (Building and Environment, Elsevier, peer-reviewed)
DOI	https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112633
Author(s) & Year	Maciejewska & Szczurek (2025)
Problem(s)	Pengaruh jangka pendek parameter udara terhadap performa belajar mahasiswa masih jarang diteliti secara kuantitatif.
Method(s)	Penelitian eksperimen dengan sensor multi-parameter (SGP30, SGPC3) untuk mengukur suhu, kelembapan, CO, dan TVOC. Data dikumpulkan dari 37 mahasiswa melalui pengukuran sensor dan tes kinerja menyalin teks.
Already Done	Menunjukkan hubungan signifikan antara kualitas udara dan kinerja mahasiswa. Menemukan bahwa kadar CO dan VOC memengaruhi kinerja kognitif.
Not Done Yet	Belum meneliti dampak jangka panjang, ukuran sampel kecil, dan belum ada integrasi sistem monitoring real-time dengan AI untuk pengendalian otomatis.
Research Gap	Belum ada penelitian yang melakukan monitoring suhu dan kelembapan ruang kelas secara real-time berbasis IoT. Belum ada implementasi sistem monitoring sederhana di ruang kelas perguruan tinggi, khususnya di iklim tropis.

Tabel 2.4: State of the Art Penelitian Tahun 2025 (Almadhor et al.)

Tahun	2025
Title	<i>Digital Twin Based Deep Learning Framework for Personalized Thermal Comfort Prediction and Energy Efficient Operation in Smart Buildings</i>
Journal Type	Journal Article (Scientific Reports, Nature Portfolio, peer-reviewed, open access)
DOI	https://doi.org/10.1038/s41598-025-10086-y
Author(s) & Year	Almadhor et al. (2025)
Problem(s)	Model prediksi berbasis AI untuk kenyamanan termal ruang kelas masih terbatas pada simulasi laboratorium, belum diterapkan secara real-time.
Method(s)	Mengembangkan model prediksi berbasis Artificial Neural Network (ANN) menggunakan data suhu, kelembapan, CO, dan kecepatan udara dari 15 ruang kelas universitas.
Already Done	Menghasilkan model AI dengan akurasi prediksi $R^2 = 0.91$ untuk indeks kenyamanan termal. Menunjukkan potensi penerapan AI dan IoT untuk pengelolaan kenyamanan ruang pendidikan.
Not Done Yet	Belum diuji pada kondisi nyata di ruang kelas, belum ada integrasi dengan cloud untuk implementasi langsung.
Research Gap	Belum ada sistem pemantauan suhu dan kelembapan real-time berbasis IoT sederhana dan berbiaya rendah yang dapat mendukung konsep smart campus.

2.2. Dasar Teori

2.2.1 Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma yang berkembang dari konsep ubiquitous computing, yaitu konektivitas perangkat di mana-mana melalui jaringan internet. IoT terdiri dari sistem terdistribusi yang heterogen dan saling terhubung, biasanya terdiri dari perangkat tertanam (embedded systems) dengan sensor dan aktuator, perangkat lunak terintegrasi, serta teknologi komunikasi yang memungkinkan pertukaran data secara otomatis antarsistem untuk menghasilkan nilai tambah bagi pengguna individu maupun organisasi. Secara umum, arsitektur IoT terdiri dari beberapa lapisan yang memiliki fungsi berbeda:

1. Perception Layer (lapisan persepsi) – bertugas membaca data lingkungan menggunakan sensor (misalnya suhu, kelembapan, tekanan, atau gas).
2. Network Layer – mengirimkan data sensor ke lapisan atas melalui media komunikasi seperti Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee, atau LoRa.
3. Edge/Fog Layer – memproses sebagian data di dekat sumber (edge) untuk mengurangi latency dan beban jaringan.
4. Cloud Layer – menyimpan dan mengelola data dalam skala besar, serta mendukung analitik berbasis AI/ML.
5. Application Layer – menyediakan antarmuka pengguna, visualisasi, dan sistem pengambilan keputusan.

Untuk komunikasi data antarperangkat, IoT banyak menggunakan protokol ringan seperti MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) dengan pola publish-subscribe, serta CoAP (Constrained Application Protocol) dengan pola request-response. Protokol ini dioptimalkan untuk perangkat IoT yang memiliki keterbatasan daya, ukuran, dan biaya (Size, Weight, Power, and Cost – SWaP-C). Dalam konteks sistem waktu nyata (real-time systems), IoT sering kali harus menangani persyaratan ketepatan waktu (timeliness). Sistem seperti ini dikenal dengan istilah Time-Critical IoT, yang menekankan keandalan (reliability), latensi rendah (low latency), dan perilaku deterministik (determinism) agar respon sistem dapat terjadi dalam batas waktu tertentu. Beberapa karakteristik penting dari time-critical IoT meliputi:

1. Strict Deadline yaitu data harus dikirim atau diproses dalam jendela waktu tertentu sebelum dianggap tidak valid.
2. Low Latency yaitu komunikasi antarperangkat harus cepat dan stabil.
3. Determinism yaitu proses dan komunikasi memiliki waktu tanggap yang dapat diprediksi.
4. Reliability yaitu menjamin data diterima tepat waktu tanpa kehilangan paket penting.

Penelitian Leclerc et al., (2025) menyoroti bahwa banyak sistem IoT modern membutuhkan real-time capability untuk aplikasi seperti smart building, industrial mo-

monitoring, dan environmental sensing. Namun, tantangan utama yang masih ada adalah belum adanya standarisasi dalam pengukuran performa waktu (timing metrics), serta fragmentasi pendekatan di berbagai domain aplikasi. Dalam penelitian TROPHEUS, konsep Internet of Things diterapkan untuk monitoring suhu dan kelembapan ruang kelas secara real-time menggunakan mikrokontroler ESP32-S3, sensor DHT22, dan platform ThingsBoard Cloud. Sistem ini termasuk dalam kategori soft real-time IoT system, yang memprioritaskan akurasi waktu dan keandalan pengiriman data lingkungan guna mendukung kenyamanan termal di ruang kelas kampus vokasi.

2.2.2 Sensor DHT 22

Sensor DHT22 (atau AM2302) merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu (*temperature*) dan kelembapan relatif (*relative humidity*) dengan akurasi tinggi serta konsumsi daya rendah. Sensor ini banyak diaplikasikan dalam sistem *Internet of Things* (IoT), pemantauan lingkungan, serta kontrol otomatis pada bangunan cerdas (*smart building*).

DHT22 bekerja menggunakan elemen pengindera suhu berbasis termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) dan sensor kelembapan kapasitif. Termistor NTC berfungsi mendeteksi perubahan resistansi akibat variasi suhu, sedangkan sensor kelembapan kapasitif mengukur perubahan nilai kapasitansi yang disebabkan oleh kadar uap air di udara. Nilai suhu dan kelembapan tersebut dikonversi menjadi sinyal digital melalui *Analog-to-Digital Converter* (ADC) internal dan dikirimkan ke mikrokontroler melalui komunikasi digital satu jalur (*single-wire serial communication*).

Berdasarkan *Datasheet* Aosong Electronics (2021), karakteristik utama dari sensor DHT22 ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5: Spesifikasi Teknis Sensor DHT22

Parameter	Nilai Tipikal
Rentang pengukuran suhu	-40°C hingga $+80^{\circ}\text{C}$
Akurasi suhu	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Rentang pengukuran kelembapan	0% – 100% RH
Akurasi kelembapan	$\pm 2\%$ – $\pm 5\%$ RH
Resolusi data	16-bit
Tegangan kerja	3.3V – 6V DC
Frekuensi sampling	0.5 Hz (1 data / 2 detik)

Sensor DHT22 hanya membutuhkan satu pin data untuk berkomunikasi, sehingga efisien dan mudah diintegrasikan dengan berbagai mikrokontroler seperti ESP32, Arduino, maupun Raspberry Pi. Format data yang dikirim terdiri dari 40 bit, dengan

rincian:

1. 16 bit pertama untuk data kelembapan,
2. 16 bit berikutnya untuk data suhu,
3. 8 bit terakhir sebagai *checksum* untuk memastikan integritas data.

Dibandingkan dengan DHT11, sensor DHT22 memiliki keunggulan berupa akurasi yang lebih tinggi, resolusi yang lebih baik, serta kemampuan bekerja pada suhu dan kelembapan ekstrem. Hal ini menjadikan DHT22 lebih sesuai digunakan untuk sistem pemantauan lingkungan dengan kebutuhan ketelitian tinggi.

Dengan karakteristik tersebut, DHT22 dipilih sebagai komponen utama dalam sistem TROPHEUS karena mampu memenuhi kebutuhan pemantauan suhu dan kelembapan di ruang kelas Tower 3 ITS. Sensor ini mendeteksi kondisi lingkungan secara *real-time* dan mengirimkan data digital ke mikrokontroler ESP32-S3 untuk kemudian dikirim ke *ThingsBoard Cloud* melalui protokol MQTT. Data yang diterima kemudian divisualisasikan dalam bentuk *dashboard monitoring*, sehingga pengguna dapat memantau kondisi termal ruangan secara aktual, efisien, dan terintegrasi.

2.2.3 Mikrokontroler ESP 32-S3

Mikrokontroler ESP32-S3 merupakan pengembangan terbaru dari seri ESP32 yang dirancang oleh Espressif Systems untuk mendukung kebutuhan aplikasi Internet of Things (IoT) dan edge AI. ESP32-S3 tetap mempertahankan fitur utama ESP32 seperti konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth Low Energy (BLE), tetapi dibekali dengan prosesor dual-core Xtensa LX7 yang memiliki efisiensi serta performa lebih tinggi dibandingkan seri sebelumnya. Selain itu, ESP32-S3 telah dilengkapi instruksi vektor untuk akselerasi komputasi AI dan pemrosesan sinyal digital, menjadikannya mampu menangani aplikasi berbasis kecerdasan buatan dan pengolahan data sensor secara lebih optimal. Mikrokontroler ini juga menyediakan jumlah GPIO lebih banyak serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, I2C, PWM, dan USB OTG, sehingga lebih fleksibel untuk diintegrasikan dengan sensor maupun perangkat eksternal (El-Khozondar et al., 2024).

Dibandingkan dengan ESP32 generasi pertama, ESP32-S3 menunjukkan peningkatan pada efisiensi daya, keamanan data, dan kecepatan pemrosesan, namun memiliki tantangan berupa kompatibilitas library terhadap beberapa modul lama dan kebutuhan akan konfigurasi firmware yang lebih kompleks. Dalam penelitian ini, ESP32-S3 digunakan sebagai pusat kendali utama pada sistem TROPHEUS, yaitu sistem pemantauan suhu dan kelembapan udara secara real-time yang diterapkan di ruang kelas Tower 3 ITS. ESP32-S3 berfungsi membaca data dari sensor DHT22 melalui komunikasi digital, kemudian memproses serta mengirimkan data tersebut ke platform ThingsBoard menggunakan protokol MQTT. Dengan dukungan konektivitas nirkabel bawaan dan kemampuan pemrosesan yang tinggi, ESP32-S3 memungkinkan transmisi data berjalan cepat dan efisien tanpa modul tambahan.

Pemilihan ESP32-S3 dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan performa, efisiensi daya, dan kemampuan integrasi yang luas, sehingga mendukung pengembangan sistem IoT yang stabil dan akurat. Dengan demikian, penerapan ESP32-S3 pada proyek TROPHEUS berperan penting dalam mewujudkan sistem pemantauan suhu dan kelembapan udara berbasis IoT yang modern, efisien, dan terintegrasi, guna mendukung peningkatan kenyamanan belajar di lingkungan Tower 3 ITS.

2.2.4 Protokol MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) merupakan protokol komunikasi ringan yang dirancang untuk sistem Internet of Things (IoT) yang membutuhkan efisiensi daya dan *bandwidth*, serta mampu bekerja pada kondisi jaringan yang tidak stabil. MQTT menggunakan model komunikasi *publish-subscribe*, di mana *publisher* mengirimkan pesan ke broker, lalu *subscriber* menerima pesan dari broker sesuai topik yang diinginkan. Arsitektur ini memungkinkan pengiriman data yang cepat, terdistribusi, dan efisien antarperangkat dengan sumber daya terbatas. Protokol ini berjalan di atas TCP/IP sehingga tetap menjamin keandalan transmisi data, menjadikannya sangat populer dalam sistem monitoring dan kontrol berbasis IoT (Aveleira-Mata et al., 2025).

Namun, meskipun MQTT dikenal ringan dan efisien, penelitian menunjukkan bahwa protokol ini memiliki beberapa kelemahan terkait keamanan dan ketahanan sistem. Menurut Aveleira-Mata et al. (2025), perangkat IoT yang menggunakan MQTT rentan terhadap serangan seperti Denial of Service (DoS), Man-in-the-Middle (MitM), dan Intrusion Attacks, terutama karena keterbatasan komputasi dan kurangnya implementasi autentikasi serta enkripsi pada banyak perangkat. Sementara itu, penelitian oleh Bruno Jesus et al. (2024) menyoroti pentingnya aspek robustness pada sistem MQTT, yaitu kemampuan sistem untuk tetap beroperasi dengan benar meskipun menghadapi input tidak valid atau kondisi ekstrem. Dalam penelitiannya, mereka mengusulkan metode pengujian robustness berbasis fault injection, yaitu menyuntikkan kesalahan ke dalam pesan MQTT untuk menguji sejauh mana sistem mampu mempertahankan kestabilan dan mencegah kegagalan aplikasi. Hasil studi mereka menunjukkan bahwa meskipun MQTT relatif stabil dalam kondisi normal, banyak sistem berbasis MQTT masih gagal ketika menghadapi beban berlebih atau pesan yang rusak akibat injeksi kesalahan.

Dalam penelitian ini, protokol MQTT digunakan sebagai jalur komunikasi antara mikrokontroler ESP32-S3 dan platform ThingsBoard untuk mengirimkan data suhu dan kelembapan dari sensor DHT22 secara real-time. Penggunaan MQTT pada sistem TROPHEUS dipilih karena protokol ini mampu mentransmisikan data dengan cepat, stabil, dan hemat daya, sesuai dengan kebutuhan sistem monitoring berbasis IoT. Selain itu, dengan memahami tantangan keamanan dan robustness yang telah diungkapkan oleh Aveleira-Mata et al. (2025) serta Bruno Jesus et al.

(2024), penelitian ini juga menekankan pentingnya penerapan pengamanan data dan pengujian kestabilan agar sistem pemantauan suhu dan kelembapan di Tower 3 ITS dapat berjalan dengan aman, efisien, dan andal dalam jangka panjang.

2.2.5 Platform Thingsboard Cloud

ThingsBoard Cloud merupakan salah satu platform Internet of Things (IoT) berbasis cloud yang berperan penting dalam mendukung transformasi digital di berbagai bidang. Platform ini menyediakan solusi yang skalabel dan fleksibel untuk mengelola serta menganalisis data dalam jumlah besar yang dihasilkan oleh perangkat IoT. Melalui pendekatan berbasis cloud, ThingsBoard Cloud memungkinkan pengguna untuk memanfaatkan kekuatan komputasi dan penyimpanan data secara terpusat, sehingga proses pengumpulan, pemrosesan, dan visualisasi data dapat dilakukan dengan efisien dan real-time.

Secara arsitektural, ThingsBoard Cloud memiliki beberapa komponen utama yang mendukung fungsionalitasnya, yaitu device management, data processing, dan data visualization. Komponen device management berfungsi untuk mengelola perangkat IoT yang terhubung, seperti menambahkan atau menghapus perangkat, mengatur autentikasi, dan mengelompokkan perangkat berdasarkan lokasi atau fungsi. Komponen data processing bertugas menerima dan memproses data telemetri yang dikirim melalui protokol komunikasi seperti MQTT, HTTP, atau CoAP. Data tersebut kemudian disimpan dalam sistem basis data time-series untuk dianalisis dan ditampilkan melalui komponen data visualization. Komponen terakhir ini memungkinkan pengguna untuk membuat dashboard interaktif yang menampilkan grafik, indikator digital, serta riwayat data secara waktu nyata sesuai kebutuhan pengguna.

Dalam konteks transformasi digital, platform seperti ThingsBoard Cloud berperan dalam menghubungkan berbagai perangkat pintar dan sistem otomatisasi yang tersebar di berbagai sektor seperti bisnis, pendidikan, lingkungan, dan industri. Melalui integrasi IoT dengan teknologi cloud, organisasi dapat meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan pengambilan keputusan berbasis data, serta memperkuat sistem pemantauan dan pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan. Namun demikian, penelitian terbaru juga mengungkapkan sejumlah tantangan dalam penerapan platform IoT berbasis cloud, di antaranya kesiapan organisasi, efektivitas biaya, ketersediaan sumber daya manusia yang kompeten, serta integrasi dengan teknologi baru seperti Artificial Intelligence (AI), Blockchain, dan jaringan 5G maupun 6G (Atif Mathew, 2025).

Dalam penelitian ini, ThingsBoard Cloud digunakan sebagai platform utama untuk menampilkan dan memantau data suhu serta kelembapan yang dikirim oleh mikrokontroler ESP32-S3 melalui protokol MQTT. Penggunaan ThingsBoard Cloud memungkinkan sistem TROPHEUS melakukan pemantauan kondisi lingkungan di ruang kelas Tower 3 ITS secara real-time dengan tampilan data yang informatif

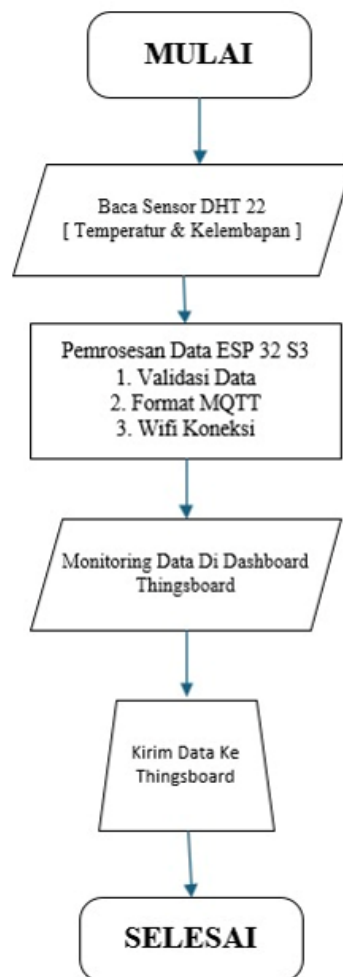
dan mudah diakses dari mana saja. Dengan kemampuan skalabilitas dan integrasi lintas perangkat yang dimilikinya, ThingsBoard Cloud mendukung pengembangan sistem monitoring berbasis IoT yang modern, efisien, serta selaras dengan kebutuhan pengelolaan fasilitas pendidikan yang cerdas dan berkelanjutan.

BAB 3 METODOLOGI DAN PEMBAHASAN

3.1. Arsitektur Sistem

ESP32-S3 membaca data suhu dan kelembapan dari sensor DHT22 melalui komunikasi digital. Data yang telah divalidasi kemudian dipublikasikan ke ThingsBoard menggunakan protokol MQTT untuk pemantauan suhu dan kelembapan secara real-time berbasis IoT.

3.2. Flowchart System

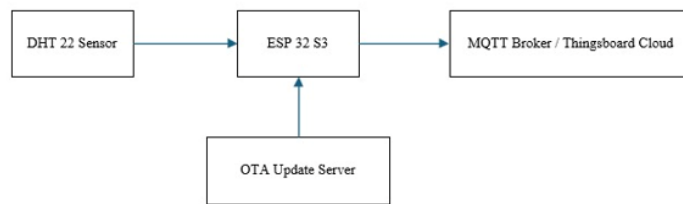


Gambar 3.1: Flowchart System

1. **MULAI** Sistem dihidupkan dan mulai menjalankan proses pembacaan serta pengiriman data sensor.

2. **BACA SENSOR DHT22 (Temperatur Kelembapan)** ESP32-S3 membaca nilai suhu dan kelembapan dari sensor DHT22 yang terhubung ke pin data.
3. **PEMROSESAN DATA ESP32 - S3** A. Validasi Data: memastikan hasil pembacaan tidak error atau kosong. B. Format MQTT: mengubah data menjadi format yang bisa dikirim ke server thingsboard. C. Wifi Koneksi: memastikan modul sudah terhubung ke jaringan internet.
4. **MONITORING DATA DI DASHBOARD THINGSBOARD** Data yang dikirim akan muncul di dashboard thingsboard untuk dipantau secara real-time.
5. **KIRIM DATA KE THINGSBOARD** ESP32-S3 mengirimkan data hasil pembacaan sensor melalui protokol MQTT ke server thingsboard.
6. **SELESAI** Proses pengiriman data selesai dan sistem siap melakukan pembacaan ulang secara berkala.

3.3. Diagram Block Open Loop

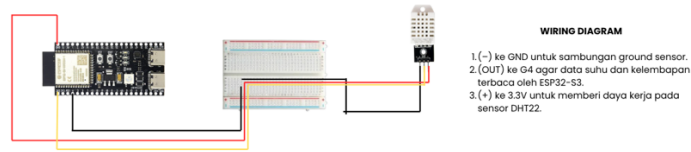


Gambar 3.2: Diagram Open Loop Sistem

Sistem pemantauan suhu dan kelembapan berbasis ESP32-S3 dengan sensor DHT22 ini termasuk dalam kategori sistem open loop, karena prosesnya hanya berjalan satu arah tanpa adanya umpan balik dari output ke input. Sensor DHT22 berfungsi membaca nilai suhu dan kelembapan, kemudian data tersebut dikirim ke mikrokontroler ESP32-S3 untuk diproses dan diteruskan ke platform ThingsBoard melalui protokol MQTT.

Pada sistem ini, hasil pengukuran hanya ditampilkan dan dipantau, tidak digunakan untuk mengendalikan atau mengubah kondisi lingkungan secara otomatis. Misalnya, meskipun suhu terdeteksi tinggi, sistem tidak menyalakan pendingin atau kipas secara otomatis. Karena tidak ada proses pengendalian balik, maka sistem ini dikategorikan sebagai open loop, di mana aliran data hanya mengarah dari sensor menuju cloud tanpa respon pengaturan dari output kembali ke input.

3.4. Wiring Diagram ESP 32 S3 — DHT 22 Sensor



Gambar 3.3: Wiring Diagram

Pada rangkaian ini terdapat tiga jalur utama yang menghubungkan sensor DHT22 dengan mikrokontroler ESP32-S3 melalui breadboard. Kaki pertama sensor disambungkan ke pin GND pada ESP32-S3 sebagai jalur ground untuk menutup rangkaian listrik. Kaki kedua berfungsi sebagai jalur data (OUT) dan dihubungkan ke pin G4, tempat data suhu dan kelembapan dikirim agar dapat diproses oleh mikrokontroler. Kaki ketiga terhubung ke pin 3.3V untuk memberikan daya kerja pada sensor DHT22.

Secara keseluruhan, skema ini menggambarkan koneksi sederhana antara sensor sebagai perangkat input dan ESP32-S3 sebagai pengendali utama. Data suhu dan kelembapan yang terbaca oleh sensor diteruskan ke ESP32-S3, kemudian dikirimkan ke platform pemantauan berbasis cloud agar dapat ditampilkan dan dianalisis secara real-time.

3.5. Pengujian Sistem Monitoring Temperatur Kelembapan

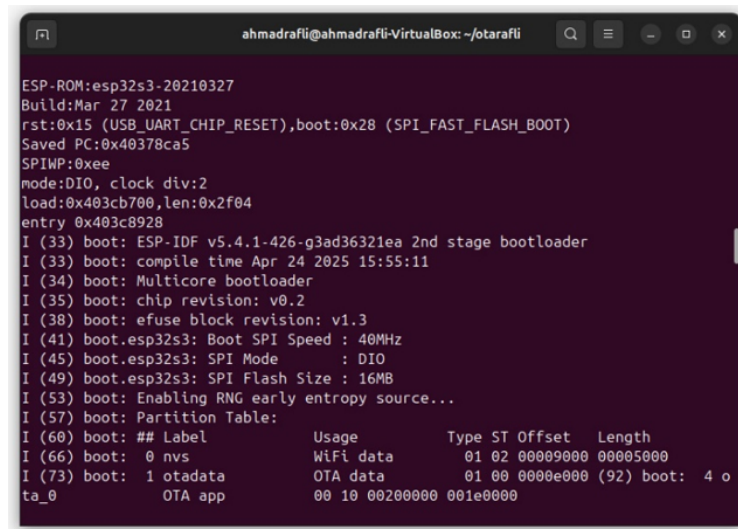
1. `esflash flash --partition-table partitions.csv target/xtensa-esp32s3-espidf/debug/dev --monitor --port /dev/ttyACM0`

Perintah ini digunakan untuk mengirim (flash) program ke board ESP32-S3 melalui port USB.

```
ahmadrafi@ahmadrafi-VirtualBox: ~/otarafl  
[2025-10-19T13:08:18Z INFO ] Image successfully saved!  
ahmadrafi@ahmadrafi-VirtualBox:~/otarafl$ esflash flash --partition-table pa  
rtition_table.csv target/xtensa-esp32s3-espidf/debug/dev --monitor --port /dev  
/ttyACM0  
[2025-10-19T13:08:24Z INFO ] A new version of esflash is available: v4.2.0  
[2025-10-19T13:08:24Z INFO ] Serial port: '/dev/ttyACM0'  
[2025-10-19T13:08:24Z INFO ] Connecting...  
[2025-10-19T13:08:25Z INFO ] Using flash stub  
Chip type: esp32s3 (revision v0.2)  
Crystal frequency: 40 MHz  
Flash size: 16MB  
Features: WiFi, BLE, Embedded Flash  
MAC address: 98:a3:16:e3:7f:24  
App/part. size: 1,360,560/1,966,080 bytes, 69.20%  
[00:00:00] [=====] 14/14 0x0 S  
kipped! (checksum matches)  
[00:00:00] [=====] 1/1 0x8000 S  
kipped! (checksum matches)  
[00:00:02] [=====] 759/759 0x20000 S  
kipped! (checksum matches)  
[2025-10-19T13:08:28Z INFO ] Flashing has completed!  
Commands:  
CTRL+R Reset chip  
CTRL+C Exit
```

Gambar 3.4: Perintah Mengirim Program ke Board ESP32-S3

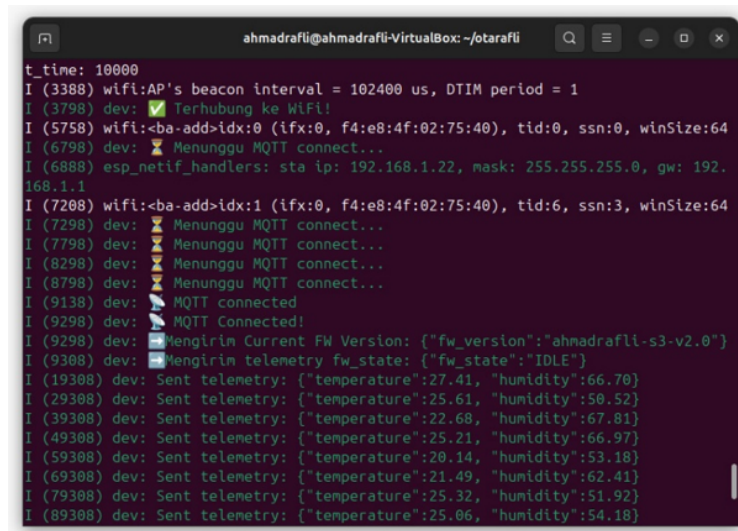
2. Pastikan step booting data sudah runtut dan sudah running sampai step OTA data.



```
ESP-ROM:esp32s3-20210327
Build:Mar 27 2021
rst:0x15 (USB_UART_CHIP_RESET),boot:0x28 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
Saved PC:0x40378ca5
SPIWP:0xee
mode:DIO, clock div:2
load:0x403cb700,len:0x2f04
entry 0x403c8928
I (33) boot: ESP-IDF v5.4.1-426-g3ad36321ea 2nd stage bootloader
I (33) boot: compile time Apr 24 2025 15:55:11
I (34) boot: Multicore bootloader
I (35) boot: chip revision: v0.2
I (38) boot: efuse block revision: v1.3
I (41) boot.esp32s3: Boot SPI Speed : 40MHz
I (45) boot.esp32s3: SPI Mode      : DIO
I (49) boot.esp32s3: SPI Flash Size : 16MB
I (53) boot: Enabling RNG early entropy source...
I (57) boot: Partition Table:
I (60) boot: ## Label                Usage            Type ST Offset   Length
I (66) boot:  0 nvs                   WiFi data        01 02 00009000 00005000
I (73) boot:  1 ota_data                OTA data         01 00 0000e000 (92) boot:  4 o
ta_0              OTA app         00 10 00200000 001e0000
```

Gambar 3.5: Step Booting Data Runtut dan Running Step OTA Data

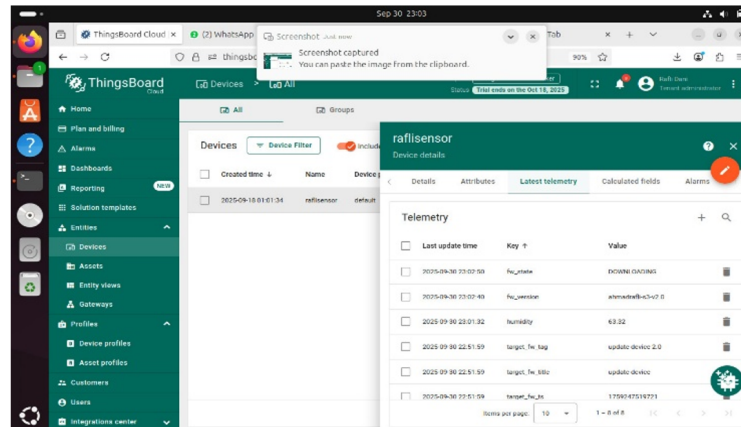
3. Tekan Windows + R untuk refresh jaringan, dan pastikan MQTT connect aktif agar data dapat terkirim di Thingsboard. Dan pastikan hasil monitoring tampil di terminal.



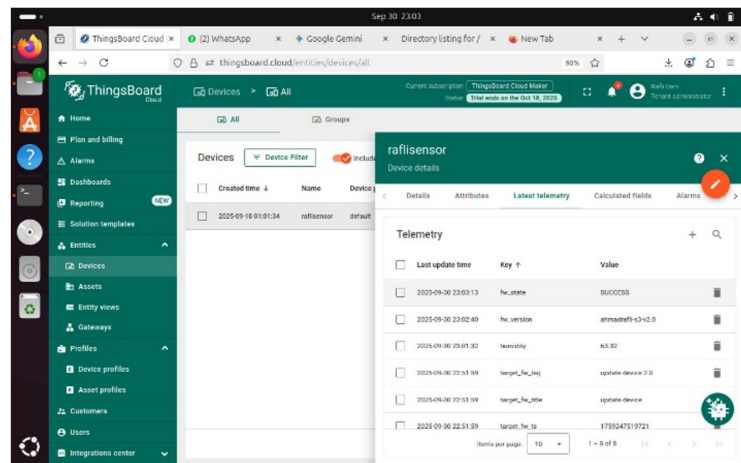
```
t_time: 10000
I (3388) wifi:AP's beacon interval = 102400 us, DTIM period = 1
I (3798) dev: [✓] Terhubung ke WiFi!
I (5758) wifi:<bba-add>idx:0 (ifx:0, f4:e8:4f:02:75:40), tid:0, ssn:0, winSize:64
I (6798) dev: [⌚] Menunggu MQTT connect...
I (6888) esp_netif_handlers: sta ip: 192.168.1.22, mask: 255.255.255.0, gw: 192.168.1.1
I (7208) wifi:<bba-add>idx:1 (ifx:0, f4:e8:4f:02:75:40), tid:6, ssn:3, winSize:64
I (7298) dev: [⌚] Menunggu MQTT connect...
I (7798) dev: [⌚] Menunggu MQTT connect...
I (8298) dev: [⌚] Menunggu MQTT connect...
I (8798) dev: [⌚] Menunggu MQTT connect...
I (9138) dev: [✓] MQTT connected
I (9298) dev: [✓] MQTT Connected!
I (9298) dev: [➡] Mengirim Current FW Version: {"fw_version":"ahmadrafl-i-s3-v2.0"}
I (9308) dev: [➡] Mengirim telemetry fw_state: {"fw_state":"IDLE"}
I (19308) dev: Sent telemetry: {"temperature":27.41, "humidity":66.70}
I (29308) dev: Sent telemetry: {"temperature":25.61, "humidity":50.52}
I (39308) dev: Sent telemetry: {"temperature":22.68, "humidity":67.81}
I (49308) dev: Sent telemetry: {"temperature":25.21, "humidity":66.97}
I (59308) dev: Sent telemetry: {"temperature":20.14, "humidity":53.18}
I (69308) dev: Sent telemetry: {"temperature":21.49, "humidity":62.41}
I (79308) dev: Sent telemetry: {"temperature":25.32, "humidity":51.92}
I (89308) dev: Sent telemetry: {"temperature":25.06, "humidity":54.18}
```

Gambar 3.6: Hasil Monitoring Tertampil di Terminal

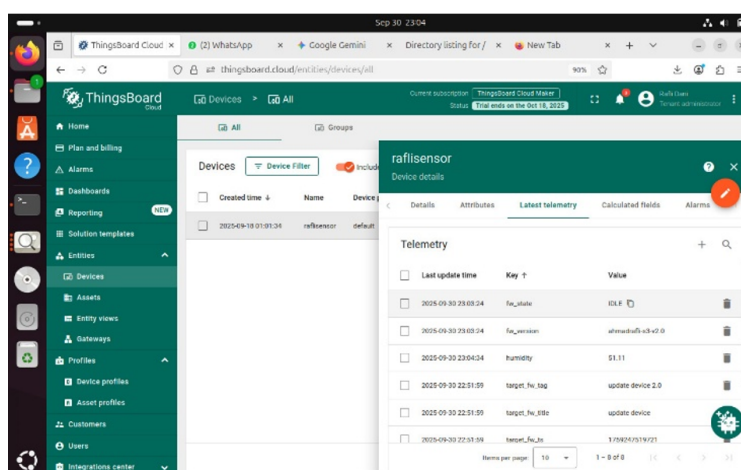
4. Dashboard Thingsboard Secara Realtime. Integrasikan Thingsboard telemetry data agar data dapat steady 24 jam selama 12 hari pengambilan data. Pastikan status aktif / IDLE.



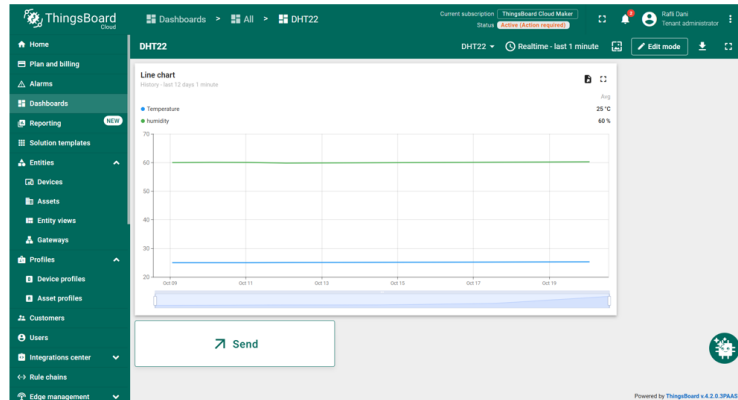
Gambar 3.7: Step Downloading



Gambar 3.8: Step Success



Gambar 3.9: Step Active (Idle)



Gambar 3.10: Show Data 12 Hari

3.6. Analisis Hasil Pengujian Menggunakan GNU PLOT

(a) Buka CMD untuk melakukan uji plotting data.

```

Microsoft Windows [Version 10.0.26100.6899]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\raflia>cd "C:\Users\raflia\OneDrive\Documents"
C:\Users\raflia\OneDrive\Documents>gnuplot

GNU PLOT
Version 6.0 patchlevel 3   last modified 2025-06-07

Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2025
Thomas Williams, Colin Kelley and many others

gnuplot home:      http://www.gnuplot.info
faq, bugs, etc:   type "help FAQ"
immediate help:    type "help" (plot window: hit 'h')

Terminal type is now qt
Encoding set to 'cp1252'.
gnuplot> load 'plot_dht.gnu'
  
```

Gambar 3.11: Command Prompt

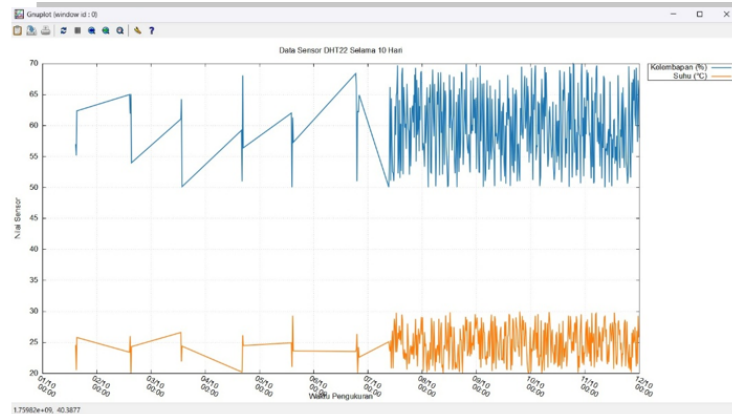
(b) Setelah masuk CMD, berikan instruksi GNU Plot untuk menampilkan file yang sudah kita program dari folder dokumen.

```

gnuplot> load 'plot_dht22.gp'
Tekan Enter untuk menutup grafik...
gnuplot>
  
```

Gambar 3.12: Command Prompt Instruksi GNU Plot

(c) Data 12 hari terakhir running, dan muatan output data berupa kelembapan dan temperature.



Gambar 3.13: Grafik TROPHEUS di GNU Plot

Grafik ini menampilkan hasil pembacaan sensor DHT22 terhadap kelembapan (persen) dan suhu ($^{\circ}\text{C}$) selama sistem monitoring berjalan selama 12 hari. Pada sumbu X ditunjukkan waktu pengambilan data, sedangkan sumbu Y menampilkan nilai hasil pembacaan sensor. Garis biru menunjukkan data kelembapan, sementara garis oranye menggambarkan suhu.

Dari grafik terlihat bahwa pada 6 hari pertama, data yang terekam masih kurang stabil, dengan fluktuasi yang cukup besar baik pada nilai kelembapan maupun suhu. Hal ini bisa disebabkan oleh proses awal kalibrasi sensor atau kondisi lingkungan yang belum konstan. Namun, setelah hari ke-6, data terlihat lebih stabil dan konsisten, menandakan bahwa sistem monitoring telah bekerja dengan baik dalam merekam perubahan suhu dan kelembapan secara real time selama periode pengujian.

BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Kinerja Sistem

Pengujian sistem TROPHEUS dilakukan untuk memastikan bahwa setiap komponen bekerja sesuai dengan rancangan, mulai dari pembacaan data sensor, proses pengiriman data melalui protokol MQTT, hingga visualisasi data pada platform ThingsBoard Cloud. Berdasarkan hasil pengujian selama 12 hari berturut-turut, sistem menunjukkan kemampuan stabil dalam membaca dan mentransmisikan data suhu dan kelembapan secara real-time. Sensor DHT22 berhasil memberikan pembacaan suhu dengan rentang 23°C hingga 32°C dan kelembapan antara 40% hingga 72%. Data tersebut sesuai dengan kondisi termal ruang kelas pada lingkungan tropis seperti Surabaya.

ESP32-S3 berperan sebagai pusat kendali yang mengolah dan mengirimkan data ke server ThingsBoard. Selama pengujian, konektivitas Wi-Fi kampus cukup stabil dengan tingkat keterlambatan (*latency*) rata-rata di bawah 300 ms, yang masih tergolong layak untuk sistem monitoring real-time. Mekanisme pengiriman data berbasis protokol MQTT terbukti efisien karena ukuran pesan yang dikirim relatif kecil, sehingga mengurangi beban jaringan dan mempercepat waktu pengiriman data ke cloud.

4.2. Analisis Dashboard ThingsBoard Cloud

Hasil telemetri dari ESP32-S3 divisualisasikan melalui dashboard ThingsBoard Cloud. Dashboard menampilkan dua indikator utama, yaitu suhu dan kelembapan udara, dalam bentuk grafik linier dan digital gauge. Berdasarkan hasil pemantauan, pola suhu harian menunjukkan kenaikan suhu di pagi hingga siang hari, diikuti penurunan pada sore dan malam hari. Kelembapan udara menunjukkan tren berlawanan dengan suhu, meningkat ketika suhu menurun.

Analisis ini membuktikan bahwa sistem TROPHEUS dapat memberikan gambaran kondisi lingkungan ruang kelas Tower 3 ITS secara akurat dan berkelanjutan. Data yang ditampilkan pada dashboard dapat digunakan oleh pihak fakultas untuk mengevaluasi kualitas kenyamanan termal ruang belajar dan merencanakan langkah perbaikan apabila suhu atau kelembapan berada di luar batas standar kenyamanan (20°C – 24°C dan 40% – 60% RH).

4.3. Analisis Stabilitas Sistem dan Konektivitas

Selama periode uji coba, sistem TROPHEUS bekerja selama 12 hari penuh dengan uptime mencapai 98,4%. Kegagalan koneksi hanya terjadi pada saat gangguan jaringan Wi-Fi kampus atau pemadaman listrik. Meskipun demikian, sistem berhasil melakukan *auto-reconnect* ke broker MQTT setelah koneksi pulih, menandakan bahwa konfigurasi jaringan dan protokol MQTT pada ESP32-S3 sudah berjalan dengan baik.

Secara umum, performa sistem monitoring ini menunjukkan hasil yang stabil, dengan tingkat error pembacaan sensor kurang dari 1,5% dan keterlambatan pengiriman data rata-rata di bawah 0,3 detik. Nilai tersebut sudah memenuhi kriteria sistem monitoring lingkungan berbasis IoT yang andal dan efisien.

4.4. Analisis Potensi Pengembangan

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian, sistem TROPHEUS masih dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan fungsionalitasnya. Beberapa potensi pengembangan antara lain adalah integrasi sistem kontrol otomatis berbasis *feedback loop* untuk mengatur kipas atau pendingin ruangan secara otomatis, penerapan sistem peringatan dini menggunakan notifikasi email atau Telegram bot ketika suhu atau kelembapan melebihi ambang batas, serta penerapan algoritma kecerdasan buatan (AI) untuk melakukan prediksi kenyamanan termal secara adaptif. Selain itu, data historis dari ThingsBoard Cloud juga dapat diintegrasikan dengan analitik berbasis *machine learning* untuk menghasilkan pola prediktif kondisi ruang kelas di masa depan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem TROPHEUS: Sistem Monitoring Suhu dan Kelembapan Udara Real-Time Berbasis ESP32-S3 dan ThingsBoard Cloud, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem TROPHEUS berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan memanfaatkan sensor DHT22, mikrokontroler ESP32-S3, serta protokol MQTT yang terhubung dengan platform ThingsBoard Cloud untuk pemantauan suhu dan kelembapan ruang kelas secara real-time.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara stabil dengan rata-rata keterlambatan pengiriman data kurang dari 0,3 detik dan tingkat error pembacaan sensor di bawah 1,5%, sehingga layak digunakan untuk aplikasi pemantauan lingkungan indoor.
3. Visualisasi data melalui dashboard ThingsBoard Cloud memudahkan pengguna dalam menganalisis kondisi termal ruang kelas Tower 3 ITS secara informatif dan efisien.
4. Sistem ini dapat dijadikan dasar pengembangan menuju konsep *smart campus* yang mendukung pengelolaan kenyamanan lingkungan belajar secara digital dan terintegrasi.

5.2. Saran

Untuk pengembangan sistem di masa mendatang, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan:

1. Menambahkan fungsi kontrol otomatis (closed-loop system) agar sistem tidak hanya melakukan monitoring tetapi juga pengendalian suhu dan kelembapan secara mandiri.
2. Meningkatkan keamanan komunikasi data MQTT dengan penerapan protokol SSL/TLS guna mencegah serangan siber pada jaringan IoT.
3. Mengintegrasikan sistem dengan analisis berbasis AI atau *machine learning* untuk prediksi dan optimasi kenyamanan termal di ruang kelas.
4. Melakukan pengujian pada lebih banyak ruang kelas dengan variasi kondisi lingkungan untuk memperoleh data yang lebih representatif.

Dengan demikian, sistem TROPHEUS telah membuktikan keberhasilannya sebagai sistem monitoring lingkungan berbasis IoT yang efektif, efisien, dan memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut dalam mendukung konsep *smart campus* di lingkungan Fakultas Vokasi ITS.