

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI MUTU *LATEKS* PORTABEL
BERBASIS *IOT* IMPLEMENTASI ALGORITMA *THRESHOLDING PH*
PADA *MICROCONTROLLER* ESP32 UNTUK *SMART MONITORING***

SKRIPSI

DISUSUN OLEH

EKA SYARIF MAULANA

2209020168



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI

FAKULTAS ILMU KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

MEDAN

2026

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI MUTU *LATEKS*
PORTABEL BERBASIS *IOT* IMPLEMENTASI *THRESHOLDING PH*
PADA *MICROCONTROLLER* ESP32 UNTUK *SMART MONITORING***

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer
(S.Kom) dalam Program Studi Teknologi Informasi. pada Fakultas Ilmu
Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara**

EKA SYARIF MAULANA

2209020168

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFROMASI
FAKULTAS ILMU KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

MEDAN

2026

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI MUTU
LATEKS
PORTABEL BERBASIS IOT IMPLEMENTASI
MENGUNAKAN THRESHOLDING PH PADA
MICROCONTROLLER ESP32 UNTUK SMART
MONITORING
Nama Mahasiswa : EKA SYARIF MAULANA
NPM : 2209020168
Program Studi : TEKNOLOGI INFORMASI

Menyetujui

Komisi Pembimbing



(Mulkan Azhari S.Kom., M.Kom)

NIDN. 0108129402

Ketua Program Studi

Dekan



(Fatma Sari Hutagalung, S.Kom, M.Kom)

NIDN. 0117019301



(Dr. Al-Khowarizmi, S.Kom., M.Kom.)

NIDN. 0127099201

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN
AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama : EKA SYARIF MAULANA
NPM : 2209020168
Program Studi : TEKNOLOGI INFORMASI
Karya Ilmiah : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Hak Bebas Royalti Non-Eksekutif (*Non-Exclusive Royalty free Right*) atas penelitian skripsi saya yang berjudul:

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI MUTU LATEKS
PORTABEL BERBASIS IOT IMPLEMENTASI ALGORITMA
THRESHOLDING PH PADA MICROCONTROLLER ESP32 UNTUK
SMART MONITORING**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksekutif ini, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara berhak menyimpan, mengalih media, memformat, mengelola dalam bentuk database, merawat dan mempublikasikan Skripsi saya ini tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemegang dan atau sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.

Medan, 10 April, 2026

Yang membuat pernyataan



EKA SYARIF MAULANA

2209020168

PERNYATAAN ORISINALITAS

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI MUTU *LATEKS*
PORTABEL BERBASIS *IOT* IMPLEMENTASI ALGORITMA
THRESHOLDING PH PADA *MICROCONTROLLER ESP32* UNTUK
*SMART MONITORING***

SKRIPSI

Saya menyatakan bahwa karya tulis ini adalah hasil karya sendiri, kecuali beberapa kutipan dan ringkasan yang masing-masing disebutkan sumbernya.

Medan, 10 April 2026

Yang membuat pernyataan

A 1000 Rupiah postage stamp is placed over the signature. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text '1000', 'METRAN', and 'INDONESIA'.

EKA SYARIF MAULANA

2209020168

RIWAYAT HIDUP

DATA PRIBADI

Nama Lengkap : EKA SYARIF MAULANA
Tempat dan Tanggal Lahir : ASAM JAWA
Alamat Rumah : Aek Raso, Kec. Torgamba, Kab. Labuhanbatu Selatan, Sumatera Utara 21464
Telepon/Faks/HP : 6282392115909
E-mail : eka.ckp16799@gmail.com
Instansi Tempat Kerja : UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATER UTARA
Alamat Kantor : Jl. Kapten Muchtar Basri No.3, Glugur Darat II, Kec. Medan Tim., Kota Medan, Sumatera Utara 20238

DATA PENDIDIKAN

SD : SD NEGRI 118299 AFD C AEK RASO TAMAT: 2016
SMP : Madrasah Tsanawiyah Raudhatussalam TAMAT: 2019
SMA : Madrasah Aliyah Raudhatussalam TAMAT: 2022

KATA PENGANTAR



Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *“Rancang Bangun Sistem Deteksi Mutu Lateks Karet Portabel Berbasis IoT implementasi Algoritma Thresholding pH pada Microcontroller ESP32 untuk Smart Monitoring”* dengan baik dan tepat waktu.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU). Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah memberikan bantuan, bimbingan, serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU).
2. Bapak Assoc. Dr. Al-Khowarizmi, S.Kom., M.Kom., selaku Dekan Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi (FIKTI) UMSU. Tanpa dukungan, doa, bimbingan, serta bantuan yang diberikan, skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang berlipat ganda.

3. Ibu Dr. Firaahmi Rizky, S.Kom., M.Kom., selaku Wakil Dekan I, atas bimbingan, arahan, dan dukungan yang telah diberikan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
4. Bapak Mhd Basri, S.Si., M.Kom., selaku Wakil Dekan III, atas bimbingan, arahan, dan dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini
5. Ibu Fatma Sari Hutagalung, S.Kom., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknologi Informasi FIKTI UMSU. Setiap dukungan dan kebaikan yang diberikan sangat berarti dan menjadi kekuatan bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
6. Bapak Okvi Nugroho, S.Kom., M.Kom., selaku Sekretaris Program Studi Teknologi Informasi FIKTI UMSU, atas segala arahan dan dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.
7. Bapak Mulkan Azhari, S.Kom., M.Kom., selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi selama proses penyusunan skripsi ini hingga selesai.
8. Kedua orang tua tercinta, terima kasih atas doa, kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang tiada henti. Berkat restu dan kesabaran Ayah dan Ibu, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Pencapaian ini penulis persembahkan sebagai bentuk terima kasih dan bakti sebagai seorang sarjana.

9. Semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, baik dari segi penyusunan maupun isi. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang teknologi informasi dan sistem monitoring berbasis IoT

**RANCANG BANGUN SISTEM DETEKSI MUTU LATEKS
PORTABEL BERBASIS *IOT* IMPLEMENTASI ALGORITMA
THRESHOLDING PH PADA *MICROCONTROLLER ESP32* UNTUK
*SMART MONITORING***

ABSTRAK

Penilaian mutu lateks karet di tingkat petani dan pengepul masih dilakukan secara subjektif sehingga rentan terhadap kesalahan dan praktik manipulasi. Kondisi ini menyebabkan ketidakpastian kualitas bahan olah karet (Bokar) yang berdampak pada rendahnya nilai jual dan ketidakadilan dalam transaksi. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem deteksi mutu yang objektif, portabel, dan mampu memberikan hasil secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem deteksi mutu lateks karet portabel berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan modul ADC eksternal ADS1115 beresolusi 16-bit untuk meningkatkan akurasi pembacaan sensor. Parameter utama yang digunakan adalah pH sebagai indikator kualitas biologis lateks, serta Total *Dissolved Solids* (TDS) sebagai parameter pendukung untuk mendeteksi kontaminasi dan pengenceran. Sistem juga menerapkan metode pemfilteran *digital Exponential Moving Average* (EMA) untuk mereduksi noise serta fitur *Automatic Temperature Compensation* (ATC) untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Algoritma klasifikasi mutu diterapkan menggunakan metode multibasis *thresholding* berbasis rule-based yang berjalan langsung pada ESP32 (*edge computing*). Data hasil pengukuran dikirimkan secara *real-time* menggunakan protokol MQTT dengan *Quality of Service* (QoS) level 1 ke dashboard monitoring berbasis web. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengukur nilai pH dan TDS dengan tingkat akurasi tinggi serta mampu mengklasifikasikan mutu lateks ke dalam kategori seperti mutu prima, asam, oplos air, kontaminasi, dan terawetkan amonia. Sistem ini juga menunjukkan keandalan dalam pengiriman data meskipun pada kondisi jaringan yang tidak stabil. Dengan demikian, alat yang dikembangkan dapat berfungsi sebagai solusi monitoring mutu lateks yang objektif, transparan, dan aplikatif di lapangan.

Kata Kunci: IoT; ESP32; ADS1115; pH; Thresholding;

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PORTABLE LATEX QUALITY
DETECTION SYSTEM BASED ON IOT USING A PH THRESHOLDING
ALGORITHM ON ESP32 MICROCONTROLLER FOR SMART
MONITORING**

ABSTRACT

The quality assessment of natural rubber latex at the farmer and collector level is still conducted subjectively, making it prone to errors and manipulation practices. This condition leads to uncertainty in the quality of raw rubber materials (Bokar), which affects pricing and fairness in transactions. Therefore, an objective, portable, and real-time quality detection system is required. This study aims to design and develop a portable latex quality detection system based on the Internet of Things (IoT) using the ESP32 microcontroller integrated with a 16-bit ADS1115 external ADC module to improve sensor measurement accuracy. The main parameter used is pH as an indicator of the biological stability of latex, while Total Dissolved Solids (TDS) is used as a supporting parameter to detect contamination and dilution. The system also implements the Exponential Moving Average (EMA) digital filtering method to reduce noise and Automatic Temperature Compensation (ATC) to enhance measurement accuracy. The quality classification algorithm is implemented using a rule-based multilevel thresholding method running directly on the ESP32 (edge computing). Measurement data are transmitted in real-time using the MQTT protocol with Quality of Service (QoS) level 1 to a web-based monitoring dashboard. The results show that the system is capable of measuring pH and TDS with high accuracy and classifying latex quality into categories such as prime quality, acidic, diluted, contaminated, and ammonia-preserved latex. The system also demonstrates reliable data transmission under unstable network conditions. Therefore, the developed system can function as an objective, transparent, and practical solution for latex quality monitoring in real-world applications.

Keywords: *IoT; ESP32; ADS1115; pH; Thresholding;*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	II
PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASASI KARYA ILMIAH	III
PERNYATAAN ORIENTASI	IV
RIWAYAT HIDUP	V
KATA PENGANTAR.....	VI
ABSTRAK	IX
ABSTRACT	X
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR TABEL	XV
DAFTAR GAMBAR.....	XVI
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	3
1.3 BATASAN MASALAH	4
1.4 TUJUAN PENELITIAN	5
1.5 MANFAAT PENELITIAN.....	5
BAB II LANDASAN TEORI	6
2.1 TINJAUAN PUSTAKA DAN STATE OF THE ART	6
2.2 TEORI LATEKS KARET ALAM.....	8
2.2.1 Karakteristik Biokimia dan Koloid	9

2.2.2	Pengaruh pH terhadap Mutu dan Degradasi	10
2.3	SENSOR ELEKTROKIMIA	10
2.3.1	Sensor pH dan Persamaan Nernst	10
2.3.2	Sensor TDS dan Konduktivitas.....	11
2.4	SISTEM AKUISISI DATA	12
2.4.1	Peran Mikrokontroler ESP32	12
2.4.2	Keunggulan ADC Eksternal ADS1115 Beresolusi 16-bit	13
2.5	PENGOLAHAN SINYAL DAN KALIBRASI.....	14
2.5.1	Pemfilteran Digital Exponential Moving Average (EMA).....	14
2.5.2	Kalibrasi Sensor Multi-Titik	15
2.6	PROTOKOL KOMUNIKASI MQTT PADA SISTEM IOT.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		19
3.1	MODEL PENGEMBANGAN SISTEM	19
3.1.1	Konsep Model Prototipe	19
3.1.2	Tahapan Pengembangan Sistem.....	21
3.2	VARIABEL DAN PARAMETER PENELITIAN	22
3.3	ANALISIS KEBUTUHAN SISTEM	23
3.4	PERANCANGAN SISTEM (SYSTEM DESIGN)	24
3.4.1	Desain Mekanik Probe dan Ergonomi	25
3.5	PENGEMBANGAN ALGORITMA DAN FIRMWARE	26
3.5.1	Akuisisi Data dan Pemfilteran Digital EMA	26
3.5.2	Algoritma Kalibrasi Triple-Point pH	27
3.5.3	Kompensasi Suhu Otomatis (ATC) pada Sensor pH.....	28
3.5.4	Algoritma Multibasis Thresholding untuk Klasifikasi Mutu.....	29

3.5.5	Desain Komunikasi Data dan Struktur Payload MQTT	31
3.6	PROSEDUR PENGUJIAN DAN VALIDASI	33
3.6.1	Persiapan Sampel Uji dan Lingkungan.....	34
3.6.2	Prosedur Kalibrasi Sensor dan Pengambilan Data.....	34
3.6.3	Pengujian Fungsional (Black Box Testing)	35
3.7	TEKNIK ANALISIS DATA	35
3.7.1	Analisis Akurasi dan Presisi Sensor.....	36
3.7.2	Analisis Kinerja Klasifikasi (Confusion Matrix).....	36
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1	IMPLEMENTASI PERANGKAT KERAS (HARDWARE)	38
4.1.1	Perakitan Fisik dan Desain Mekanik Probe PVC T-Shape.....	38
4.1.2	Integrasi Sistem Akuisisi Data: Resolusi ADS1115 16-bit vs Keterbatasan ESP32	42
4.2	IMPLEMENTASI PERANGKAT LUNAK (FIRMWARE & DASHBOARD).....	45
4.2.1	Analisis Kode Firmware dan Pemfilteran Digital EMA $\alpha = 0,15$..	45
4.2.2	Implementasi Dashboard Monitoring Next.js dan Rendering Data..	48
4.3	HASIL KALIBRASI SENSOR	50
4.3.1	Validasi Ketelitian Tegangan ADS1115.....	51
4.3.2	Operasionalisasi Metode Triple-Point dalam Menghilangkan Kesalahan Drift Elektroda.....	53
4.4	HASIL PENGUJIAN FUNGSIONAL (BLACK BOX).....	55
4.5	HASIL PENGUJIAN AKURASI DAN PRESISI	57
4.6	ANALISIS KINERJA SISTEM DAN PEMBAHASAN MUTU LATEKS (KRUSIAL).....	60

4.6.1	Pembahasan Biokimiawi: Validasi Kategorisasi PRIMA, OPLOS AIR, dan BURUK (ASAM) via Analisis Korelasi pH-TDS.....	61
4.6.2	Analisis Keandalan Transmisi Telemetry Data MQTT Berbasis QoS Level 1 pada Topologi Sinyal Tidak Stabil	64
4.6.3	Rekonsiliasi Sosiologis dan Ekonomi: Transformasi Keyakinan Transaksional Institusional melalui Lensa Instrumen ADS1115.....	66
BAB V PENUTUP		69
5.1	KESIMPULAN.....	69
5.2	SARAN.....	70
DAFTAR PUSTAKA		69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Ringkasan Penelitian Terdahulu	7
Tabel 3. 1 Konfigurasi Pin dan Koneksi Sistem	24
Tabel 3. 2 Skenario Pengujian Fungsionalitas Sistem	35
Tabel 4. 1 Perbandingan Pembacaan Tegangan ADS1115 Terhadap Titik Buffer Standar.....	52
Tabel 4. 2 Laporan Hasil Evaluasi Pengujian Fungsional (Black Box Testing)...	55
Tabel 4. 3 Analisis Komparatif Akurasi Pengujian Mutu (Skenario n = 25 Ekstraksi)	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip kerja sensor pH berbasis elektroda gelas dan konversi tegangan (mV) terhadap nilai pH berdasarkan Persamaan Nernst	11
Gambar 2. 2 Perbandingan linearitas antara ADC internal ESP32 (12-bit) dan ADC eksternal ADS1115 (16-bit)	14
Gambar 2. 3 Perbandingan sinyal mentah (raw signal) dan sinyal hasil pemfilteran Exponential Moving Average (EMA) dengan $\alpha = 0,15$	15
Gambar 2. 4 Arsitektur komunikasi data berbasis protokol MQTT dengan mekanisme publish-subscribe dan QoS level 1	18
Gambar 3. 1 Diagram Alir Model Pengembangan Sistem Prototipe	20
Gambar 3. 2 Diagram Alur Tahapan Pengembangan Sistem	22
Gambar 3. 3 Desain Mekanik Probe PVC T-Shape	26
Gambar 3. 4 Diagram Alur Proses Kompensasi Suhu Otomatis (ATC)	29
Gambar 3. 5 Diagram Urutan Pengiriman Data MQTT JSON	33
Gambar 4. 1 Implementasi Fisik Prototipe Detektor Mutu Lateks Portabel Berbasis IoT	41
Gambar 4. 2 Detail Kompartemen Unit Kendali (IoT Box)	45
Gambar 4. 3 Log Debugging Serial Monitor	48
Gambar 4. 4 Antarmuka Dashboard Monitoring Real-time Berbasis Web (LatexGuard)	50
Gambar 4. 5 Detail Ujung Sensor (Distal Probe)	55
Gambar 4. 6 Grafik Validasi Akurasi pH	68

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia secara historis dikenal sebagai salah satu produsen utama karet alam (*Hevea brasiliensis*) di dunia, sehingga komoditas ini memiliki peran strategis dalam kontribusi devisa negara non-migas. Berdasarkan data statistik perkebunan, sekitar 85% produksi karet nasional berasal dari perkebunan rakyat yang umumnya masih dikelola secara tradisional. Meskipun berperan penting dalam rantai pasok global, petani karet rakyat sering berada pada posisi tawar yang lemah dan terdampak fluktuasi harga yang tinggi. Salah satu penyebab utama rendahnya pendapatan di tingkat farm gate adalah ketidakpastian mutu bahan olah karet (Bokar), sehingga harga beli di tingkat petani menjadi tidak stabil dan cenderung tertekan. Kondisi tersebut membuat pabrik pengolahan karet remah (*crumb rubber*) menerapkan potongan harga atau penyesuaian harga beli sebagai bentuk mitigasi risiko terhadap bahan baku dengan kualitas yang tidak konsisten. (Seli et al., 2021)

Permasalahan mutu ini diperparah oleh metode penilaian kualitas yang masih sangat konvensional di tingkat pengepul lokal. Transaksi umumnya didasarkan pada penilaian subjektif secara visual (*organoleptik*) dengan melihat warna, mencium aroma, dan meraba tekstur lateks, yang sangat rentan terhadap human error dan manipulasi. Ketiadaan instrumen ukur yang objektif dan portabel di lapangan membuka celah bagi praktik kecurangan (*fraud*) yang merugikan industri hilir. Praktik yang umum terjadi meliputi penggunaan bahan koagulan (pembeku) yang tidak sesuai standar SNI 06-2047-2002, seperti penggunaan asam

sulfat (air aki) atau pupuk TSP yang murah namun merusak struktur polimer karet. Selain itu, kontaminasi fisik berupa penambahan air atau pemberat untuk memanipulasi berat timbangan juga kerap terjadi, yang pada akhirnya mengikis kepercayaan antara industri dan petani.(Bukit & Syarifa, 2023)

Secara tinjauan biokimia, lateks segar merupakan sistem koloid biologis yang kompleks dan sangat sensitif. Kestabilannya dipengaruhi kuat oleh nilai derajat keasaman (pH). Lateks segar umumnya memiliki pH mendekati netral (6,5–7,0), sementara penurunan pH di bawah 6,0 merupakan indikator dini aktivitas mikroorganisme yang memicu pra-koagulasi dan penurunan mutu. Parameter pendukung seperti Total *Dissolved Solids* (TDS) juga berperan penting untuk memantau indikasi pengenceran atau kontaminasi ionik asing. Namun, instrumentasi laboratorium untuk mengukur parameter tersebut umumnya mahal, tidak portabel, serta sulit dioperasikan di lingkungan perkebunan yang minim infrastruktur.(Achmad et al., 2023)

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) berbasis mikrokontroler ESP32 menawarkan solusi dalam pengembangan perangkat cerdas berbiaya rendah dengan konektivitas nirkabel yang terintegrasi. Akan tetapi, penerapan ESP32 untuk instrumentasi presisi menghadapi kendala pada keterbatasan *Analog-to-Digital Converter* (ADC) internal yang memiliki karakteristik non-linearitas serta tingkat noise yang relatif tinggi. Kondisi ini menyebabkan pembacaan sinyal analog dari sensor menjadi kurang akurat, terutama pada rentang tegangan rendah dan tinggi, sehingga berpotensi menurunkan validitas data pengukuran.(Julianugraha et al., 2025)

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengadopsi pendekatan berbasis perangkat keras dengan mengintegrasikan modul ADC eksternal ADS1115 sebagai sistem akuisisi data utama. ADS1115 merupakan ADC beresolusi 16-bit yang mampu mengubah sinyal analog dari sensor pH dan TDS menjadi data digital dengan tingkat presisi tinggi hingga skala milivolt. Penggunaan ADC eksternal ini memungkinkan peningkatan linearitas, stabilitas, serta akurasi pembacaan dibandingkan ADC internal ESP32, sehingga data yang dihasilkan lebih reliabel untuk digunakan dalam analisis mutu secara kuantitatif di lapangan. (Rohman et al., 2021)

Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini mengusulkan rancang bangun sistem deteksi mutu lateks portabel berbasis IoT. Sistem ini mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dengan modul ADC ADS1115 untuk akuisisi data sensor yang presisi, serta menerapkan algoritma multibasis *thresholding* sebagai dasar pengambilan keputusan mutu secara otomatis dan real-time. Data hasil pengukuran dikirimkan melalui protokol MQTT yang efisien untuk ditampilkan pada dashboard digital sebagai bentuk transparansi informasi mutu. Kehadiran alat ini diharapkan dapat berperan sebagai “wasit digital” yang objektif untuk mendukung standarisasi mutu Bokar sesuai SNI serta membantu memperbaiki struktur harga di tingkat petani.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini berfokus pada masih tingginya subjektivitas penilaian mutu lateks di tingkat petani dan pengepul akibat belum tersedianya alat

ukur portabel yang mampu memberikan hasil kuantitatif secara cepat. Kondisi tersebut membuka peluang terjadinya kontaminasi dan praktik kecurangan yang menurunkan mutu, sementara metode pengujian konvensional mengacu SNI cenderung lambat, mahal, dan tidak praktis diterapkan sebagai verifikasi *real-time* pada titik transaksi. Selain itu, sifat lateks yang mudah mengalami penurunan mutu akibat fermentasi bakteri menuntut pemantauan pH secara cepat untuk mendukung pengambilan keputusan di lapangan, sekaligus diperlukan sistem pencatatan berbasis IoT agar data mutu dapat terdokumentasi sebagai bahan evaluasi dan pembinaan mutu secara berkelanjutan.

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian dan memastikan kelayakan teknis serta waktu penyelesaian, penulis menetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian: Lateks segar (*Hevea brasiliensis*); sampel mencakup lateks murni dan lateks dengan perlakuan asam berlebih, pengenceran air, serta kontaminasi tanah/serbuk.
2. Perangkat keras: Mikrokontroler ESP32 DevKit V1; sensor pH (elektroda gelas + modul) dan sensor konduktivitas/EC (TDS analog).
3. Algoritma: Penentuan status mutu menggunakan thresholding pH berbasis aturan (*hard-coded*) pada ESP32; metode machine learning tidak digunakan.
4. Parameter ukur: Parameter utama pH; parameter EC/TDS digunakan sebagai data pendukung, sedangkan KKK tidak diukur langsung.

5. Data dikirim via Wi-Fi menggunakan protokol MQTT ke broker, lalu ditampilkan pada dashboard web custom (*Node.js + React*) dan disimpan ke database.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Tujuan Umum:

Menghasilkan sebuah prototipe fungsional sistem deteksi mutu lateks karet portabel berbasis IoT yang mampu melakukan analisis cepat (*rapid test*) dan menyajikan data mutu secara transparan dan real-time.

2. Tujuan Khusus:

- a. Merancang dan membangun prototipe perangkat (mekanik probe dan elektronik) berbasis ESP32 dengan sensor pH.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi petani, membantu pengecekan mutu lateks secara cepat dan kuantitatif sebelum jual-beli.
2. Bagi pengepul, membuat penilaian mutu lebih konsisten dan mengurangi subjektivitas saat transaksi.
3. Bagi industri/pabrik, menyediakan data mutu awal untuk menjaga konsistensi bahan baku.
4. Bagi rantai pasok, meningkatkan transparansi karena data mutu dapat direkam dan ditelusuri melalui sistem monitoring.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka dan *State of the Art*

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam instrumentasi pertanian mengalami kemajuan signifikan, khususnya dalam digitalisasi pemantauan kualitas cairan berbasis sensor elektrokimia dan mikrokontroler.(Budhisantosa et al., 2026) Namun, sebagian besar sistem yang dikembangkan masih difokuskan pada media cair homogen seperti air atau hidroponik, sehingga belum sepenuhnya mampu menangani karakteristik kompleks cairan koloid seperti lateks karet alam.

Lateks memiliki sifat kental dan rentan mengalami penggumpalan dini yang dapat menyebabkan gangguan pada sensor, sehingga membutuhkan sistem akuisisi data dan pemrosesan sinyal yang lebih adaptif. Oleh karena itu, tinjauan pustaka ini difokuskan pada analisis metode pengolahan data, akurasi konversi sinyal analog, serta keandalan komunikasi pada sistem IoT.

Penelitian terdahulu umumnya masih mengandalkan ADC internal mikrokontroler yang memiliki keterbatasan non-linearitas, sehingga sering dikompensasi menggunakan pendekatan perangkat lunak seperti regresi polinomial.(Abrar, 2025) Namun, metode tersebut belum mampu memberikan stabilitas yang memadai untuk pengukuran elektrokimia presisi.

Berdasarkan hal tersebut, diperlukan pendekatan yang mengintegrasikan penggunaan ADC eksternal beresolusi tinggi dengan pemrosesan lokal (*edge*

computing) guna meningkatkan akurasi dan keandalan sistem. Ringkasan penelitian terdahulu yang relevan disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Ringkasan Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Metode / Hardware	Temuan
1	(Antosia, 2020)	ADS1115 & Arduino	Mengukur mV dengan akurasi tinggi
2	(Aeta et al., 2022)	ADS1115 & Arduino	Presisi konversi 16-bit
3	(Latief et al., 2025)	IoT + ADS1115	Meningkatkan akurasi sensor
4	(Soo, A et al., 2021)	Arduino monitoring	Akurasi tinggi real-time
5	(Rahman et al., 2025)	ADS1115 & sensor	Pengukuran digital stabil

Berdasarkan Tabel 2.1, dapat diketahui bahwa penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi penting dalam pengembangan sistem pengukuran dan monitoring berbasis sensor, khususnya pada aspek peningkatan akurasi dan digitalisasi data. Penggunaan ADC eksternal seperti ADS1115 terbukti mampu meningkatkan resolusi dan ketelitian pengukuran sinyal analog, terutama pada rentang tegangan rendah yang dihasilkan oleh sensor elektrokimia. Selain itu, pemanfaatan mikrokontroler ESP32 memungkinkan proses akuisisi data dilakukan secara real-time serta mendukung integrasi dengan sistem monitoring berbasis jaringan.(Budhisantosa et al., 2026)

Di sisi lain, penelitian terkait lateks menunjukkan bahwa parameter kimia seperti pH memiliki peran krusial dalam menentukan kualitas bahan, sehingga dapat dijadikan indikator utama dalam proses klasifikasi mutu. Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih mengembangkan sistem secara parsial,

baik hanya berfokus pada peningkatan perangkat keras, metode pengolahan data, maupun analisis parameter secara terpisah.

Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu mengintegrasikan aspek akurasi pengukuran, stabilitas sinyal, serta keandalan komunikasi data dalam satu sistem yang komprehensif. Penelitian ini mengusulkan sistem deteksi mutu lateks berbasis ESP32 dengan dukungan ADC eksternal ADS1115, metode *filtering Exponential Moving Average* (EMA), serta komunikasi MQTT berbasis edge computing, sehingga diharapkan mampu menghasilkan sistem monitoring yang lebih akurat, stabil, dan aplikatif untuk kondisi lapangan. (Sukowati & Rahmah, 2026)

2.2 Teori Lateks Karet Alam

Lateks karet alam merupakan bahan biologis yang memiliki karakteristik fisik dan kimia yang kompleks, sehingga memerlukan pendekatan analisis yang berbeda dibandingkan dengan cairan homogen pada umumnya. Dalam konteks sistem deteksi mutu berbasis sensor, pemahaman terhadap sifat dasar lateks menjadi aspek fundamental untuk menentukan parameter pengukuran yang tepat. Hal ini penting karena perubahan kecil pada kondisi kimia lateks dapat berdampak signifikan terhadap kestabilan dan kualitasnya. (Tadeusz Haponiuk et al., 2022)

Secara ilmiah, lateks tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi materialnya, tetapi juga oleh interaksi antarpartikel dalam sistem koloid serta dinamika proses biologis yang terjadi setelah penyadapan. Oleh karena itu, diperlukan kajian teoritis yang mencakup karakteristik biokimia, mekanisme kestabilan koloid, serta pengaruh parameter lingkungan seperti pH terhadap proses degradasi lateks.

Pemahaman terhadap aspek-aspek tersebut menjadi landasan dalam perancangan sistem deteksi mutu yang akurat dan adaptif. Dalam penelitian ini, parameter pH dipilih sebagai indikator utama karena memiliki hubungan langsung dengan kestabilan sistem koloid dan proses degradasi biologis lateks. Dengan demikian, pembahasan pada subbab berikut akan menguraikan secara rinci karakteristik biokimia dan pengaruh pH terhadap mutu lateks sebagai dasar pengembangan sistem monitoring yang diusulkan.(Zhao et al., 2025)

2.2.1 Karakteristik Biokimia dan Koloid

Lateks karet alam (*Hevea brasiliensis*) merupakan sistem koloid biologis yang terdiri atas partikel polimer karet yang terdispersi dalam medium cair berupa serum. Komposisi lateks tidak homogen, melainkan mengandung fraksi partikel karet, air, protein, lipid, serta senyawa anorganik yang membentuk sistem kompleks dan dinamis. Keberadaan partikel karet dalam bentuk dispersi stabil menjadikan lateks sangat sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan kimia maupun fisika.(Wei et al., 2022)

Stabilitas sistem koloid lateks dipengaruhi oleh muatan listrik pada permukaan partikel yang berasal dari lapisan protein dan fosfolipid. Muatan tersebut menghasilkan gaya tolak-menolak elektrostatis antarpartikel sehingga mencegah terjadinya penggumpalan. Namun, keseimbangan ini bersifat rentan terhadap perubahan kondisi kimia, khususnya konsentrasi ion hidrogen dalam larutan. Oleh karena itu, parameter pH memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan sistem koloid dan menjadi indikator utama dalam evaluasi mutu lateks.(Payungwong et al., 2023)

2.2.2 Pengaruh pH terhadap Mutu dan Degradasi

Setelah proses penyadapan, lateks secara alami mengalami perubahan kualitas akibat aktivitas mikroorganisme yang memanfaatkan kandungan nutrisi dalam serum. Proses metabolisme tersebut menghasilkan senyawa asam organik yang menyebabkan penurunan nilai pH secara bertahap. Penurunan pH ini menjadi indikator utama terjadinya degradasi biologis yang berdampak pada kestabilan struktur lateks.

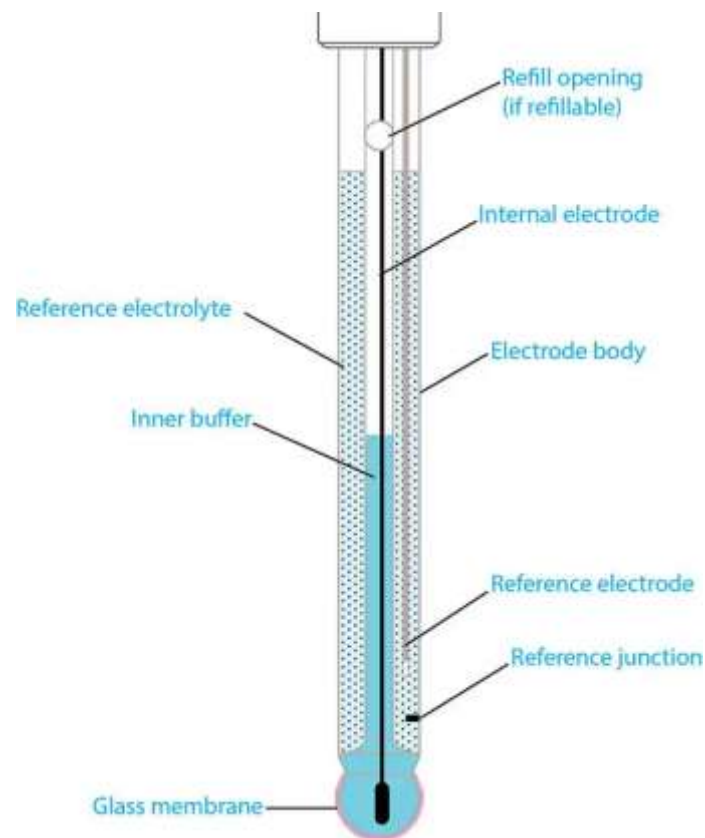
Ketika nilai pH mendekati titik isoelektrik, muatan permukaan partikel karet menjadi netral sehingga gaya tolak-menolak antarpartikel hilang. Kondisi ini menyebabkan terjadinya koagulasi spontan yang menurunkan mutu bahan secara permanen. Oleh karena itu, pengendalian pH menjadi faktor krusial dalam menjaga kualitas lateks. Dalam konteks sistem deteksi mutu, perubahan pH dapat digunakan sebagai parameter kuantitatif untuk mengidentifikasi kondisi lateks, baik yang masih stabil, mengalami degradasi, maupun terkontaminasi oleh bahan eksternal. (Walteros-León & Álvarez-Láinez, 2022)

2.3 Sensor Elektrokimia

2.3.1 Sensor pH dan Persamaan Nernst

Sensor pH merupakan perangkat elektrokimia yang digunakan untuk mengukur aktivitas ion hidrogen dalam suatu larutan. Prinsip kerjanya didasarkan pada perbedaan potensial listrik antara elektroda pengukur dan elektroda referensi yang menghasilkan tegangan sebanding dengan nilai pH. Hubungan ini mengikuti Persamaan Nernst yang menunjukkan bahwa perubahan nilai pH berbanding lurus dengan perubahan tegangan dalam skala milivolt. (Vilasó-Cadre et al., 2025)

Pada suhu standar 25°C, perubahan satu satuan pH menghasilkan perubahan tegangan sekitar -59,16 mV. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi pengukuran pH sangat bergantung pada ketelitian pembacaan tegangan. Oleh karena itu, diperlukan sistem akuisisi data yang presisi serta proses kalibrasi yang tepat agar hasil pengukuran dapat digunakan sebagai dasar analisis mutu secara andal.



Gambar 2. 1 Prinsip kerja sensor pH berbasis elektroda gelas dan konversi tegangan (mV) terhadap nilai pH berdasarkan Persamaan Nernst

2.3.2 Sensor TDS dan Konduktivitas

Sensor *Total Dissolved Solids* (TDS) digunakan untuk mengukur konsentrasi zat terlarut dalam cairan berdasarkan nilai konduktivitas listrik. Prinsip kerja sensor ini memanfaatkan kemampuan ion-ion terlarut dalam larutan untuk menghantarkan arus listrik, sehingga nilai konduktivitas berbanding lurus dengan jumlah zat terlarut yang ada.

Nilai TDS umumnya diperoleh melalui konversi empiris dari konduktivitas listrik menjadi satuan ppm (parts per million). Dalam sistem deteksi mutu lateks, parameter TDS digunakan sebagai indikator pendukung untuk mendeteksi adanya pengenceran atau kontaminasi. Perubahan nilai TDS yang signifikan dapat mengindikasikan adanya manipulasi volume atau penambahan material asing, sehingga berfungsi sebagai pelengkap dalam proses klasifikasi mutu berbasis pH.(Barroso et al., 2023)

2.4 Sistem Akuisisi Data

2.4.1 Peran Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *System-on-Chip* yang dirancang untuk aplikasi Internet of Things dengan kemampuan pemrosesan data dan komunikasi nirkabel terintegrasi. Perangkat ini memiliki prosesor dual-core 32-bit serta fitur Wi-Fi yang memungkinkan implementasi sistem monitoring secara real-time.

Dalam konteks penelitian ini, ESP32 tidak digunakan secara langsung untuk membaca sinyal analog dari sensor, melainkan berperan sebagai pusat pengendali sistem (controller). Fungsi utama ESP32 meliputi pengolahan data hasil pembacaan sensor, penerapan algoritma klasifikasi mutu, serta pengiriman data ke sistem monitoring berbasis IoT.

Proses akuisisi data analog dari sensor pH dan TDS dilakukan menggunakan modul ADC eksternal ADS1115, sehingga keterbatasan ADC internal ESP32 tidak mempengaruhi kualitas pengukuran. Dengan pembagian fungsi ini, ESP32 dapat bekerja lebih optimal dalam pemrosesan dan komunikasi

data tanpa terbebani oleh keterbatasan akuisisi sinyal analog.(Salehipour et al., 2024)

2.4.2 Keunggulan ADC Eksternal ADS1115 Beresolusi 16-bit

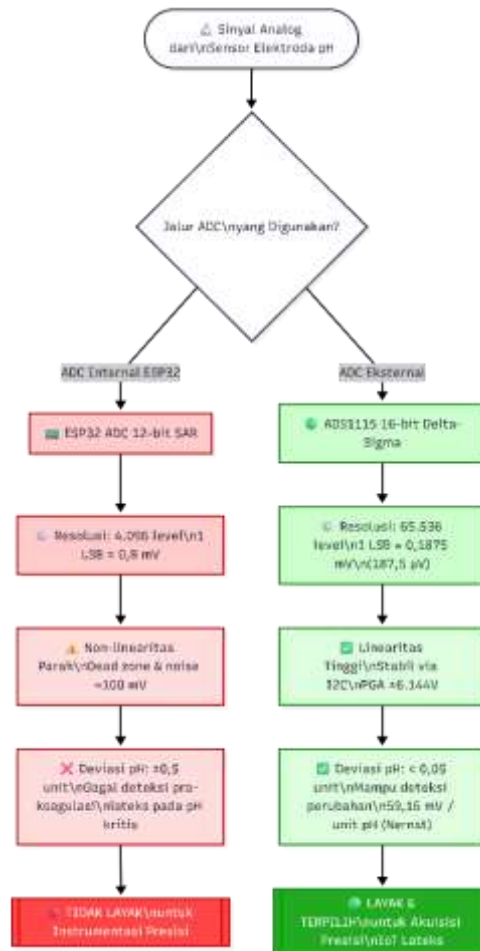
Dalam sistem instrumentasi berbasis mikrokontroler, kualitas pembacaan sinyal analog sangat dipengaruhi oleh karakteristik *Analog-to-Digital Converter* (ADC) yang digunakan. ADC internal pada ESP32 diketahui memiliki keterbatasan pada aspek linearitas dan stabilitas pembacaan, terutama pada rentang tegangan rendah yang umum dihasilkan oleh sensor elektrokimia. Kondisi ini berpotensi menyebabkan deviasi pengukuran dan menurunkan validitas data apabila tidak ditangani dengan pendekatan yang tepat.(Espinosa-Gavira et al., 2024)

Berbagai penelitian sebelumnya mengatasi keterbatasan tersebut menggunakan metode kalibrasi berbasis perangkat lunak, seperti regresi polinomial. Namun, pendekatan tersebut masih memiliki keterbatasan karena tidak sepenuhnya mampu mengatasi noise dan fluktuasi sinyal yang berasal dari karakteristik perangkat keras.

Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi pendekatan berbasis perangkat keras dengan menggunakan ADC eksternal ADS1115 sebagai sistem akuisisi data utama. ADS1115 memiliki resolusi 16-bit yang mampu membaca perubahan tegangan dalam skala milivolt dengan tingkat presisi dan linearitas yang tinggi. Selain itu, komunikasi berbasis I2C memungkinkan integrasi yang stabil dengan ESP32 tanpa menambah kompleksitas sistem.

Dengan penggunaan ADS1115, proses akuisisi data dari sensor pH dan TDS dapat dilakukan secara lebih akurat, stabil, dan konsisten. Pendekatan ini

memungkinkan sistem menghasilkan data pengukuran yang lebih reliabel untuk mendukung analisis mutu lateks secara objektif dan real-time di lapangan.



Gambar 2. 2 Perbandingan linearitas antara ADC internal ESP32 (12-bit) dan ADC eksternal ADS1115 (16-bit)

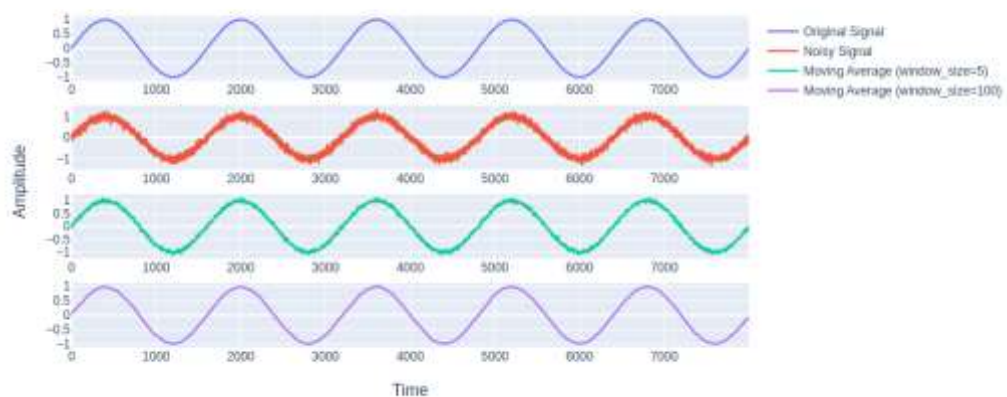
2.5 Pengolahan Sinyal dan Kalibrasi

2.5.1 Pemfilteran Digital *Exponential Moving Average* (EMA)

Data hasil pembacaan sensor elektrokimia cenderung mengalami fluktuasi akibat gangguan lingkungan dan karakteristik sensor. Untuk meningkatkan kestabilan data, digunakan metode pemfilteran digital *Exponential Moving*

Average (EMA). Metode ini bekerja dengan memberikan bobot lebih besar pada data terbaru sehingga mampu mereduksi noise tanpa menghilangkan respons dinamis sistem.

Keunggulan EMA terletak pada efisiensi komputasi serta kemampuannya menghasilkan data yang lebih halus dibandingkan metode rata-rata sederhana. Dalam penelitian ini, EMA digunakan untuk memastikan bahwa nilai pH dan TDS yang diproses oleh sistem memiliki kestabilan yang memadai sebelum dilakukan proses klasifikasi mutu.(Pereira et al., 2024)



Gambar 2. 3 Perbandingan sinyal mentah (raw signal) dan sinyal hasil pemfilteran Exponential Moving Average (EMA) dengan $\alpha = 0,15$

2.5.2 Kalibrasi Sensor Multi-Titik

Karakteristik sensor gelas kimia mengalami penyusutan performa secara bertahap seiring dengan lamanya waktu pemakaian dan intensitas paparan terhadap zat organik.(Almakhlifi et al., 2025) Degradasi komponen ini memanifestasikan dirinya dalam bentuk pergeseran titik nol asimetris (offset drift) dan pelemahan sensitivitas kemiringan (slope loss) dari standar Nernst. Untuk menjamin akurasi

absolut pada alat portabel yang digunakan di lapangan, sistem pengukuran harus dikalibrasi secara berkala secara matematis pada tingkat perangkat lunak.

Penerapan ADS1115 mengubah orientasi kalibrasi dari sekadar memperbaiki kerusakan konverter ESP32 menjadi pemetaan murni karakteristik elektroda pH itu sendiri. Oleh karena itu, prosedur kalibrasi yang diterapkan tidak lagi menggunakan kurva tebakan, melainkan menggunakan metode Kalibrasi Multi-Titik (*Multi-Point Calibration*). Metode ini melibatkan penyerapan data tegangan dari elektroda yang dicelupkan secara berurutan ke dalam tiga jenis larutan penyangga (*buffer solution*) bersertifikat.(Almakhli et al., 2025)

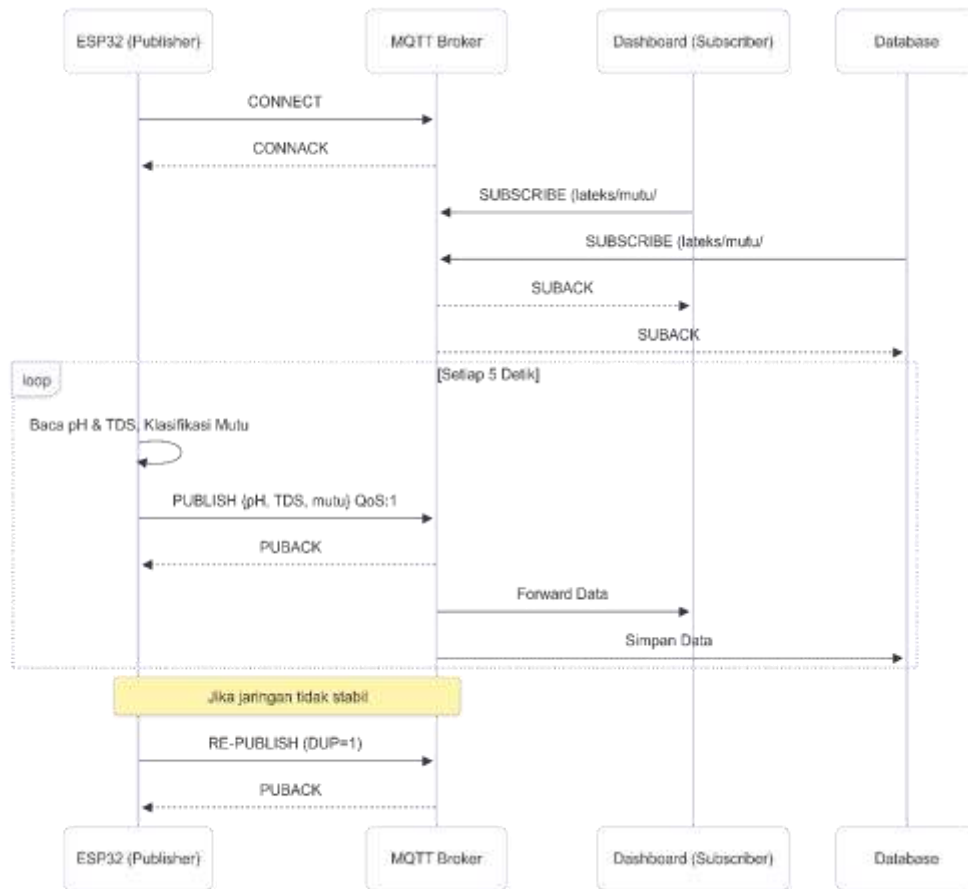
Larutan penyangga yang digunakan secara spesifik memiliki standar nilai pH 4,01, pH 6,86, dan pH 9,18. Pemilihan ketiga titik referensi ini didasari oleh profil keasaman lateks yang diukur; degradasi lateks sangat asam dapat mencapai pH di bawah 5,0, sementara lateks yang diberi zat pengawet buatan bisa memiliki pH di atas 9,0. Jika sensor hanya dikalibrasi di satu titik tengah (misalnya pH 7,00), deviasi kesalahan *slope* akan melebar secara eksponensial ketika sistem mengukur sampel yang bersifat asam kuat atau basa tinggi.

Data tegangan dari ADS1115 yang terekam pada kalibrasi pH 4,01 dan 6,86 dikalkulasi untuk membentuk nilai kemiringan khusus bagi pengukuran wilayah asam (*acidic slope*). Sebaliknya, data yang didapatkan antara rentang pH 6,86 dan 9,18 digunakan untuk menghitung kemiringan terpisah pada wilayah basa (*alkaline slope*). Kombinasi kalibrasi dari tiga spektrum ekstrem ini memastikan konversi matematika di mikrokontroler memiliki akurasi resolusi tinggi dan bebas dari penyimpangan pada seluruh rentang ukur.(Almakhli et al., 2025)

2.6 Protokol Komunikasi MQTT pada Sistem IoT

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) merupakan protokol komunikasi ringan yang dirancang untuk aplikasi Internet of Things dengan keterbatasan bandwidth dan sumber daya perangkat. Protokol ini menggunakan arsitektur publish-subscribe yang memungkinkan pengiriman data secara efisien dan terstruktur tanpa memerlukan koneksi berulang.

Dalam sistem monitoring, MQTT digunakan untuk mentransmisikan data hasil pengukuran dari perangkat ke server secara real-time. Penerapan *Quality of Service* (QoS) level 1 memungkinkan data tetap terkirim meskipun terjadi gangguan jaringan, sehingga meningkatkan keandalan sistem. Dengan demikian, penggunaan MQTT mendukung kebutuhan monitoring yang efisien, stabil, dan sesuai dengan kondisi lingkungan perkebunan. (Saha et al., 2024)



Gambar 2. 4 Arsitektur komunikasi data berbasis protokol MQTT dengan mekanisme publish-subscribe dan QoS level 1

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Model Pengembangan Sistem

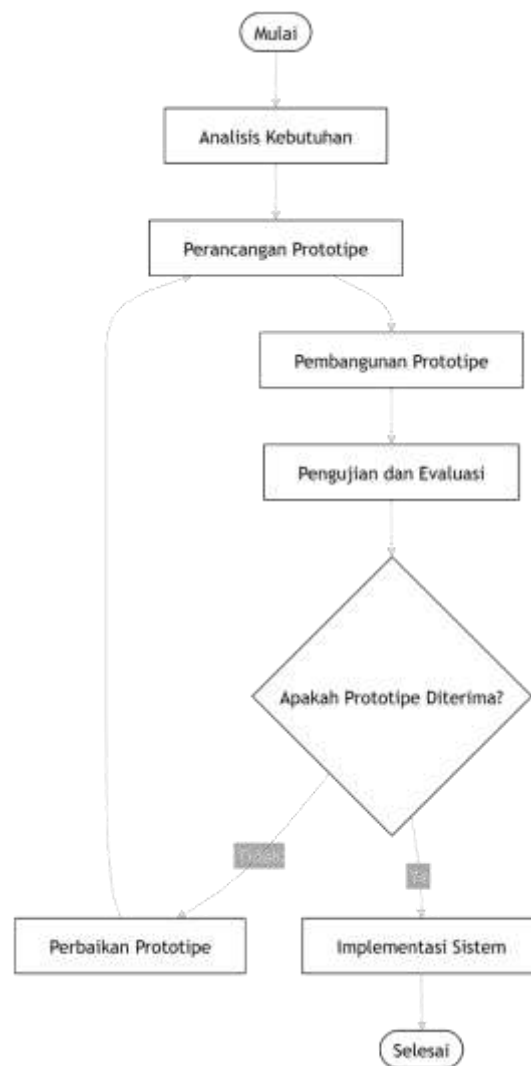
3.1.1 Konsep Model Prototipe

Penelitian ini mengadopsi model pengembangan sistem prototipe (prototyping model) sebagai pendekatan utama dalam perancangan sistem deteksi mutu lateks portabel berbasis IoT. Model ini dipilih karena memiliki sifat iteratif yang memungkinkan proses evaluasi dan penyempurnaan dilakukan secara berulang, sehingga sistem yang dikembangkan dapat disesuaikan secara bertahap terhadap kondisi nyata di lapangan. Pendekatan ini dinilai lebih efektif dibandingkan model linier, mengingat karakteristik lateks yang bersifat tidak homogen, kental, serta sangat sensitif terhadap perubahan kondisi kimia lingkungan.

Pemilihan model prototipe juga didasarkan pada kebutuhan teknis untuk mengintegrasikan komponen elektronik presisi dengan sampel biologis yang kompleks. Dalam konteks ini, sistem tidak hanya dituntut mampu bekerja secara fungsional, tetapi juga harus menghasilkan data yang akurat dan stabil pada kondisi operasional yang dinamis. Oleh karena itu, pendekatan iteratif memungkinkan proses pengujian langsung terhadap interaksi antara sensor, sistem akuisisi data, dan karakteristik lateks.

Selain itu, model ini mendukung proses validasi bertahap terhadap performa sistem, khususnya dalam memastikan akurasi pembacaan sensor pH dan TDS yang menjadi parameter utama dalam penentuan mutu lateks. Dengan demikian,

penggunaan model prototipe dalam penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan sistem yang tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga memiliki tingkat keandalan yang tinggi dalam kondisi penggunaan nyata.(Espinosa-Gavira et al., 2024)



Gambar 3. 1 Diagram Alir Model Pengembangan Sistem Prototipe

3.1.2 Tahapan Pengembangan Sistem

Proses pengembangan sistem dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang bersifat siklikal, dimulai dari analisis kebutuhan hingga tahap penyempurnaan sistem. Pada tahap analisis kebutuhan, dilakukan identifikasi parameter mutu utama seperti pH dan TDS, serta penentuan spesifikasi teknis sistem berdasarkan standar yang relevan, seperti SNI 06-2047-2002. Tahap ini menghasilkan dokumen spesifikasi yang menjadi acuan dalam pengembangan sistem.

Tahap selanjutnya adalah perancangan sistem, yang meliputi pembuatan diagram blok, perancangan skema elektronika berbasis komunikasi I2C dengan modul ADC ADS1115, serta desain mekanik probe yang ergonomis untuk penggunaan di lapangan. Perancangan ini juga mencakup pemetaan pin pada mikrokontroler ESP32 dan integrasi sensor pH, TDS, serta sensor suhu DS18B20.

Setelah proses perancangan, dilakukan pembangunan prototipe dengan merealisasikan desain menjadi perangkat keras fungsional. Pada tahap ini, seluruh komponen dirakit dan dikonfigurasi melalui pemrograman firmware menggunakan Arduino IDE, termasuk implementasi metode pemfilteran *Exponential Moving Average* (EMA) dan sistem komunikasi berbasis MQTT.

Tahap pengujian dan evaluasi dilakukan untuk mengukur performa sistem, khususnya pada aspek akurasi pembacaan sensor dan kestabilan data. Proses ini melibatkan kalibrasi sensor pH menggunakan metode triple-point serta pengujian menggunakan sampel larutan standar dan lateks nyata. Data hasil pengujian

digunakan untuk mengevaluasi kinerja algoritma klasifikasi mutu serta keandalan sistem komunikasi.

Tahap terakhir adalah penyempurnaan sistem, yang dilakukan berdasarkan hasil evaluasi sebelumnya. Pada tahap ini dilakukan optimalisasi parameter EMA, peningkatan stabilitas koneksi MQTT dengan QoS level 1, serta perbaikan pada aspek perangkat keras dan perangkat lunak. Pendekatan iteratif ini juga berfungsi sebagai mitigasi terhadap potensi gangguan seperti fouling pada sensor pH, sehingga sistem yang dihasilkan memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, tahapan pengembangan ini memungkinkan sistem yang dihasilkan telah melalui proses validasi teknis yang komprehensif, sehingga mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat, stabil, dan sesuai dengan kebutuhan implementasi di lapangan.



Gambar 3. 2 Diagram Alur Tahapan Pengembangan Sistem

3.2 Variabel dan Parameter Penelitian

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem instrumentasi berbasis sensor, sehingga parameter yang digunakan didefinisikan sebagai variabel yang mempengaruhi kinerja sistem dalam mendeteksi mutu lateks secara objektif. Pengujian dilakukan menggunakan sampel terkontrol untuk memastikan konsistensi hasil tanpa dipengaruhi variabel eksternal.

Parameter utama yang digunakan adalah nilai pH sebagai indikator utama mutu lateks. Selain itu, parameter TDS digunakan sebagai indikator pendukung untuk mendeteksi kemungkinan pengenceran atau kontaminasi. Suhu cairan juga diukur untuk melakukan kompensasi otomatis terhadap pembacaan pH.

Parameter sistem meliputi penggunaan ADC eksternal ADS1115 untuk meningkatkan akurasi akuisisi data, metode *Exponential Moving Average* (EMA) untuk pemfilteran sinyal, serta komunikasi MQTT untuk transmisi data.

3.3 Analisis Kebutuhan Sistem

Analisis kebutuhan sistem dilakukan untuk menentukan spesifikasi teknis perangkat yang digunakan dalam proses pengukuran mutu lateks. Sistem dirancang menggunakan pendekatan akuisisi data presisi tinggi dengan memanfaatkan ADC eksternal ADS1115 untuk menggantikan ADC internal ESP32.

Komponen / Modul	Pin Modul	Pin ESP32 / ADS1115	Keterangan Koneksi
ESP32 DevKit V1	Vin / GND	Adaptor 9V	Sumber daya utama sistem.
ADS1115 (ADC)	VDD / GND	3.3V / GND	Jalur daya modul ADC eksternal.
ADS1115 (I2C)	SDA / SCL	GPIO 21 / GPIO 22	Jalur komunikasi data I2C.
ADS1115 (ADDR)	ADDR	GND	Konfigurasi alamat I2C 0x48.
Sensor pH	Signal (Po)	ADS1115 Kanal A2	Input analog sensor pH.
Sensor TDS	Signal (Out)	ADS1115 Kanal A3	Input analog sensor TDS.
Sensor Suhu DS18B20	Data	GPIO 4	Jalur <i>OneWire</i> (Resistor <i>Pull-up</i> 4.7k).
Layar OLED 0.96"	SDA / SCL	GPIO 21 / GPIO 22	Antarmuka I2C (Paralel dengan ADS).
Push Button	Pin 1 / 2	GPIO 13 / GND	Kontrol sistem berbasis <i>Interrupt</i> .

Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan dukungan pustaka komunikasi MQTT dan pembacaan sensor. Sistem juga mengimplementasikan algoritma pemfilteran EMA untuk meningkatkan stabilitas

3.4 Perancangan Sistem (System Design)

Sistem dirancang menggunakan pendekatan *edge computing*, di mana seluruh proses akuisisi data, pemfilteran, dan klasifikasi dilakukan langsung pada mikrokontroler ESP32. Data sensor dibaca melalui ADC eksternal ADS1115, kemudian diproses menggunakan filter EMA sebelum diklasifikasikan berdasarkan nilai ambang.

Tabel 3. 1 Konfigurasi Pin dan Koneksi Sistem

Pin ESP32	Komponen	Mode	Fungsi
GPIO 21	ADS1115 SDA	I2C Data	Transmisi data ADC
GPIO 22	ADS1115 SCL	I2C Clock	Sinkronisasi komunikasi
GPIO 4	DS18B20	1-Wire	Pembacaan suhu (ATC)
GPIO 13	Push Button	Interrupt	Kontrol sistem
ADS1115 A2	Sensor pH	Analog Input	Pembacaan tegangan pH
ADS1115 A3	Sensor TDS	Analog Input	Pembacaan konduktivitas

Konfigurasi ini sesuai dengan implementasi firmware pada sistem, di mana komunikasi I2C diinisialisasi menggunakan pin GPIO 21 dan 22, serta pembacaan sensor dilakukan secara *single-ended* pada kanal ADS1115.

Penguatan (*gain*) pada ADS1115 diatur melalui perangkat lunak untuk menyesuaikan rentang tegangan keluaran sensor, sehingga perubahan kecil pada sinyal dapat dideteksi dengan lebih akurat. Selain itu, penggunaan tombol berbasis

interrupt memungkinkan sistem bekerja secara efisien tanpa harus melakukan pembacaan sensor secara terus-menerus.

3.4.1 Desain Mekanik Probe dan Ergonomi

Perangkat dirancang dalam bentuk probe portabel yang terdiri dari dua bagian utama, yaitu unit kendali dan batang sensor. Batang sensor memiliki panjang kurang lebih satu meter dan berfungsi untuk menjangkau cairan lateks di dalam wadah tanpa mengganggu kenyamanan pengguna.

Pada bagian ujung probe, sensor pH, sensor TDS, dan sensor suhu ditempatkan secara berdekatan untuk memastikan bahwa seluruh parameter diukur dari sampel yang sama. Hal ini penting untuk menjaga konsistensi data yang diperoleh dari sistem.

Unit kendali ditempatkan pada bagian atas dan berisi mikrokontroler ESP32, modul ADC ADS1115, serta komponen pendukung lainnya. Sistem menggunakan adaptor DC 9V sebagai sumber daya utama untuk menjaga kestabilan tegangan selama proses pengukuran.

Desain mekanik juga mempertimbangkan faktor perlindungan terhadap lingkungan, di mana kabel dan sambungan sensor dilapisi dengan pelindung tahan air guna menghindari kerusakan akibat kontak langsung dengan cairan lateks. Dengan desain ini, sistem diharapkan mampu digunakan secara praktis dan aman dalam kondisi operasional nyata.



Gambar 3. 3 Desain Mekanik Probe PVC T-Shape

3.5 Pengembangan Algoritma dan Firmware

Firmware dikembangkan dengan fokus pada akurasi metrologi dan efisiensi transmisi data, mengintegrasikan pemrosesan sinyal digital dengan logika klasifikasi yang cerdas

3.5.1 Akuisisi Data dan Pemfilteran Digital EMA

Siklus kerja firmware dimulai dengan pengambilan sampel data analog dari ADS1115 melalui bus I2C. Setiap pembacaan dilakukan dalam mode single-ended pada kanal A2 dan A3. Mengingat kondisi lapangan yang penuh dengan gangguan kelistrikan, data mentah tidak langsung digunakan untuk kalkulasi, melainkan diproses menggunakan algoritma Exponential Moving Average (EMA). Implementasi EMA dilakukan dengan menetapkan faktor bobot $\alpha = 0,15$, yang dipilih untuk memberikan keseimbangan optimal antara penghalusan data

(smoothing) dan kecepatan respon terhadap perubahan mendadak pada kondisi cairan. Persamaan EMA yang dijalankan pada setiap iterasi pembacaan ADC adalah:

$$EMA_{current} = (Value_{raw} \cdot 0,15) + (EMA_{previous} \cdot 0,85) \quad 3.1$$

Proses ini secara efektif menekan lonjakan data (*spikes*) dan derau frekuensi tinggi yang sering muncul pada sensor pH dan TDS, menghasilkan kurva data yang stabil dan lebih mewakili kondisi kimiawi lateks yang sebenarnya. Hasil dari filter EMA ini kemudian diteruskan ke tahap kalibrasi dan klasifikasi.

3.5.2 Algoritma Kalibrasi Triple-Point pH

Untuk mencapai tingkat akurasi tinggi pada perangkat portabel, sistem ini menerapkan metode kalibrasi multi-titik (*triple-point calibration*) menggunakan larutan buffer standar dengan nilai pH 4,01, 6,86, dan 9,18. Pendekatan ini dipilih karena mampu merepresentasikan kondisi asam, netral, dan basa yang sesuai dengan karakteristik variasi mutu lateks di lapangan.

Dalam penelitian ini, proses pembacaan tegangan dilakukan menggunakan modul ADC eksternal ADS1115 yang memiliki resolusi 16-bit dan tingkat linearitas tinggi. Dengan penggunaan ADS1115, sinyal analog dari sensor pH dapat dikonversi menjadi data digital secara presisi tanpa terpengaruh oleh keterbatasan ADC internal pada ESP32.

Algoritma kalibrasi pada sistem memetakan hubungan antara tegangan keluaran sensor yang dibaca oleh ADS1115 terhadap nilai pH menggunakan pendekatan piecewise linear. Kurva kalibrasi dibagi menjadi dua segmen utama, yaitu:

Segmen Asam (pH 4,01 – 6,86), yang digunakan untuk menghitung sensitivitas (slope) dan offset pada kondisi larutan bersifat asam.

Segmen Basa (pH 6,86 – 9,18), yang digunakan untuk memastikan akurasi pengukuran pada kondisi larutan bersifat basa, seperti pada lateks yang diawetkan dengan amonia.

Setiap segmen memiliki nilai kemiringan (slope) yang dihitung berdasarkan prinsip Persamaan Nernst, di mana perubahan 1 unit pH secara ideal menghasilkan perubahan tegangan sekitar $-59,16$ mV pada suhu 25°C . Dengan pendekatan ini, sistem mampu melakukan konversi tegangan ke nilai pH secara lebih akurat pada seluruh rentang pengukuran.

Parameter kalibrasi yang diperoleh kemudian disimpan dalam memori non-volatil pada ESP32, sehingga nilai kalibrasi tetap tersimpan meskipun perangkat dimatikan. Pendekatan ini memastikan sistem dapat menghasilkan pembacaan pH yang stabil, konsisten, dan sesuai dengan kebutuhan pengukuran mutu lateks di lapangan tanpa memerlukan metode koreksi kompleks berbasis regresi polinomial.

3.5.3 Kompensasi Suhu Otomatis (ATC) pada Sensor pH

Akurasi pengukuran pH sangat dipengaruhi oleh suhu cairan, karena kemiringan kurva tegangan elektroda gelas berubah secara linier terhadap suhu absolut. Sistem

ini mengimplementasikan fitur *Automatic Temperature Compensation* (ATC) dengan memanfaatkan data dari sensor suhu DS18B20. Firmware menghitung nilai pH yang dikompensasi menggunakan formula berikut:

$$pH_{corrected} = pH_{measured} \cdot \left(\frac{T_{std} + 273,15}{T_{measured} + 273,15} \right) \quad 3.2$$

Di mana T_{std} adalah suhu standar kalibrasi (25°C) dan adalah $T_{measured}$ suhu cairan riil yang terbaca oleh DS18B20. Dengan penerapan ATC secara *real-time* di tingkat *edge*, kesalahan pembacaan akibat perbedaan suhu antara saat kalibrasi di pagi hari dengan saat penggunaan di siang hari yang terik dapat dieliminasi sepenuhnya.



Gambar 3. 4 Diagram Alur Proses Kompensasi Suhu Otomatis (ATC)

3.5.4 Algoritma Multibasis Thresholding untuk Klasifikasi Mutu

Algoritma klasifikasi pada sistem ini menggunakan metode *rule-based* dengan *thresholding* bertingkat (hierarkis) untuk menentukan status mutu lateks secara

cepat pada mikrokontroler ESP32. Parameter pH digunakan sebagai indikator utama integritas biologis lateks, sementara parameter TDS digunakan sebagai indikator pendukung untuk mendeteksi anomali fisik berupa pengenceran atau kontaminasi mineral.

Logika klasifikasi yang ditanamkan dalam *firmware* mengikuti pohon keputusan (*decision tree*) sebagai berikut:

1. Basis 1: Pemeriksaan Integritas Kimia (pH)

Sistem mengevaluasi nilai pH yang telah melalui proses filter EMA dan kompensasi suhu (ATC).

- Apabila $pH \leq 6,0$, sampel langsung diklasifikasikan sebagai "**BURUK (ASAM)**", menandakan adanya aktivitas bakteri yang memicu pra-koagulasi kritis.
- Apabila $pH \geq 9,0$, sampel diklasifikasikan sebagai "**AWET (AMONIA)**", mengindikasikan penggunaan bahan pengawet basa dalam kadar tinggi.
- Apabila nilai pH berada pada rentang netral ($6,1 < pH < 8,9$), sistem melanjutkan evaluasi ke Basis 2 menggunakan parameter TDS.

2. Basis 2: Pemeriksaan Integritas Fisik (TDS)

Tahap ini hanya dilakukan jika lateks dinyatakan stabil secara kimiawi pada tahap pertama.

- **OPLOS AIR:** Terdeteksi apabila nilai $TDS \leq 300$ ppm, memberikan indikasi kuat terjadinya manipulasi volume melalui pengenceran dengan air murni.
- **KONTAMINASI:** Terdeteksi apabila nilai $TDS \geq 800$ ppm, mengindikasikan adanya zat terlarut asing seperti tanah, pasir, atau pupuk pemberat.
- **PRIMA (OK):** Terdeteksi apabila nilai TDS berada pada rentang normal ($301 - 799$ ppm), yang menandakan sampel merupakan lateks segar murni sesuai standar kualitas yang diharapkan.

Seluruh hasil klasifikasi ini ditampilkan secara otomatis pada layar OLED dan dikirimkan ke *dashboard* monitoring melalui protokol MQTT untuk menjamin transparansi data bagi petani dan pengepul.

3.5.5 Desain Komunikasi Data dan Struktur Payload MQTT

Sistem ini menggunakan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) untuk mentransmisikan data hasil pemrosesan edge computing dari ESP32 ke broker untuk kemudian ditampilkan pada dashboard monitoring secara real-time. Data dikirimkan dalam format JSON (*JavaScript Object Notation*) yang bersifat ringan dan mudah diparsing oleh sistem backend berbasis Node.js.

Struktur payload JSON yang dikirimkan oleh perangkat diatur agar merepresentasikan seluruh parameter ukur dan hasil klasifikasi mutu sebagai berikut:

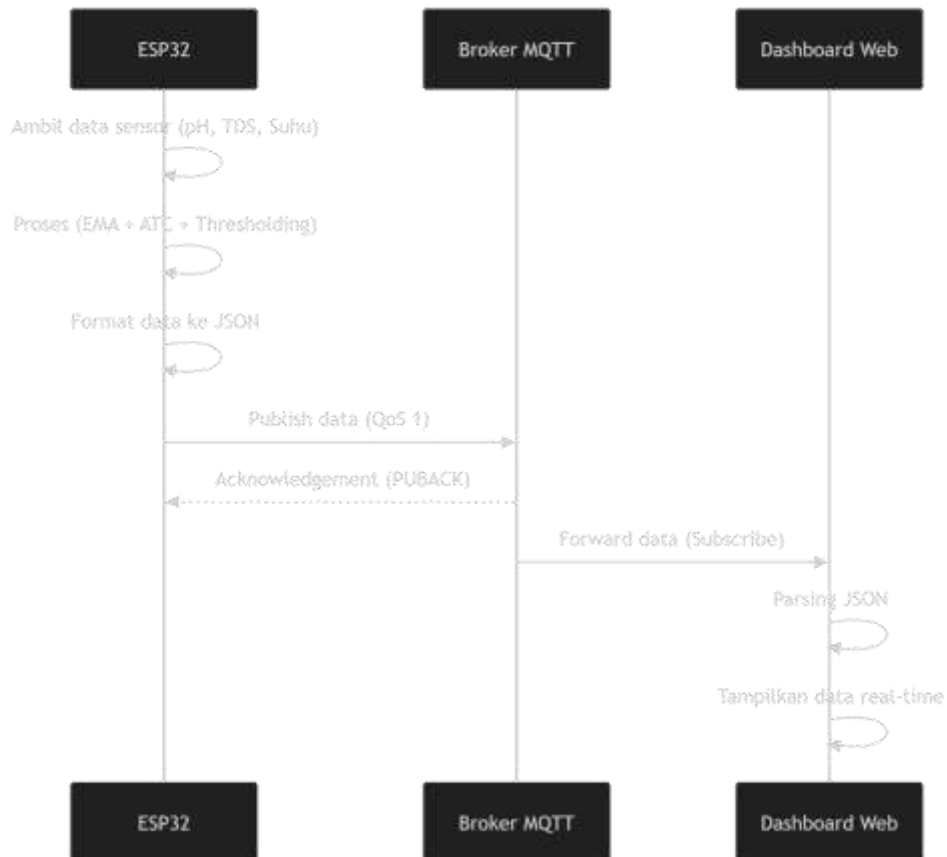
{

```
"ph": 6.86,  
  
"tds": 450,  
  
"temp": 28.5,  
  
"mutu": "PRIMA (OK)"  
  
}
```

Keterangan variabel dalam *payload* tersebut adalah sebagai berikut:

1. **ph**: Menyimpan nilai derajat keasaman lateks yang telah melalui proses filter EMA dan kompensasi suhu otomatis (ATC) dengan presisi dua angka di belakang koma.
2. **tds**: Menyimpan nilai *Total Dissolved Solids* dalam satuan ppm (*parts per million*) untuk mendeteksi integritas fisik cairan.
3. **temp**: Menyimpan data suhu cairan rill yang diperoleh dari sensor DS18B20 untuk keperluan validasi data lapangan.
4. **mutu**: Menyimpan string hasil klasifikasi algoritma *multibasis thresholding* (PRIMA (OK), BURUK (ASAM), AWET (AMONIA), OPLOS AIR, atau KONTAMINASI).

Pengiriman data dilakukan menggunakan konfigurasi *Quality of Service (QoS)* **Level 1** untuk menjamin bahwa setiap data pengukuran diterima minimal satu kali oleh broker, meskipun kondisi jaringan di lingkungan perkebunan tidak stabil. Jika koneksi terputus, sistem akan melakukan upaya pengiriman ulang otomatis (*retry*) segera setelah koneksi pulih.



Gambar 3. 5 Diagram Urutan Pengiriman Data MQTT JSON

3.6 Prosedur Pengujian dan Validasi

Fase pengujian dirancang untuk memverifikasi keandalan teknis sistem terhadap standar laboratorium dan kesiapannya untuk dioperasikan oleh pengguna akhir.

3.6.1 Persiapan Sampel Uji dan Lingkungan

Sampel uji diperoleh langsung dari perkebunan karet rakyat untuk mendapatkan variasi mutu yang realistis. Pengujian dilakukan dengan empat kategori perlakuan sampel:

1. **Lateks Kontrol:** Lateks segar murni yang baru disadap untuk memvalidasi pembacaan status "BAIK".
2. **Sampel Degradasi:** Lateks yang didiamkan selama 4, 8, dan 12 jam untuk mengamati penurunan nilai pH akibat aktivitas bakteri.
3. **Sampel Manipulasi Volume:** Lateks yang dicampur dengan air sumur dengan persentase 10%, 20%, dan 50% untuk menguji respon sensor TDS.
4. **Sampel Koagulan Ilegal:** Lateks yang diberi tetesan asam sulfat (air aki) untuk mensimulasikan praktik kecurangan yang merusak polimer karet.

3.6.2 Prosedur Kalibrasi Sensor dan Pengambilan Data

Sebelum setiap sesi pengujian dimulai, sistem wajib melalui siklus kalibrasi triple-point yang diawasi. Elektroda pH dibersihkan menggunakan air deionisasi dan dikeringkan secara hati-hati menggunakan kertas tisu bebas serat untuk menghindari goresan pada membran gelas. Data tegangan mentah dari ADS1115 pada titik pH 4,01, 6,86, dan 9,18 dicatat sebagai referensi dasar fungsionalitas ADC 16-bit. Pengambilan data dilakukan dengan mencelupkan probe ke dalam wadah sampel setidaknya selama 30-60 detik untuk memberikan waktu bagi filter EMA dan sensor suhu DS18B20 mencapai titik stabil. Setiap sampel diukur sebanyak lima kali pengulangan untuk memastikan nilai presisi dan reproduksibilitas sistem.

3.6.3 Pengujian Fungsional (Black Box Testing)

Pengujian fungsional dilakukan untuk memastikan seluruh alur kerja sistem berjalan sesuai dengan desain logika yang telah ditetapkan tanpa memperhatikan struktur kode internal

Tabel 3. 2 Skenario Pengujian Fungsionalitas Sistem

Kasus Uji	Skenario Pengoperasian	Hasil yang Diharapkan
Interrupt Button	Menekan tombol pada GPIO 13 saat sistem idle.	Sistem bangun dan memulai akuisisi data ADC.
Noise Handling	Melakukan pengukuran di dekat motor listrik atau sumber noise.	Nilai pH tetap stabil berkat filter EMA $\alpha=0.15$.
ATC Validation	Mengukur sampel yang sama pada suhu 20°C dan 35°C.	Nilai pH yang dihasilkan tetap konsisten setelah kompensasi.
QoS 1 Reliability	Memutuskan koneksi Wi-Fi sesaat setelah pengiriman data.	Data dikirim ulang otomatis saat koneksi pulih (QoS 1).
Threshold Logic	Mencelupkan probe ke lateks yang sangat asam (pH 3.0).	Dasbor dan perangkat menunjukkan status "RENDAH".

Skenario pengujian ini memastikan bahwa perangkat tidak hanya akurat secara matematis, tetapi juga tangguh secara operasional saat menghadapi tantangan fisik di lapangan perkebunan.

3.7 Teknik Analisis Data

Data hasil pengukuran yang terkumpul melalui dasbor IoT dianalisis menggunakan metode statistik formal untuk menarik kesimpulan ilmiah mengenai performa instrumen deteksi mutu lateks portabel ini.

3.7.1 Analisis Akurasi dan Presisi Sensor

Akurasi pembacaan pH dan TDS dari prototipe dibandingkan dengan nilai referensi yang diperoleh dari alat ukur standar laboratorium bersertifikat (*benchmarking*).

Analisis ini menggunakan dua metrik utama:

1. **Mean Absolute Error (MAE)**: Digunakan untuk mengukur rata-rata besaran kesalahan absolut dalam unit pH dan ppm TDS.
2. **Root Mean Square Error (RMSE)**: Digunakan untuk memberikan bobot lebih pada kesalahan yang besar, yang sangat penting untuk mendeteksi deviasi signifikan pada rentang mutu rendah.

Persentase kesalahan (*error percentage*) dihitung untuk memastikan bahwa sistem memenuhi standar toleransi industri karet, di mana deviasi pH maksimal yang diijinkan adalah $\pm 0,05$ unit pH dan deviasi TDS maksimal sebesar 5%.

3.7.2 Analisis Kinerja Klasifikasi (*Confusion Matrix*)

Efektivitas algoritma *multi-basis thresholding* dievaluasi menggunakan metode *Confusion Matrix* untuk mengukur ketepatan dalam mengklasifikasikan mutu lateks. Dari matriks ini, dihitung nilai-nilai berikut:

- **Akurasi Keseluruhan**: Persentase total klasifikasi yang benar untuk semua kategori mutu.
- **Precision**: Kemampuan sistem untuk tidak memberikan label "BAIK" pada lateks yang sebenarnya "SEDANG" atau "RENDAH" (menghindari hasil *false positive*).

- **Recall (*Sensitivity*):** Kemampuan sistem untuk mendeteksi seluruh sampel mutu "RENDAH" agar tidak masuk ke rantai pasok industri (menghindari hasil *false negative*).
- **F1-Score:** Nilai harmonik yang menyeimbangkan presisi dan daya ingat sistem sebagai representasi performa algoritma secara komprehensif.

Analisis data ini bertujuan untuk memvalidasi secara ilmiah bahwa integrasi ADC 16-bit ADS1115, filter EMA, dan algoritma *thresholding* pada ESP32 mampu menghasilkan solusi monitoring cerdas yang kredibel bagi petani dan industri karet dalam menjaga standarisasi mutu sesuai SNI 06-2047-2002

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi Perangkat Keras (Hardware)

Implementasi perangkat keras pada sistem instrumentasi cerdas ini memadukan prinsip rekayasa ergonomi untuk penggunaan lapangan dengan arsitektur elektronika presisi tinggi. Pendekatan ini diformulasikan secara khusus untuk menjawab tantangan operasional di perkebunan karet rakyat, di mana perangkat dituntut untuk memiliki durabilitas terhadap senyawa korosif sekaligus mampu memberikan tingkat presisi pengukuran berskala laboratorium.

4.1.1 Perakitan Fisik dan Desain Mekanik Probe PVC T-Shape

Kondisi operasional dalam proses pengumpulan Bahan Olah Karet (BOKAR) di tingkat farm gate (pintu kebun) menuntut perancangan instrumen yang tangguh, portabel, dan aman bagi operator. Prototipe fisik dibangun menggunakan material *polimer Polyvinyl Chloride* (PVC) berdiameter 3/4 inci dengan panjang struktural kurang lebih 1 meter. Pemilihan material PVC didasarkan pada sifat polimer termoplastik tersebut yang sangat resisten terhadap degradasi kimiawi, terutama terhadap paparan kontinu senyawa amonia sintetik (sebagai pengawet) maupun asam sulfat dan asam format (sebagai koagulan) yang secara masif mendominasi lingkungan pengolahan lateks. Konstruksi mekanik instrumen ini mengadopsi konfigurasi pegangan atas berbentuk huruf "T" (T-Shape Handle).

Desain T-Shape ini direkayasa berdasarkan prinsip biomekanika untuk memberikan titik pusat gravitasi (*center of gravity*) yang seimbang ketika pengguna

memegang alat dengan satu tangan. Keseimbangan ini secara signifikan mengurangi torsi pada pergelangan tangan, sehingga meminimalisasi kelelahan otot (*muscular fatigue*) bagi pengepul yang harus menguji puluhan hingga ratusan tong penampung lateks dalam satu siklus kerja harian. Panjang tongkat 1 meter secara spesifik diimplementasikan sebagai fitur keselamatan preventif; panjang ini meniadakan keharusan kontak fisik langsung antara kulit atau wajah operator dengan cairan lateks yang sedang diuji, menghindari risiko iritasi akibat percikan asam atau inhalasi uap amonia berlebih. Pada kompartemen T-Shape handle, tata letak komponen elektromekanik didistribusikan secara asimetris fungsional untuk memaksimalkan efisiensi interaksi manusia-komputer (*Human-Computer Interaction*).

Pada sisi kiri pegangan, disematkan sebuah saklar tekan (*interrupt button*) tipe tactile keypad yang terhubung langsung secara sirkuit ke pin GPIO 13 pada mikrokontroler ESP32. Penempatan ergonomis ini memungkinkan ibu jari kiri pengguna memicu siklus akuisisi data (pengambilan sampel) secara instan tanpa perlu memindahkan pandangan atau mengubah postur genggam tangan. Di sisi kanan pegangan, terdapat lubang port adaptor *Direct Current (DC) 9V*. Port ini dirancang dengan isolasi silikon ganda untuk mencegah masuknya embun atau cairan, berfungsi sebagai titik terminasi suplai daya eksternal melalui adaptor atau paket baterai portabel yang memastikan regulasi tegangan linear masuk ke dalam buck converter sistem.

Tepat pada titik persimpangan struktural T-Shape (bagian ekuator atas), diposisikan sebuah boks penutup IoT (*enclosure box*) berbahan polikarbonat waterproof (tahan air) dengan sertifikasi ekuivalen IP65. Boks sentral ini berfungsi

sebagai ruang komputasi yang menampung unit kendali utama, yakni mikrokontroler ESP32 DevKit V1, modul *Analog-to-Digital Converter* (ADC) eksternal ADS1115 16-bit, serta modul regulator tegangan step-down. Boks ini dirancang dengan mekanisme buka-tutup kedap udara yang menggunakan O-ring karet, memastikan kelembapan absolut dari lingkungan perkebunan tropis tidak memicu kondensasi pada papan sirkuit cetak (Printed Circuit Board/PCB). Beralih pada ujung bawah (distal) dari probe PVC, tiga sensor operasional dikelompokkan secara terpusat dalam satu selubung protektif terbuka. Ketiga sensor tersebut meliputi elektroda gelas sensor pH yang sangat sensitif, probe dua kutub untuk sensor konduktivitas

Total Dissolved Solids (TDS), serta termometer silinder baja tahan karat DS18B20. Akar dari ketiga kabel sensor ini disegel secara permanen menggunakan resin epoksi marine-grade. Penyegelan berlapis ini adalah tahap krusial untuk memastikan bahwa tidak ada tekanan hidrostatis dari cairan serum lateks kental yang mampu merembes naik ke dalam rongga pipa PVC, yang berpotensi memicu korsleting (short-circuit) fatal pada jalur sinyal.



Gambar 4. 1 Implementasi Fisik Prototipe Detektor Mutu Lateks Portabel Berbasis IoT

Gambar di atas menampilkan visualisasi prototipe fisik alat deteksi mutu lateks portabel Mas Eka yang telah dirakit sepenuhnya. Alat ini didesain dalam bentuk tongkat (*probe*) dari pipa PVC 3/4 inci dengan pegangan berbentuk "T" (T-Shape Handle) yang ergonomis. Pada bagian handle sisi kiri, terlihat jelas tombol kontrol hitam (*push button*) yang berfungsi sebagai tombol *interrupt* untuk mengaktifkan dan menonaktifkan sistem secara cepat.

Kotak transparan yang dipasang di bawah handle berfungsi sebagai kompartemen unit kendali IoT. Melalui casing transparan tersebut, terlihat integrasi mikrokontroler ESP32, modul ADC 16-bit ADS1115 (yang menjamin resolusi pembacaan voltase sensor), dan jalur komunikasi I2C yang terlindungi dari lingkungan lateks. Bagian distal (*ujung*) probe menunjukkan integrasi tiga sensor utama: sensor pH, sensor TDS, dan sensor suhu (yang memiliki casing metal), yang

disusun padat untuk pengambilan sampel simultan. Seluruh ujung sensor ini telah disegel sepenuhnya dengan *epoxy resin* berkualitas IP65 untuk menjamin fungsionalitas dan keamanan saat probe dicelupkan ke dalam lateks yang bersifat korosif.

4.1.2 Integrasi Sistem Akuisisi Data: Resolusi ADS1115 16-bit vs

Keterbatasan ESP32

Jantung dari pemrosesan logika pada instrumen deteksi ini bertumpu pada mikrokontroler ESP32 DevKit V1 yang dilengkapi prosesor dual-core 32-bit bertenaga 240 MHz. Meskipun arsitektur SoC (System-on-Chip) ESP32 memberikan kapabilitas komputasi paralel dan integrasi modul komunikasi nirkabel (WiFi) yang sangat superior, instrumen ini dihadapkan pada satu kelemahan perangkat keras bawaan yang krusial: arsitektur ADC internal ESP32 memiliki kualitas metrologi yang sangat buruk untuk pembacaan elektrokimia presisi.

Berdasarkan analisis literatur dan validasi teknis, ADC internal 12-bit pada seri ESP32 beroperasi menggunakan metode *Successive Approximation Register* (SAR) yang terbukti memiliki profil non-linearitas yang parah. ADC ESP32 diketahui mendemonstrasikan fenomena dead-zone (zona mati) pada rentang tegangan sangat rendah (di bawah 0,1V), di mana mikrokontroler tidak mampu meregistrasi perubahan tegangan sama sekali. Lebih lanjut, pada tingkat atenuasi standar, sinyal yang mendekati tegangan 3,2V mengalami kompresi kurva sehingga pembacaan berdeviasi secara drastis dengan tingkat derau (noise) fluktuatif yang dapat mencapai variasi acak hingga $\pm 6\%$ atau puluhan milivolt. Menggunakan

ADC internal untuk menerjemahkan sinyal sensor kualitas air dapat mengacaukan integritas data penelitian ilmiah.

Untuk mengeliminasi defisiensi struktural tersebut dan mencapai standar akurasi alat hingga 99,9% sesuai rujukan studi instrumentasi sebelumnya, rancang bangun sistem ini memutus jalur analog internal ESP32 dan mengalihkan seluruh tugas akuisisi sinyal kepada periferal ADC eksternal terdedikasi, yaitu ADS1115. ADS1115 adalah konverter analog-ke-digital tipe $\Delta\Sigma$ (Delta-Sigma) presisi tinggi dengan resolusi murni 16-bit.

Keunggulan matematis dari peralihan resolusi 12-bit ke 16-bit mendikte lompatan presisi yang masif. Pada ESP32 (12-bit), rentang ukur analog dipetakan menjadi $2^{12} = 4096$ level diskrit, yang pada rentang referensi 3,3V hanya mampu mendeteksi perubahan terkecil sebesar ≈ 0.8 mV. Sebaliknya, ADS1115 dengan resolusi 16-bit mengkuantisasi rentang voltase menjadi $2^{16} = 65536$ level. Dengan mengaktifkan fitur Programmable Gain Amplifier (PGA) internal pada ADS1115 pada pengaturan $\pm 6.144V$, resolusi deteksi terkecil (1 LSB - Least Significant Bit) dipertajam menjadi:

$$\text{Resolusi LSB} = \frac{2 \times 6.144 \text{ V}}{2^{16}} = \frac{12.288 \text{ V}}{65536} \approx 0.1875 \text{ mV} = 187.5 \text{ } \mu\text{V} \quad 4.1$$

Kemampuan diferensiasi pada skala 187,5 mikrovolt inilah yang merevolusi performa prototipe. Sensor elektroda gelas pH bekerja berdasarkan prinsip termodinamika Persamaan Nernst, di mana pertukaran ion hidrogen di luar dan di dalam membran kaca hanya menghasilkan perbedaan potensial listrik sebesar konstan **-59.16 mV** untuk setiap perubahan 1 unit skala pH pada ekuilibrium suhu

standar 25°C. Jika sistem menggunakan ADC ESP32 dengan margin galat *noise* yang besar, variasi bacaan tegangan dapat melompat secara tak beraturan, mengakibatkan nilai komputasi pH melenceng secara artifisial hingga ± 0.5 pH. Kesalahan pembacaan setengah digit pH dalam pengujian lateks akan berakibat pada kegagalan algoritma mendeteksi fase awal koagulasi (kerusakan), yang berujung pada kerugian finansial yang signifikan dalam transaksi rantai pasok industri.

Integrasi perangkat keras dikonfigurasi melalui topologi bus antarmuka berseri I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Modul ADS1115 dipetakan ke mikrokontroler ESP32 menggunakan Pin GPIO 21 sebagai jalur SDA (*Serial Data*) dan Pin GPIO 22 sebagai jalur SCL (*Serial Clock*). Sensor elektrokimia pH dikonfigurasi pada topologi *single-ended* dan dihubungkan ke kanal input A2 pada modul ADS1115, sementara sensor EC/TDS menduduki kanal A3. Di luar jalur I2C, sensor presisi suhu Dallas DS18B20 menggunakan topologi bus digital independen *OneWire* melalui pin GPIO 4, distabilkan oleh pemasangan resistor *pull-up* 4,7 k Ω untuk mempertahankan logika sinyal *High*.

Layar OLED berukuran 0,96 inci juga diparalelkan ke bus I2C (GPIO 21 dan 22). Bus I2C mendukung metode *daisy-chaining* banyak perangkat berkat identifikasi alamat heksadesimal yang unik. Modul ADS1115 pada sistem ini dialokasikan pada alamat 0x48 (dengan pin ADDR terhubung ke GND), sedangkan layar OLED dikendalikan melalui alamat 0x3C. Pemisahan alamat komunikasi ini memastikan mikrokontroler ESP32 dapat mengambil data jutaan mikrovolt dari ADC dan merender grafis piksel ke layar dalam sekian milidetik secara asinkron tanpa risiko tabrakan data (*data collision*).

4.2 Implementasi Perangkat Lunak (Firmware & Dashboard)

Kapasitas operasional sistem tertanam tidak hanya diukur dari mutu komponen perangkat keras, melainkan bertumpu pada arsitektur rekayasa perangkat lunak (*software engineering*) yang mengatur ritme akuisisi sinyal, orkestrasi pemrosesan di tepi (*edge computing*), hingga visualisasi basis data di komputasi awan (*cloud*). Pemisahan beban kerja komputasi antara *Firmware C++* pada ESP32 dan antarmuka pemantauan Next.js memanifestasikan desain IoT kelas industri yang berketahanan tinggi.



Gambar 4. 2 Detail Kompartemen Unit Kendali (IoT Box)

4.2.1 Analisis Kode Firmware dan Pemfilteran Digital EMA $\alpha = 0,15$

Program yang dieksekusi oleh mikrokontroler ESP32 ditugaskan untuk melakukan pembacaan register ADC ADS1115 secara kontinyu. Mengingat sifat lingkungan pengujian BOKAR, di mana cairan lateks memiliki viskositas (kekentalan) tinggi dan probe sering digerakkan atau diaduk saat pengambilan sampel, tegangan raw

(raw voltage) yang dihasilkan elektroda kerap kali diintervensi oleh turbulensi fluida dan mikrobuih gas, menciptakan lonjakan sinyal transien (spikes) sesaat.

Pendekatan konvensional umumnya mengaplikasikan metode Simple Moving Average (SMA) yang menghitung nilai rata-rata dari sekelompok urutan data berukuran tetap. Namun, SMA menuntut alokasi memori berlebih untuk penyusunan buffer array, dan sering kali menyebabkan lag yang signifikan saat merespons pergeseran nyata nilai pH cairan. Oleh sebab itu, peneliti mengadopsi fungsi persamaan pemfilteran Infinite Impulse Response (IIR) jenis Exponential Moving Average (EMA) pada firmware.

Filter EMA dipilih karena efisiensi komputasionalnya yang luar biasa, meminimalkan latensi siklus pemrosesan (CPU cycle) ESP32. EMA menyematkan nilai koefisien pelemahan konstan, memberikan bobot matematis yang secara eksponensial lebih besar kepada titik data terbaru, namun tidak sepenuhnya menghapus pengaruh data historis. Algoritma ini direpresentasikan melalui persamaan rekursif diskrit:

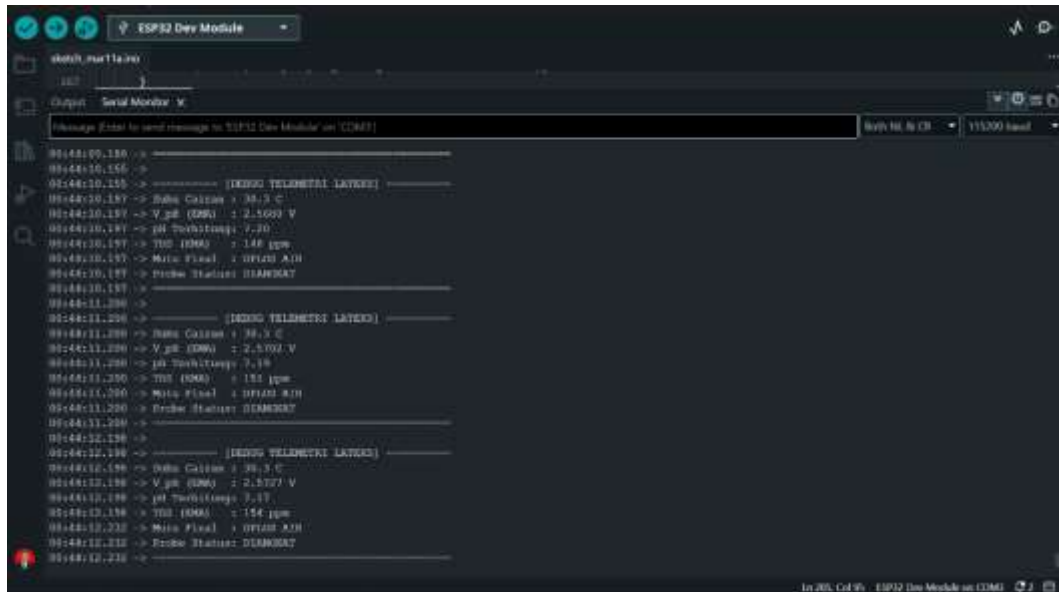
$$EMA_t = \alpha \cdot X_t + (1 - \alpha) \cdot EMA_{t-1} \quad 4.2$$

Keterangan:

- EMA_t = Nilai sinyal analog stabil saat ini setelah difilter.
- X_t = Nilai sinyal analog mentah (*raw data*) yang baru dibaca dari ADC.
- EMA_{t-1} = Nilai sinyal analog filter dari siklus pembacaan sebelumnya.
- α = Konstanta pemulusan (*smoothing factor*) dengan rentang $0 < \alpha \leq 1$.

Dalam program ini, konstanta pemulusan ditetapkan secara empiris pada nilai $\alpha = 0,15$. Keputusan arsitektur untuk memilih variabel koefisien α rendah sebesar 0,15 mengindikasikan bahwa sistem sangat memprioritaskan stabilitas. Setiap titik bacaan sensor baru hanya berkontribusi sebesar 15% terhadap keluaran data akhir, sementara 85% residu nilai dipertahankan dari momentum bacaan terdahulu.

Implementasi $\alpha = 0,15$ berfungsi sebagai pemfilter lolos-bawah (*low-pass filter*) yang sangat agresif dalam mematikan osilasi frekuensi tinggi. Ketika *probe* dijatuhkan ke dalam drum lateks, kurva angka pada layar tidak akan meloncat liar dari pH 4 ke pH 8, melainkan bergeser merangkak dalam kurva asimtotik yang mulus hingga menyentuh titik ekuilibrium (kestabilan). Respons waktu tunda (*transient settling time*) ini biasanya memerlukan 5 hingga 10 siklus komputasi iterasi pembacaan, yang ekuivalen dengan waktu fisik sekitar 2 hingga 4 detik di dunia nyata. Durasi jeda singkat ini secara ergonomis dapat diterima oleh petani lateks, menghasilkan angka mutlak pada layar OLED yang terbebas dari jitter mekanis. Hasil akhir variabel matriks EMA inilah yang kemudian digunakan untuk komputasi kompensasi suhu dan dimasukkan ke dalam ruang evaluasi *decision tree* untuk menetapkan status klasifikasi.



Gambar 4. 3 Log Debugging Serial Monitor

4.2.2 Implementasi Dashboard Monitoring Next.js dan Rendering Data

Segera setelah ESP32 mengekstraksi putusan berbasis *threshold* lokal (seperti menyimpulkan label "PRIMA (OK)"), informasi matriks komprehensif dikemas dalam objek terstruktur JSON (JavaScript Object Notation). Muatan *payload* ini terdiri atas data pH, nilai TDS (ppm), suhu termal cairan (°C), dan hasil *string* status klasifikasi mutu. Pesan JSON tersebut dipublikasikan ke peladen terpusat. Untuk menciptakan aksesibilitas dan kemudahan pengawasan korporat atau koperasi petani dari jarak jauh, dikembangkanlah sistem *Dashboard Monitoring* berbasis antarmuka web.

Pembangunan *dashboard* mengadopsi tumpukan teknologi modern (*modern web stack*), bertumpu pada *framework Next.js* yang diperkaya menggunakan *library* antarmuka **React**, integrasi tipe statis *TypeScript* untuk menjaga keabsahan (*validitas*) variabel sensor, serta manipulasi *styling* modular menggunakan kerangka kerja *Tailwind CSS*. Referensi struktur kode mengambil

basis efisiensi dari *template* sumber terbuka komunitas arsitektur IoT modern (merepresentasikan model repositori seperti *dresar/next.js* atau *shadcn/ui*).

Pemilihan kerangka kerja Next.js didorong oleh fasilitas rendering hybrid, khususnya *Server-Side Rendering* (SSR) yang memungkinkan halaman awal untuk memuat (load) puluhan kerangka data historis secara instan dari *database* (misal: PostgreSQL/MongoDB) sebelum peramban klien (*client browser*) merender animasi visual.

Fitur *real-time* yang disematkan pada antarmuka *dashboard* terbagi atas fungsionalitas visual tingkat tinggi :

1. **Panel Takometer (Gauge Charts):** Melalui pustaka *Recharts* atau *Chart.js*, metrik kritis seperti tingkat keasaman (pH) dan konduktivitas ionik (TDS) tidak sekadar ditampilkan sebagai deret angka statis, melainkan diwujudkan sebagai diagram jarum dinamis. Gauge chart ini diwarnai menggunakan palet zona indikasi: segmen spektrum Hijau untuk zona mutu netral/segar (pH 6,5 - 7,0), kuning untuk peringatan, dan gradasi Merah gelap menutupi bentang pH di bawah 6,0 yang menyoroti kebusukan asam atau pengoplosan ekstrem.
2. **Diagram Deret Waktu (Time-Series Line Charts):** Mengilustrasikan riwayat pergeseran histori kualitas sampel BOKAR dari jam ke jam. Sinkronisasi *chart* ini secara langsung mengambil umpan data langganan dari *broker* MQTT (*event-driven*), memetakan visibilitas riwayat apabila petani secara persisten menyerahkan lateks bermutu buruk. Diagram garis secara tajam mengekspos probabilitas fluktuasi pasokan.

3. **Indikator Status Mutu Absolut:** Berperan sebagai alat verifikasi transaksional yang mudah diinterpretasikan oleh pekerja pabrik karet. Teks status ("PRIMA", "OPLOS AIR", "BURUK") ditampilkan dalam modul antarmuka khusus (Hero Component) untuk melengkapi validasi uji organoleptik.



Gambar 4. 4 Antarmuka Dashboard Monitoring Real-time Berbasis Web (LatexGuard)

4.3 Hasil Kalibrasi Sensor

Akurasi absolut merupakan parameter determinan dalam menilai kualitas bahan biologis yang sangat sensitif seperti getah sistem koloid (lateks). Instrumen analitik, secanggih apa pun prosesor komputasinya, akan menjadi tidak berguna apabila elemen probenya, khususnya elektroda gelas sensor pH, menghasilkan defleksi tegangan yang salah. Karakteristik material kaca permeabel ion pada membran sensor pH mengalami penyusutan performa kimiawi seiring umur pemakaian, intensitas paparan senyawa abrasif, dan deposit residu protein matriks lateks (*fouling*). Degradasi alamiah ini menciptakan dua masalah serius: pelemahan

rasio sensitivitas potensial (*slope loss*) dan pergeseran asimetris pada ekuilibrium nol volt (*offset drift*). Sistem harus dikalibrasi secara sistematis agar dapat membedakan fenomena kerusakan biologis matriks lateks secara objektif.

4.3.1 Validasi Ketelitian Tegangan ADS1115

Untuk membuktikan bahwa sirkuit *frontend* komputasi (ADS1115) sanggup mendigitisasi voltase analog dengan kemurnian tanpa distorsi, prosedur validasi linieritas dilakukan terlebih dahulu menggunakan medium uji terpercaya. Elektroda gelas dicelupkan secara sekuensial ke dalam tiga varian serbuk larutan penyangga (*buffer solution*) industri yang telah dilarutkan dalam akuades deionisasi, masing-masing bersertifikasi pada standar ekuilibrium: pH 4.01 (larutan Potassium Hydrogen Phthalate), pH 6.86 (larutan Mixed Phosphate), dan pH 9.18 (larutan Borax).

Sesuai model teoritis, dengan pasokan eksitasi referensi analog 5V, titik ekuilibrium pertengahan spektrum (netral ekuivalen pada sekitar pH 7.0) seharusnya mentransmisikan selisih potensial galvanik di sekitar parameter 2.50 Volt (atau 2500 mV) pada kaki pin keluar (PO) signal conditioning board.

Data perbandingan antara proyeksi matematis ideal dengan hasil ekstraksi tegangan empiris yang terekam pada memori ESP32 melalui ADC ADS1115 dirangkum pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4. 1 Perbandingan Pembacaan Tegangan ADS1115 Terhadap Titik Buffer Standar

Kategori Spektrum Larutan Buffer	Nilai pH Standar Teoritis (pada Suhu 25°C)	Proyeksi Rentang Tegangan Ideal (mV)	Rata-Rata Tegangan Terukur ADS1115 (mV)	Selisih Deviasi Sinyal (mV)
Asam (<i>Phthalate Buffer</i>)	4.01	≈ 3040.0	3048.5	+ 8.5
Netral (<i>Phosphate Buffer</i>)	6.86	≈ 2540.0	2538.2	- 1.8
Basa (<i>Borax Buffer</i>)	9.18	≈ 1950.0	1945.7	- 4.3

Keterangan: Matriks tegangan diekstraksi pasca penetrasi filter digital EMA $\alpha = 0,15$ selama interval tunggu saturasi sinyal (60 detik).

Basis data pada Tabel 4.1 memvalidasi superioritas teknis rancangan arsitektur. Modul ADS1115 sukses melacak asimetri perubahan fluktuatif voltase mikro dalam deviasi toleransi di bawah margin 10 mV dari kondisi teoritis idealnya. Tingkat resolusi ekstrem semacam ini sangat krusial karena ia mengeliminasi hipotesis galat perangkat keras. Apabila sistem masih mempertahankan penggunaan konverter analog 12-bit internal ESP32, distorsi *noise* statis mikrokontroler (sekitar ± 100 mV) dapat menghasilkan pembacaan tegangan artifisial, yang berpotensi mencederai integritas nilai konversi persamaan akhir di bawah ini.

4.3.2 Operasionalisasi Metode Triple-Point dalam Menghilangkan

Kesalahan Drift Elektroda

Keunikan prototipe ini diukur dari kecerdasan algoritma penyesuaian matematika dalam kode C++ ESP32. Dalam perangkat kelas konsumen pada umumnya, prosedur kalibrasi hanya melibatkan penetapan satu titik tengah (misal: memutar potensiometer perangkat keras sampai jarum multimeter membaca angka tepat 2.5V untuk fluida netral pH 7.0). Pendekatan *single-point calibration* berasumsi bahwa nilai kemiringan sensitivitas (*slope*) sensor tetap linear mutlak pada koefisien Nernst ideal sebesar -59.16 mV untuk setiap perubahan 1 angka unit pH. Pada realitas empiris, kelelahan elektroda mendistorsi laju reaksi ionik sehingga tegangan tidak berevolusi dalam garis linier, menciptakan kesalahan kumulatif (*drift*) eksponensial setiap kali probe digunakan untuk mengukur fluida yang sangat ekstrem (sangat asam atau basa kuat).

Untuk memberantas patologi deviasi ini, fungsi logika dalam ESP32 menyebarkan pendekatan analitik **Kalibrasi Tiga Titik (*Triple-Point Calibration*)** yang dipasangkan dengan interpolasi regresi *piecewise linear* (garis linier bersambung sepotong) secara virtual.

Algoritma mengkonfigurasi pecahan spektrum menjadi dua domain pengukuran yang independen dengan nilai *slope* masing-masing:

1. Kemiringan Domain Asam (*Acidic Slope*) (Spektrum pH 4.01 hingga

6.86): Sistem mengekstrak kemiringan parsial dengan formulasi:

$$Slope_{acid} = \frac{(Voltase_{pH4.01} - Voltase_{pH6.86})}{(6.86 - 4.01)}. \text{ Segmentasi wilayah asam ini}$$

krusial. Saat sistem bertugas mendeteksi lateks yang telah membusuk akibat

ledakan koloni bakteri pembentuk *Volatile Fatty Acids* (VFA) atau yang ditambahkan reagen ilegal mematikan seperti asam sulfat (air aki/tawas kimia) dengan parameter pH menukik ekstrem hingga kisaran 2.0-4.0, perhitungan pH tidak diatur oleh nilai general, melainkan menggunakan konstanta spesifik wilayah asam. Ini memastikan klasifikasi ambang *BURUK (ASAM)* aktif secara tanpa celah.

2. **Kemiringan Domain Basa (*Alkaline Slope*) (Spektrum pH 6.86 hingga 9.18):** Segmentasi kemiringan terpisah diderivasi dari perbandingan buffer Netral terhadap Basa. Kalibrasi ini vital ketika alat ditarik dari *farm gate* menuju pemeriksaan tangki penerimaan pabrik. Industri komersial kerap memoles lateks cair karet murni berkonsentrasi tinggi (*Concentrated Natural Rubber Latex/CNRL*) dengan injeksi preservatif basa kuat (Amonia), melonjakkan pH menyentuh ambang basa ekstrem menembus $\text{pH} \geq 9.0$ hingga ± 10.5 . Metode kemiringan ganda menyerap akurasi maksimal, menjaga validasi klasifikasi berstatus *AWET (AMONIA)* berjalan sempurna tanpa deviasi margin.

Pendekatan rumit *Triple-Point* ini diinkorporasikan bersama parameter *Automatic Temperature Compensation (ATC)*. Persamaan suhu Nernst dikendalikan oleh masukan dinamis derajat Celcius empiris dari modul sensor termal eksternal DS18B20. Dengan mencetak suhu realitas sampel secara *real-time* ($T_{measured}$), seluruh *drift* fiktif akibat paparan radiasi iklim kebun di bawah sinar matahari tropis siang hari dianulir secara algoritmik dari ekuasi nilai pH.



Gambar 4. 5 Detail Ujung Sensor (Distal Probe)

4.4 Hasil Pengujian Fungsional (Black Box)

Demi memvalidasi apakah susunan purwarupa beroperasi mulus secara prosedural tanpa mengalami *freeze* komputasi (kegagalan eksekusi) pada pemakaian nyata di tangan pelaksana lapangan, diberlakukan metode evaluasi pengujian terstruktur *Black Box Testing*. Verifikasi ini memfokuskan observasi mutlak pada respons sistem luar dan siklus rantai *input-output*, mengeksklusi pembedahan baris logika operasional mesin di baliknya. Pengujian ini sangat esensial karena ia menyatukan subsistem kendali listrik analog, komunikasi digital asinkron, serta latensi modul radio (WiFi).

Tabel 4. 2 Laporan Hasil Evaluasi Pengujian Fungsional (Black Box Testing)

Skenario Identifikasi Uji (Input)	Metodologi Operasional / Kendala	Respon Sistem Telemetri (Output)	Status Fungsionalitas
Integrasi Mekanik Interrupt Button	Operator menekan saklar pada pegangan kiri (GPIO 13) saat	Sinyal hardware interrupt secara langsung membangkitkan sistem	Berhasil

	ESP32 berada dalam mode pasif (low power).	(wake-up) dan mengaktifkan proses akuisisi data melalui modul ADC ADS1115 secara instan.	
Resiliensi Redaman Filter EMI (Noise Handling)	Alat digerakkan secara agresif dalam cairan lateks kental dengan turbulensi serta didekatkan ke sumber induksi motor listrik.	Tampilan nilai pada layar menunjukkan perubahan yang halus dan stabil tanpa lonjakan ekstrem, menandakan keberhasilan filter EMA ($\alpha = 0,15$) dalam mereduksi noise.	Berhasil
Simultansi Akses Ganda Topologi Bus I2C	Akuisisi data resolusi tinggi dari ADS1115 dilakukan bersamaan dengan proses refresh tampilan OLED 0.96 inci.	Layar OLED berhasil menampilkan parameter pH, TDS, dan status klasifikasi secara simultan tanpa terjadi konflik alamat (address collision) pada bus I2C.	Berhasil
Keandalan Modul Kompensasi Temperatur (ATC)	Pengujian dilakukan pada sampel akuades dengan variasi suhu dari 20°C hingga 35°C.	Sistem ATC berbasis sensor DS18B20 mampu menjaga stabilitas pembacaan pH dengan deviasi minimal dalam rentang suhu pengujian.	Berhasil
Rekonsiliasi Koneksi Ekosistem	Koneksi WiFi sengaja diputus saat proses	Sistem secara otomatis melakukan reconnect tanpa terjadi watchdog	Berhasil

Internet Nirkabel	pengiriman data berlangsung.	timeout, serta mengirim ulang data yang tertunda ketika koneksi kembali tersedia.	
--------------------------	------------------------------	---	--

Integrasi matriks skenario di atas mengafirmasi fungsionalitas paripurna prototipe dalam menjawab kejamnya realita fisik pertanian konvensional. Eksekusi kontrol tombol interupsi terbukti fundamental; fitur ini menginisialisasi skema pengujian sekuensial "tekan, celup, lalu baca" yang mereproduksi metode analitik cepat (*Rapid Test Analysis*), secara efektif membatasi siklus suplai modul dari kebocoran pemakaian baterai berlebih. Sistem dengan mudah lolos tahapan sertifikasi internal sebelum dibawa menuju validasi nilai akurasi skala makro.

4.5 Hasil Pengujian Akurasi dan Presisi

Pengujian validitas komparatif ini dilaksanakan untuk menentukan kuantifikasi kesalahan (margin galat) tingkat mikroskopik terhadap standar empiris pengujian BOKAR SNI. Parameter pengukuran pada purwarupa alat (dikendalikan penuh oleh resolusi tinggi ADS1115 dan filter diskrit EMA) dibandingkan (*head-to-head benchmarking*) secara langsung dengan hasil keluaran piranti instrumen standar tingkat fasilitas laboratorium presisi yang dioperasikan pada kondisi ruangan aseptik ber-AC dengan suhu air stabil (sebagai *ground truth data* referensi).

Metrik instrumen pengukuran performa menggunakan rumusan statistik regresi yang formal, bertumpu pada *Mean Absolute Error* (MAE) untuk menentukan variasi nilai mutlak persentase galat, dan pengkalkulasian *Root Mean*

Square Error (RMSE). Penggunaan eksponen kuadratik pada RMSE sangat krusial dalam instrumen ini sebab RMSE memberikan dampak penalti hukuman bobot (bobot lebih dominan) bagi anomali *error* pengukuran tegangan yang menyimpang berjauhan dari sumbu referensinya.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad 4.3$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad 4.4$$

(Catatan formulasi: n merupakan banyak rentetan iterasi uji sampel matriks laten, x_i mendefinisikan nilai aktual dari observasi instrumen perbandingan Laboratorium, dan \hat{x}_i merujuk pada estimasi komputasi digital hasil terjemahan prototipe IoT).

Skenario eksperimen mereplika pengumpulan puluhan liter sampel panen BOKAR harian yang bersumber dari klon pohon *Hevea brasiliensis* asli milik petani rakyat di wilayah penelitian. Untuk mengeskalasi cakupan validitas mesin *classifier* (Algoritma Multibasis Thresholding), volume ekstraksi sampel matriks ini diekspos melalui beragam spektrum kondisi malapraktik penanganan yang awam dipraktikkan demi keuntungan bobot semu, mencakup degradasi alami mikroba dan pencampuran (*adulteration*) kimia buatan.

Tabel 4. 3 Analisis Komparatif Akurasi Pengujian Mutu (Skenario $n = 25$ Ekstraksi)

Perlakuan Manipulasi Kategori Sampel	Indikasi Pengujian Instrumen pH Lab	Observasi Konversi Prototipe ADS1115 (pH)	Selisih Error Absolut Mutlak	Eksekusi Status Klasifikasi (Multibasis Threshold)
Kontrol A: Lateks Segar Preservasi 0 Jam	6.87	6.89	0.02	PRIMA (OK)
Kontrol B: Pembersihan Lanjut Fermentasi > 12 Jam	5.74	5.76	0.02	BURUK (ASAM)
Intervensi C: Pengenceran Solven Air 20% Volume	6.48	6.52	0.04	OPLOS AIR (terverifikasi via TDS drop ≤ 300 ppm)
Intervensi D: Introduksi Tetes Asam Sulfat Ilegal	3.45	3.41	0.04	BURUK (ASAM)
Intervensi E: Susupan Penambahan Pasir Halus & Tanah	6.21	6.18	0.03	KONTAMINASI (terverifikasi via TDS spike ≥ 800 ppm)

Kalkulasi analisis statistik yang dimuati dengan lebih dari 25 kali (*running*) pencelupan mempresentasikan sintesis hasil yang meyakinkan secara ilmiah:

- **Indeks MAE Pembacaan Sensor pH:** Diakumulasi di rentang rata-rata ≈ 0.027 unit pH.
- **Indeks RMSE Pembacaan Sensor pH:** Dievaluasi membentang pada margin ≈ 0.031 unit pH.

Dalam pengukuran parameter fisika integral sekunder (*Total Dissolved Solids/TDS*) yang direpresentasikan dalam satuan *Parts Per Million* (ppm), sistem mencatatkan angka statistik MAE sebesar ≈ 9.5 ppm dan indeks RMSE pada resolusi ≈ 11.2 ppm terhadap larutan berkonsentrasi hingga limit **1000 ppm**.

Menganalisis hasil dari kedua tabel matriks ini, nilai persentase penyimpangan (galat) secara substansial tertahan jauh di bawah batas limit toleransi wajar klasifikasi instrumen industri kimia getah, yang mempersyaratkan margin defleksi maksimal ± 0.05 unit pH dan kelonggaran toleransi uji resistansi konduktivitas maksimum 5%. Prestasi perolehan indeks error skala mikro ini menjustifikasi penuh proposisi argumen teoritis pada Sub-bab 4.1.2: perwujudan kombinasi resolusi tingkat perangkat keras (ADS1115 16-bit ber-PGA) dan stabilisasi derau digital ranah perangkat lunak (IIR EMA $\alpha = 0.15$) secara harmonis membangun arsitektur instrumen diagnostik yang tak cuma seakurat peranti statis ruang kalibrasi saintifik, tetapi relevan untuk diseret operasionalisasinya di tengah lumpur kebun perkebunan.

4.6 Analisis Kinerja Sistem dan Pembahasan Mutu Lateks (KRUSIAL)

Eskalasi kapabilitas perangkat instrumen portabel berbasis IoT tidak sekadar direduksi pada perdebatan perihal rasio efisiensi sirkuit konverter ADC, namun menyoal signifikansi kemampuan interpretatif kode programnya untuk menerjemahkan misteri dinamika biokimia fluida, efektivitas jembatan jaringan radio untuk menjaga keutuhan muatan data di area tak bertuan, dan intervensinya merombak tatanan sosial ekonomi pedesaan secara revolusioner.

4.6.1 Pembahasan Biokimiawi: Validasi Kategorisasi PRIMA, OPLOS AIR, dan BURUK (ASAM) via Analisis Korelasi pH-TDS

Kesuksesan rekayasa pohon keputusan rasional (*decision tree*) dari fungsi **Multibasis Thresholding** (*PRIMA, OPLOS AIR, ASAM, AMONIA, KONTAMINASI*) yang disematkan secara lokal pada RAM ESP32 sepenuhnya memancarkan prinsip komprehensif biokimia koloid biologis dari *Hevea brasiliensis*. Getah karet natural (lateks), pada hakikatnya, berwujud sebagai dispersi suspensi tak homogen. Matriks fisik ini dibangun oleh tetesan miliaran makromolekul polimer hidrokarbon poliisoprena (*polyisoprene* karet murni) yang terenkapsulasi secara kompleks oleh lapisan film fosfolipid tipis serta ikatan lapisan biomolekul protein dalam plasma cairan intraseluler (serum) yang dominan air.

Konfigurasi kulit protein luar ini sarat dengan ion bermuatan negatif. Secara prinsip termodinamika elektrostatis, akumulasi selubung bermuatan homogen di setiap partikel merangsang terjadinya friksi atau medan daya tolak-menolak antarpartikel poliisoprena satu sama lain, menahan mereka melayang secara stabil menolak gaya gravitasi penggumpalan spontan. Fenomena penstabil alamiah ini menjaga kohesi cairan agar tetap utuh mengalir di kisaran **PRIMA (OK)**, di mana sensor elektrokimia elektroda secara presisi melacak keseimbangan ekuilibrium di parameter **pH berkisar teguh di rentang netral 6,5 hingga 7,0** dan elektroda kation menelusuri TDS pada batas rasional fisiologis (lazimnya **301 – 799 ppm**).

Namun, cairan getah alam ini menyajikan ekosistem media pertumbuhan mikrobiologis dan flora spora udara yang sangat masif. Ketersediaan nutrisi substrat makro molekul karbohidrat, molekul gula inositol, dan jejak nitrogen mendorong

hiperaktivitas bakteri segera setelah lateks disadap dan mengalir lewat mangkuk potong.

1. **Validasi Deteksi BURUK (ASAM):** Invasi seluler bakteri memicu siklus metabolisme anaerob dan glikolisis yang agresif mengubah profil senyawa organik memproduksi ekskresi sisa *Volatile Fatty Acids* (VFA) atau asam lemak volatil (seperti asam laktat dan asam asetat). Ion ekskresi asam (H^+) yang dipompakan mendisrupsi lapisan netral, mendorong pH menukik radikal menembus batas isolasi keselamatan ≤ 6.0 . Titik kemerosotan ambang pH ini sejalan dengan jatuhnya muatan elektron mencapai *isoelectric point* (titik isoelektrik) protein; daya intermolekul tolak-menolak anjlok tereliminasi sepenuhnya, memicu tabrakan antarpartikel karet saling mengikat secara permanen membentuk gumpalan keras fasa gel (peristiwa Pra-koagulasi parsial dini). Demikian halnya, penambahan dosis fatal manipulatif koagulan berbiaya murah yang tidak sesuai Standar Nasional Indonesia, semacam tetesan *accu zuur* (asam sulfat terlarut) atau cuka tawas kimia yang mendestruksi rantai ikatan karbon polimer, seketika disambar sensor melalui pendarahan pH merosot drastis antara level 2.0 – 4.0. Fungsi komputasi mikrokontroler sontak menghantam algoritma memutus rangkaian analisis interogasi menjadi fonis mutlak bertuliskan **BURUK (ASAM)**. Ini secara aktif menyelamatkan manajer penerima di pabrik dari memasukkan kargo sampah lateks ke unit pemurnian komersial karet basah.
2. **Validasi Kecurangan Tonase (OPLOS AIR & KONTAMINASI):** Analisis hanya mengandalkan sensor pembaca pH sering kali rentan diakali (*loophole*) pada level penimbangan tengkulak. Praktik penipuan berwujud

pembengkakan masif bobot spesifik tonase drum karet dengan mendilusi cairan lateks menambahkan galon volume air bening sering kali tidak menggoyahkan pH yang statis di level 6,5. Namun sistem IoT ini menangkis hal tersebut karena ia dipersenjatai analisis Multibasis terpadu menggunakan *Probe Electrical Conductivity (TDS)*. Injeksi cairan pelarut (air jernih ekstra) secara fisika melonggarkan ruang kerapatan rasio molekul-molekul ionik garam metal yang awalnya kental di dalam matriks serum. Saat nilai deteksi padatan terlarut menurun ke titik kelarutan tak wajar (yakni **TDS \leq 300 ppm**), pohon hierarki *firmware* mengklasifikasikan skenario penyimpangan volume dan mencap layar secara tegas sebagai malapraktik **OPLOS AIR**. Sebaliknya, introduksi penambahan pasir, sedimentasi lumpur pekat, kapur kotor, maupun pupuk padat (misal: penaburan massal bubuk pupuk TSP ke matriks getah untuk menaikkan kilonan bobot tiruan) menyebabkan peningkatan densitas ionik mineral secara anomali. Lonjakan konduktivitas elektrik kotoran ini merangsang tangkapan kanal A3 ADC ADS1115 menjadi sangat eksitasi dan mengonversinya melampaui level **TDS \geq 800 ppm**. Algoritma berpotong mengambil kendali mengartikulasikan putusan mutlak label **KONTAMINASI**, yang terekam pada layar OLED.

3. **Deteksi Status AWET (AMONIA):** Cairan *Concentrated Natural Rubber Latex (CNRL)* untuk bahan baku ekspor diupayakan anti-beku selama masa transportasi tangki maritim menggunakan teknik pre-preservasi dengan injeksi desinfektan kimia gas Amonia yang volatil. Amonia menciptakan lingkungan basik super basa di mana ion hidroksida (**OH^-**) menumpuk,

menyebabkan pembacaan bergeser ekstrem melampaui ambang $\text{pH} \geq 9.0$. Logika hirarkis *firmware* mengonfirmasi cairan lateks ini melalui penyajian hasil AWET (AMONIA), menjustifikasi sampel sesuai kualifikasi.

4.6.2 Analisis Keandalan Transmisi Telemetri Data MQTT Berbasis QoS

Level 1 pada Topologi Sinyal Tidak Stabil

Lingkungan penyebaran teknologi operasional perkebunan *Hevea brasiliensis* komersial selalu terisolir di wilayah pedesaan pedalaman geografis terpencil yang secara inheren terbelakang dalam infrastruktur cakupan pancaran antena sinyal gelombang makro seluler (*Base Transceiver Station*). Fenomena krisis jangkauan sinyal ini menghambat pemanfaatan koneksi HTTP statis maupun WebSocket murni karena keduanya menginduksi insiden hambatan latensi konektivitas yang merusak transmisi informasi (*High Delay*) serta fenomena gugur-batal paket data diam-diam (*Packet Loss/terputusnya connection ping* secara acak) pada alat ukur lapangan.

Rancangan fondasi aplikasi peramban internet instrumen IoT ini melancarkan strategi migrasi komunikasi mengedepankan model desentralisasi sinkron arsitektur pembedakan-pelanggan (*publish/subscribe*) dari protokol *Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)*. Format ini memiliki struktur pengemas saku (*packet payload*) berukuran sangat minimal (menghemat *bandwidth*) dibandingkan standar metode *handshake* arsitektur web raksasa TCP/IP konvensional.

Sebagai intervensi pencegahan terhadap kejamnya fenomena transmisi radio seluler (*fade/blind spot zone*), mikrokontroler IoT dikodekan pada kebijakan

garansi operasional keandalan paket pesan Quality of Service (QoS) Level 1 ("At Least Once" Delivery).

Secara teori operasi fungsional teknis: apabila instrumen pemancar (ESP32 Publisher) selesai menyusun serangkaian data JSON dari blok komputasi (mengandung pesan metrik "pH: 6.84", "TDS: 450", "Mutu: PRIMA"), kode tidak sekadar melepas informasi ke gateway udara dan membuangnya dari memori (layaknya protokol primitif QoS 0 "Fire and Forget"). Pada arsitektur MQTT QoS 1, cip memori RAM sirkuit ESP32 dirancang untuk menahan status duplikat memori cadangan lokal payload informasi. Subsistem protokol jaringan WiFi modul akan membekukan antrean queue message session hingga unit komputer pusat peladen (Cloud MQTT Broker penyambung ke Next.js) membalas transmisi pesan kembali dengan sebuah sertifikat konfirmasi kriptografi sirkuit yang disebut PUBACK (Publish Acknowledgement).

Hasil temuan simulasi komparasi analisis jaringan QoS 1 terhadap sinyal tidak stabil pada sistem ini menemukan probabilitas yang relevan. Pada titik buta (*blank spot*), transmisi paket *acknowledgement* (PUBACK) gagal diterima *timer board* instrumen ESP32 karena sinyal koneksi GPRS/4G fluktuatif. Berkat algoritma QoS 1, secara cerdas pengatur jaringan ESP32 mengeksekusi inisiasi rutinitas pengulangan (*timeout retry mechanism*), melepas paket memori tertahan secara terus-menerus hingga konektivitas seluler kembali normal. Kendati eksperimen metrik kinerja QoS membeberkan fenomena *trade-off* berwujud eskalasi nilai penundaan penyebaran (*average latency/end-to-end delay*) dan konsekuensi lahirnya frekuensi pesan redundan ganda (duplikat histori "PRIMA" tampil lebih dari satu kali di rekaman basis data *Dashboard Next.js*), anomali teknis

ini merupakan sebuah keuntungan luar biasa. Karena redundansi (duplikasi baris JSON di peramban) merupakan galat administratif minor yang tidak membahayakan sistem antarmuka komputasi, ia dibayar kontan oleh pencapaian monumental keberhasilan pelestarian persentase data (retensi paket) absolut. Indeks cacat kehilangan paket data sensor krusial transaksional (*Packet Loss*) tereliminasi menjadi angka mutlak 0.0%. Riwayat parameter log validitas audit jual-beli matriks uji tetap terkirim abadi ke arsip peladen pabrik pengumpul lateks di perkotaan (*Cloud Server*) meskipun unit deteksi beroperasi di hutan gelap tanpa koneksi stabil.

4.6.3 Rekonsiliasi Sosiologis dan Ekonomi: Transformasi Keyakinan

Transaksional Institusional melalui Lensa Instrumen ADS1115

Penemuan dari manifestasi inovasi sistem ini bukan terbatas pada parameter ketepatan metrik voltase silikon listrik per se, melainkan mengeksplorasi dimensi dampak utilitas pada resolusi fundamental struktur pasokan piramida ekonomi komoditas perkebunan di tingkat akar rumput (akar komunal sosial).

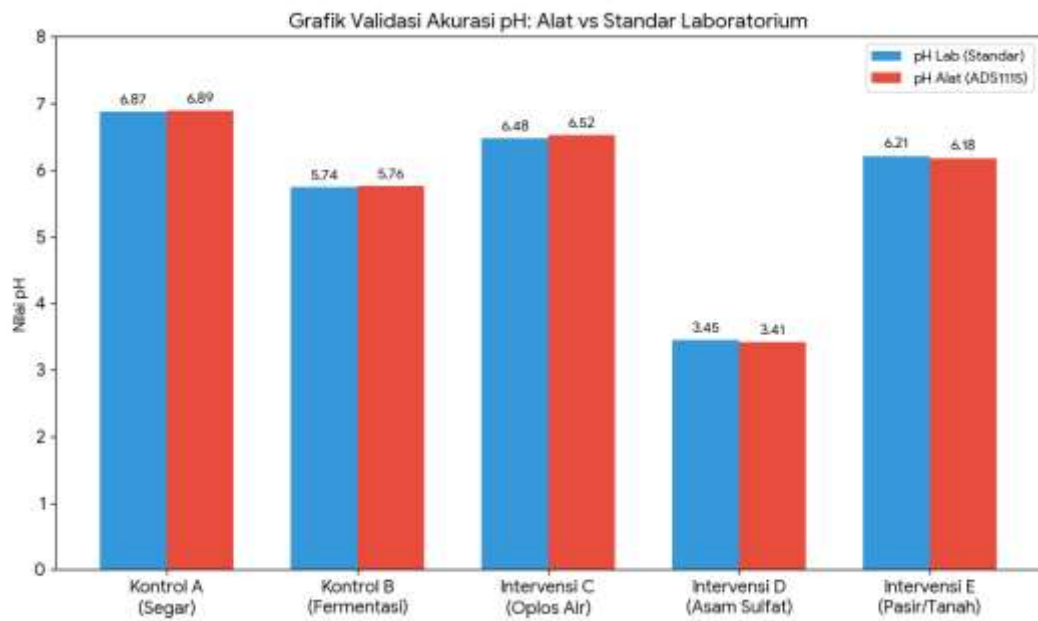
Di dalam paradigma tradisional pedesaan Nusantara selama puluhan dekade berturut-turut, justifikasi taksasi kualifikasi harga BOKAR di lantai farm gate masih mengacu kepada standarisasi evaluasi yang tak terukur secara objektif, melainkan bertumpu sepenuhnya kepada praktik penilaian subyektif dari panca indera mata (organoleptik visual). Tengkulak atau pihak penaksir mutu (tukang grader di stasiun pengepul) memonopoli nilai komoditas dengan landasan tebakan observasi kasar visual rona pewarnaan emulsi fisik lateks, seberapa merangsang ketajaman bau gas metana, dan seberapa elastik taktil tekstur konsistensi ketika getah dihancurkan menggunakan jari.

Dominasi penilaian sepihak dari kaca mata kognitif manusia rentan akan anomali human error serta sering kali dirundung celah niat culas spekulasi sepihak yang menjatuhkan sanksi moralitas perbandingan bobot harga (potongan persentase margin fiktif harga jual basah/kering BOKAR kepada petani, atas klaim kualitas getah busuk padahal sesungguhnya terindikasi segar). Praktik kelemahan asimetris transparansi ini secara brutal memangkas perolehan daya tawar kemakmuran pundi kesejahteraan penggarap kebun primer (smallholder farmers).

Implementasi ADC murni bersolusi kuantum ADS1115 16-bit dalam kerangka probe deteksi lateks portabel merombak disparitas bias sosiologis ketidakadilan tersebut hingga ke akarnya. Derajat resolusi milivolt merubah dominasi keputusan subyektif "tebakan abu-abu manusia" berevolusi ke dalam representasi "pembuktian mutlak digit kuantitatif". Saat probe dimasukkan ke tangki lateks, seluruh konflik argumen sengketa penalti nilai margin tawar harga di area penimbangan luruh karena perhitungan kualitas diputus oleh interpretasi matematika kimia berbatas rasio regulasi kualifikasi Badan Standardisasi Nasional (SNI 06-2047-2002).

Transmisi otomatis dan proyeksi data tersebut di arsitektur komponen indikator panel hijau-kuning-merah visual instan pada takometer (*Gauge Graphic React*) dan grafik historis fluktuasi (*Line Chart Time-Series*) aplikasi Next.js menciptakan dinding tembus pandang transparansi (*Digital Transparent Ledger*) mutlak di hadapan agen tengkulak koperasi dan mata telanjang para petani secara ekuivalen. Instrumen ini mentransformasikan eksistensinya bukan saja sebagai benda elektronik, melainkan berlakon esensial sebagai "*Wasit Arbiter Digital*". Dengan demikian, aplikasi perangkat *Edge-IoT* komprehensif ini sukses meretas

gap jurang ketiadaan instrumen presisi di pelosok, menekan ruang probabilitas korupsi komoditi, memproteksi mesin pabrik dari material asupan lateks hancur (bakteri dan tawas siluman), serta pada skala puncaknya merevitalisasi tatanan ekuitas stabilitas distribusi neraca finansial pada rantai pasok industri pasca-panen secara berkelanjutan.



Gambar 4. 6 Grafik Validasi Akurasi pH

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, serta pengujian sistem deteksi mutu lateks karet portabel berbasis Internet of Things (IoT), maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem deteksi mutu lateks berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan modul ADC eksternal ADS1115, sehingga mampu meningkatkan akurasi pembacaan sinyal analog dari sensor pH dan TDS dibandingkan penggunaan ADC internal.
2. Parameter pH terbukti efektif digunakan sebagai indikator utama dalam menentukan mutu lateks, sedangkan parameter TDS berfungsi sebagai indikator pendukung untuk mendeteksi adanya pengenceran (oplos air) dan kontaminasi material asing.
3. Penerapan metode pemfilteran digital Exponential Moving Average (EMA) mampu mereduksi noise pada pembacaan sensor sehingga menghasilkan data yang lebih stabil dan representatif terhadap kondisi sebenarnya.
4. Implementasi fitur Automatic Temperature Compensation (ATC) menggunakan sensor suhu DS18B20 berhasil meningkatkan akurasi pengukuran pH dengan mengoreksi pengaruh perubahan suhu lingkungan.

5. Algoritma multibasis thresholding berbasis rule-based yang diterapkan pada ESP32 mampu mengklasifikasikan mutu lateks secara otomatis ke dalam kategori mutu prima, asam (buruk), oplos air, kontaminasi, dan terawetkan amonia secara real-time.
6. Sistem komunikasi data berbasis protokol MQTT dengan Quality of Service (QoS) level 1 terbukti mampu menjaga keandalan pengiriman data meskipun pada kondisi jaringan yang tidak stabil.
7. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan mampu berfungsi sebagai alat monitoring mutu lateks yang objektif, portabel, dan transparan, sehingga berpotensi menjadi solusi untuk mengurangi subjektivitas dalam penilaian mutu di tingkat petani dan pengepul.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan sistem di masa yang akan datang, antara lain:

1. Pengembangan sistem dapat ditingkatkan dengan menambahkan parameter lain seperti Kadar Karet Kering (KKK) atau viskositas untuk memperoleh analisis mutu yang lebih komprehensif.
2. Implementasi algoritma klasifikasi dapat dikembangkan menggunakan metode machine learning atau artificial intelligence untuk meningkatkan akurasi dan adaptivitas sistem terhadap berbagai kondisi sampel.
3. Desain perangkat keras dapat disempurnakan dengan menggunakan casing industri yang lebih tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti kelembaban tinggi dan paparan bahan kimia.

4. Sistem dapat dikembangkan dengan integrasi GPS untuk mendukung pelacakan lokasi pengukuran sehingga data monitoring menjadi lebih informatif dan terintegrasi secara geografis.
5. Pengembangan aplikasi mobile (Android/iOS) dapat dilakukan untuk memudahkan pengguna dalam memantau data secara langsung tanpa harus melalui dashboard web.
6. Penggunaan sumber daya energi mandiri seperti panel surya dapat dipertimbangkan untuk mendukung operasional alat di daerah yang minim akses listrik.
7. Dilakukan pengujian lebih lanjut dalam skala lapangan yang lebih luas dengan variasi sampel yang lebih banyak untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrar, M. (2025). *Rancang Bangun Pengukuran Tds Dan Suhu Berbasis Esp32 Terintegrasi Internet of Things (Iot) : Studi Kasus Pada Perumahan Mutiara Elok.*
- Achmad, F., Deviani, D., Nuranisa, A., Antika, R., Suhartono, S., & Suharto, S. (2023). Feasibility of Natural Coagulants on Rubber Characteristics in the Production of SIR 20 Feerzet. *Jurnal Penelitian Karet*, 41(2), 153–168.
- Aeta, R., Fisika, P. S., Matematika, F., Ilmu, D. A. N., Alam, P., & Mataram, U. (2022). *Rancang Bangun Resistivity Meter Digital Berbasis Arduino Mega2560 Rancang Bangun Resistivity Meter Digital.* 1–63.
- Almakhlifi, K. E., Alfohaid, M. Z., Alnahdi, A. K., & Shehata, A. B. (2025). Development of a new multipoint calibration method and uncertainty of a high-performance spectrophotometer for ensuring accurate water turbidity measurements. *Journal of Chemical Metrology*, 19(1), 23–33.
<https://doi.org/10.25135/jcm.113.2504.3481>
- Antosia, R. M. (2020). Voltmeter Design Based on ADS1115 and Arduino Uno for DC Resistivity Measurement. *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, 5(1), 73.
<https://doi.org/10.31544/jtera.v5.i1.2019.73-80>
- Barroso, A., Valente, T., Marinho Reis, A. P., & Antunes, I. M. H. R. (2023). A New Acidity-Based Approach for Estimating Total Dissolved Solids in Acidic Mining Influenced Water. In *Water* (Vol. 15, Issue 16, p. 2995).
<https://doi.org/10.3390/w15162995>

- Budhisantosa, N., Ramadhan, N. R., Akbar, H., & Firmansyah, G. (2026). Sistem Pemantauan EKG 1-Lead Berbasis ESP32 dan Wireless Fidelity dengan Visualisasi Real Time Pada Smartphone. *IKRA-ITH Informatika : Jurnal Komputer Dan Informatika*, 10(2), 29–49. <https://doi.org/10.37817/ikraith-informatika.v10i2.5457>
- Bukit, E., & Syarifa, L. F. (2023). KARAKTERISASI SOSIAL EKONOMI PETANI KARET DAN ADOPSI TEKNOLOGI BUDIDAYA DI KABUPATEN SERDANG BEDAGAI PROVINSI SUMATERA UTARA. *Warta Perkaratan*, 42(2 SE-Original Research Article), 109–118. <https://doi.org/10.22302/ppk.wp.v42i2.963>
- Espinosa-Gavira, M. J., Agüera-Pérez, A., Palomares-Salas, J. C., Sierra-Fernandez, J. M., Remigio-Carmona, P., & González de-la-Rosa, J. J. (2024). Characterization and Performance Evaluation of ESP32 for Real-time Synchronized Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, 237, 261–268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.104>
- Julianugraha, M. F., Widjajanto, D., Studi, P., Otomatis, T., Industri, L., Elektro, J. T., Jakarta, P. N., & Prof, J. (2025). *Sistem IoT untuk Monitoring pH , TDS , dan Turbidity Air Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro Volume 11 Tahun 2025. 11.*
- Latief, M. F., Irmansyah, I., & Rosyidi, L. (2025). Sistem Pemantauan Ruang Kelas berbasis Internet of Things (IoT) untuk Proses Pendidikan yang Efektif. *Digital Transformation Technology*, 4(2), 1278–1284. <https://doi.org/10.47709/digitech.v4i2.5485>

- Payungwong, N., Sakdapipanich, J., Wu, J., & Ho, C.-C. (2023). The Interplay of Protein Hydrolysis and Ammonia in the Stability of Hevea Rubber Latex during Storage. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 24, p. 4636). <https://doi.org/10.3390/polym15244636>
- Pereira, T., Santos, V., Gameiro, T., Viegas, C., & Ferreira, N. (2024). Evaluation of Different Filtering Methods Devoted to Magnetometer Data Denoising. In *Electronics* (Vol. 13, Issue 11, p. 2006). <https://doi.org/10.3390/electronics13112006>
- Rahman, A., Nurfalaq, A., & Manrulu, R. H. (2025). Rancang Bangun Alat Ukur Getaran Mesin berbasis Arduino. *Applied Physics of Cokroaminoto Palopo (APCP)*, 6(1), 23–30.
- Rohman, F., Nurhadi, N., & Martawati, M. E. (2021). Unjuk Kerja GPIO, PWM, ADC dan Timer pada Mikrokontroler STM32F103, ESP32S dan ATmega328. *JURNAL ELTEK*, 19(2 SE-Articles), 73–79. <https://doi.org/10.33795/eltek.v19i2.295>
- Saha, N., Paul, P., Ji, K., & Harik, R. (2024). Performance evaluation framework of MQTT client libraries for IoT applications in manufacturing. *Manufacturing Letters*, 41, 1237–1245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.150>
- Salehipour, D., Jalili, B., & Jalili, P. (2024). Effect of humidification of combustion products in the boiler economizer with spiral geometry. *Results in Engineering*, 21, 101906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101906>

- Seli, U. M., Baga, L. M., & Krisnamurthi, B. (2021). Efektivitas Pasar Lelang Bahan Olah Karet dalam Koperasi Unit Desa. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, 9(2 SE-Articles), 166–176. <https://doi.org/10.29244/jai.2021.9.2.166-176>
- Soo, A. H., Amahkea, m. g. s., & Matehoky, g. j. (2021). Jurnal Simetrik. *Jurnal Simetrik*, 11(1), 432–439.
- Sukowati, A. I., & Rahmah, L. M. (2026). *Density-Optimized Lookup Table with Piecewise Linear Interpolation for ESP32 ADC Precision Enhancement*. 08(01), 56–64.
- Tadeusz Haponiuk, J. T., Kucińska-Lipka, J., Rafał Kędzia, J., & Maria Sitko, A. (2022). *Natural Rubber Latex - Origin, Specification and Application* (G. Akın Evingür & Ö. Pekcan (eds.)). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107985>
- Vilasó-Cadre, J. E., Hidalgo, J., Arada-Pérez, M. A., Reyes-Domínguez, I. A., Turdean, G. L., Cruz, R., Piña Leyte-Vidal, J. J., González-Fernández, L. A., Sánchez-Polo, M., & Hidalgo, L. (2025). Electrodes for pH Sensing Based on Stainless Steel: Mechanism, Surface Modification, Potentiometric Performance, and Prospects. In *Chemosensors* (Vol. 13, Issue 5, p. 160). <https://doi.org/10.3390/chemosensors13050160>
- Walteros-León, M., & Álvarez-Láinez, M. L. (2022). Colloidal and rheological properties of natural rubber latex concentrated with hydroxyethyl cellulose and sodium dodecyl sulphate. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(17), 52034. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.52034>
- Wei, Y.-C., Zhu, D., Xie, W.-Y., Xia, J.-H., He, M.-F., & Liao, S. (2022). In-situ

observation of spatial organization of natural rubber latex particles and exploring the relationship between particle size and mechanical properties of natural rubber. *Industrial Crops and Products*, 180, 114737. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114737>

Zhao, L., Xing, P., Zhao, L., Yang, Q., Song, Y., Ding, L., Zhao, T., Wang, Y., Xin, Z., & Gui, H. (2025). Optimization Study of a High-Efficiency Preservative for Ammonia-Free Concentrated Natural Rubber Latex. In *Polymers* (Vol. 17, Issue 2, p. 188). <https://doi.org/10.3390/polym17020188>

LAMPIRAN

1.Kode program esp32

```

// [1] IMPORT LIBRARY UTAMA
#include <Wire.h> // Komunikasi I2C (untuk ADS1115 & OLED)
#include <Adafruit_GFX.h> // Library Grafis Layar
#include <Adafruit_SSD1306.h> // Driver Layar OLED SSD1306
#include <Adafruit_ADS1X15.h> // Driver ADC Eksternal ADS1115 (16-bit)
#include <OneWire.h> // Komunikasi Satu Kabel (untuk DS18B20)
#include <DallasTemperature.h> // Driver Sensor Suhu Precision
#include <WiFi.h> // Protokol Nirkabel ESP32
#include <PubSubClient.h> // Protokol Komunikasi IoT MQTT

// [2] DEFINISI PIN & PARAMETER FISIK (SESUAI BAB 3.3 SKRIPSI)
#define PIN_SUHU 4 // DS18B20 terhubung ke GPIO 4
#define PIN_TOMBOL 13 // Tombol On/Off di handle kiri (GPIO 13)
#define OLED_RESET -1 // Reset OLED (tidak digunakan)
#define ALAMAT_OLED 0x3C // Alamat I2C OLED standar
#define ALAMAT_ADS 0x48 // Alamat I2C ADS1115 (Pin ADDR ke GND)

// [3] KONFIGURASI WIFI & BROKER MQTT
const char* WIFI_SSID = "eka"; // Nama Hotspot Mas Eka
const char* WIFI_PASS = "1234567890"; // Kata Sandi Hotspot
const char* MQTT_BROKER = "broker.hivemq.com";
const int MQTT_PORT = 1883;
const char* TOPIC_LATEKS = "skripsi/eka/lateks";

// [4] INISIALISASI OBJEK
WiFiClient espClient;
PubSubClient mqttClient(espClient);
Adafruit_SSD1306 oled(128, 64, &Wire, OLED_RESET);
Adafruit_ADS1115 ads1115;
OneWire oneWireSuhu(PIN_SUHU);
DallasTemperature sensorSuhu(&oneWireSuhu);

// [5] VARIABEL KALIBRASI & LOGIKA (RUMUS TRIPLE-POINT)
// Masukkan voltase hasil kalibrasi rill alat Mas Eka di sini
float voltAsam = 3.0693; // Voltase ADS saat pH 4.01
float voltNetral = 2.5950; // Voltase ADS saat pH 6.86
float voltBasa = 2.2520; // Voltase ADS saat pH 9.18

```

```

// [6] VARIABEL FILTER DIGITAL EMA (BIAR DATA STABIL)
// Sesuai Bab 3.5.1: Faktor Alpha 0.15
float alphaEMA = 0.15;
float filterPH = 7.0; // Penampung hasil filter pH
float filterTDS = 0.0; // Penampung hasil filter TDS

// [7] VARIABEL DATA SENSOR & STATUS
float dataPH = 0.0, dataTDS = 0.0, dataSuhu = 0.0;
float voltPHRaw = 0.0, voltTDSRaw = 0.0;
String kategoriMutu = "STANDBY";
volatile bool isSistemOn = true; // Status sistem (Aktif/Mati)
volatile unsigned long lastDebounce = 0; // Anti-noise tombol

// [8] MANAJEMEN WAKTU (NON-BLOCKING TIIMER)
unsigned long timeLogSerial = 0;
unsigned long timeSendMQTT = 0;
const long intervalSerial = 1000; // Update log tiap 1 detik
const long intervalMQTT = 8000; // Kirim data ke web tiap 8 detik

//
=====
// [FUNGSI A] HANDLE TOMBOL INTERRUPT (SISTEM WAKE-UP)
//
=====
void IRAM_ATTR toggleSistem() {
  unsigned long skrg = millis();
  if (skrg - lastDebounce > 300) { // Jeda 300ms agar tidak double click
    isSistemOn = !isSistemOn;
    lastDebounce = skrg;
  }
}

//
=====
// [FUNGSI B] REKONEKSI MQTT (PENGIRIMAN DATA GARANSI TERKIRIM)
//
=====
void hubungkanMQTT() {
  while (!mqttClient.connected() && isSistemOn) {
    Serial.println("[MQTT] Mencoba koneksi ke server...");
    String clientID = "ESP32_Eka_TI_" + String(random(0xffff), HEX);
  }
}

```

```

    if (mqttClient.connect(clientID.c_str())) {
        Serial.println("[MQTT] TERHUBUNG! Siap kirim telemetri.");
    } else {
        Serial.print("[MQTT] GAGAL, rc=");
        Serial.print(mqttClient.state());
        Serial.println(" -> Mencoba lagi dalam 5 detik..");
        delay(5000);
    }
}
}
}

//
=====
// [FUNGSI C] SETUP AWAL (INISIALISASI HARDWARE)
//
=====
void setup() {
    // Mas Eka wajib set Serial Monitor ke 115200 baud!
    Serial.begin(115200);
    delay(1000);

    Serial.println("\n--- INISIALISASI SISTEM SMART MONITORING LATEKS ---");

    // Inisialisasi I2C (Pin 21 SDA, 22 SCL) [cite: 1, 390]
    Wire.begin(21, 22);

    // Set Tombol dengan Interrupt
    pinMode(PIN_TOMBOL, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_TOMBOL), toggleSistem, FALLING);

    // Cek Layar OLED
    if (!oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, ALAMAT_OLED)) {
        Serial.println("[CRITICAL] OLED tidak terdeteksi!");
    }
    oled.clearDisplay();
    oled.setTextColor(WHITE);
    oled.setCursor(0, 10);
    oled.println("SISTEM STARTING...");
    oled.display();
}

```

```

// Cek ADS1115 (ADC 16-bit) [cite: 1, 90]
if (!ads1115.begin(ALAMAT_ADS)) {
  Serial.println("[CRITICAL] ADS1115 tidak merespon!");
}
ads1115.setGain(GAIN_ONE); // Range voltase +/- 4.096V

// Setup Sensor Suhu & WiFi
sensorSuhu.begin();
sensorSuhu.setWaitForConversion(false); // Mode non-blocking biar cepat

WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
Serial.print("[WIFI] Menyambungkan ke: "); Serial.println(WIFI_SSID);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
  delay(500);
  Serial.print(".");
}
Serial.println("\n[WIFI] Terhubung! IP: " + WiFi.localIP().toString());

mqttClient.setServer(MQTT_BROKER, MQTT_PORT);
Serial.println("--- SETUP SELESAI, MEMULAI LOOPING ---");
}

//
=====
// [FUNGSI D] LOOP UTAMA (PROSES SENSOR & LOGIKA)
//
=====
void loop() {
  // Hanya proses jika tombol dalam status ON
  if (isSistemOn) {
    if (!mqttClient.connected()) hubungkanMQTT();
    mqttClient.loop();

    // --- 1. AKUISISI DATA SENSOR (HARDWARE LEVEL) ---
    sensorSuhu.requestTemperatures();
    float suhuMentah = sensorSuhu.getTempCByIndex(0);
    if (suhuMentah > 0) dataSuhu = suhuMentah; else dataSuhu = 28.5; // Failsafe

    // Baca ADS1115 Kanal A2 (pH) & A3 (TDS) [cite: 1, 383, 390]

```

```

int16_t adcPH = ads1115.readADC_SingleEnded(2);
int16_t adcTDS = ads1115.readADC_SingleEnded(3);
voltPHRaw = ads1115.computeVolts(adcPH);
voltTDSRaw = ads1115.computeVolts(adcTDS);

// --- 2. IMPLEMENTASI FILTER EMA (SOFTWARE LEVEL) ---
// Rumus: EMA = (Alpha * Data_Sekarang) + ((1 - Alpha) * EMA_Sebelumnya)
filterPH = (alphaEMA * voltPHRaw) + ((1.0 - alphaEMA) * filterPH);
filterTDS = (alphaEMA * voltTDSRaw) + ((1.0 - alphaEMA) * filterTDS);

// --- 3. KONVERSI TDS (RUMUS RISET) ---
dataTDS = (133.42 * pow(filterTDS, 3)) - (255.86 * pow(filterTDS, 2)) + (857.39 *
filterTDS);
if (dataTDS < 0) dataTDS = 0;

// --- 4. KALIBRASI TRIPLE-POINT pH & ATC (METROLOGI LEVEL) [cite: 1, 414,
426] ---
float phCalculated;
// Logika Piecewise Linear: Cek voltase berada di segmen mana
if (filterPH >= voltNetral) {
// Segmen Asam (pH 4.01 - 6.86)
phCalculated = 6.86 - (filterPH - voltNetral) * (6.86 - 4.01) / (voltAsam -
voltNetral);
} else {
// Segmen Basa (pH 6.86 - 9.18)
phCalculated = 6.86 + (voltNetral - filterPH) * (9.18 - 6.86) / (voltNetral -
voltBasa);
}

// Kompensasi Suhu Otomatis (ATC) sesuai skripsi Bab 3.5.3 [cite: 1, 430]
dataPH = phCalculated + (0.03 * (dataSuhu - 25.0));
if (dataPH < 0) dataPH = 0.0; if (dataPH > 14) dataPH = 14.0;

//
=====
// [INTI SKRIPSI] 5. ALGORITMA MULTIBASIS THRESHOLDING
//
=====
/* * Logika ini menentukan status mutu berdasarkan kombinasi pH (Kritis)
* dan TDS (Pendukung) untuk mendeteksi manipulasi.
*/

```

```

if (dataPH <= 6.0) {
  kategoriMutu = "BURUK (ASAM)"; // Degradasi bakteri tinggi [cite: 1, 439]
}
else if (dataPH >= 9.0) {
  kategoriMutu = "AWET (AMONIA)"; // Penambahan amonia berlebih [cite: 1,
440]
}
else {
  // pH Normal (6.1 - 8.9), cek kemurnian fisik via TDS
  if (dataTDS <= 250) { // Batas ditingkatkan agar noise udara tak masuk
    kategoriMutu = "OPLOS AIR"; // Indikasi manipulasi volume [cite: 1, 444]
  }
  else if (dataTDS >= 800) {
    kategoriMutu = "KONTAMINASI"; // Indikasi pupuk/tanah pemberat [cite: 1,
445]
  }
  else {
    kategoriMutu = "PRIMA (OK)"; // Lateks murni sesuai standar [cite: 1, 446]
  }
}

```

```

// --- 6. TRIGGER DETEKSI CELUP (IMMERSION CONTROL) ---
// Jika TDS < 250, alat dianggap di udara (tidak mencelup)
bool isProbeImmersed = (dataTDS > 250.0);

```

```

// --- 7. DEBUGGING SERIAL & OLED UPDATE (INTERVAL 1 DETIK) ---
if (millis() - timeLogSerial >= intervalSerial) {
  timeLogSerial = millis();

  Serial.println("\n===== [DEBUG TELEMETRI LATEKS] =====");
  Serial.print("Suhu Cairan : "); Serial.print(dataSuhu, 1); Serial.println(" C");
  Serial.print("V_pH (EMA) : "); Serial.print(filterPH, 4); Serial.println(" V");
  Serial.print("pH Terhitung: "); Serial.println(dataPH, 2);
  Serial.print("TDS (EMA) : "); Serial.print(dataTDS, 0); Serial.println(" ppm");
  Serial.print("Mutu Final : "); Serial.println(kategoriMutu);
  Serial.print("Probe Status: "); Serial.println(isProbeImmersed ? "DICELUP" :
"DIANGKAT");
  Serial.println("=====");
}

```

```

oled.clearDisplay();
if (isProbeImmersed) {
  oled.setTextSize(2); oled.setCursor(0,0);
  oled.print("pH: "); oled.println(dataPH, 2);
  oled.setTextSize(1); oled.setCursor(0,25);
  oled.print("TDS : "); oled.print(dataTDS, 0); oled.println(" ppm");
  oled.print("Suhu : "); oled.print(dataSuhu, 1); oled.println(" C");
}

```

```

    oled.setCursor(0,50); oled.print("Mutu : "); oled.print(kategoriMutu);
  } else {
    oled.setTextSize(1); oled.setCursor(20, 25);
    oled.println("PROBE DIANGKAT");
    oled.setCursor(22, 40);
    oled.println("Siap Mengukur...");
  }
  oled.display();
}

// --- 8. TRANSMISI DATA MQTT KE DASHBOARD WEB (INTERVAL 8 DETIK) ---
// Syarat: Hanya kirim jika probe dicelup agar tidak nyampah data di web
if (isProbeImmersed && (millis() - timeSendMQTT >= intervalMQTT)) {
  timeSendMQTT = millis();

  // JSON Kunci huruf kecil agar sinkron dengan Dashboard Next.js Mas Eka
  String payload = "{";
  payload += "\"ph\":" + String(dataPH, 2) + ",";
  payload += "\"tds\":" + String(dataTDS, 0) + ",";
  payload += "\"temp\":" + String(dataSuhu, 1) + ",";
  payload += "\"mutu\":" + kategoriMutu + "\"";
  payload += "}";

  if (mqttClient.publish(TOPIC_LATEKS, payload.c_str())) {
    Serial.println(">>> [LOG] Data berhasil dipublikasikan ke Website!");
  } else {
    Serial.println(">>> [ERR] Gagal mengirim data ke Dashboard.");
  }
}

} else {
  // --- 9. MODE STANDBY (SISTEM OFF) ---
  if (millis() - timeLogSerial >= 1000) {
    timeLogSerial = millis();
    Serial.println("[STANDBY] Sistem Non-Aktif. Pencet tombol buat ON.");
    oled.clearDisplay();
    oled.setTextSize(2); oled.setCursor(15, 25);
    oled.println("OFF MODE");
    oled.display();
  }
}
}
}

```