

Rancang Bangun Sistem Deteksi Mutu Lateks Portabel Berbasis Iot Menggunakan Algoritma *Thresholding* PH Pada *Microcontroller* ESP32 Untuk Smart Monitoring

Eka Syarif Maulana¹, Mulkan Azhari²

^{1,2}Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

Email: eka.ckp16799@gmail.com

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*.

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.

PENDAHULUAN

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 & Syarif, 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.

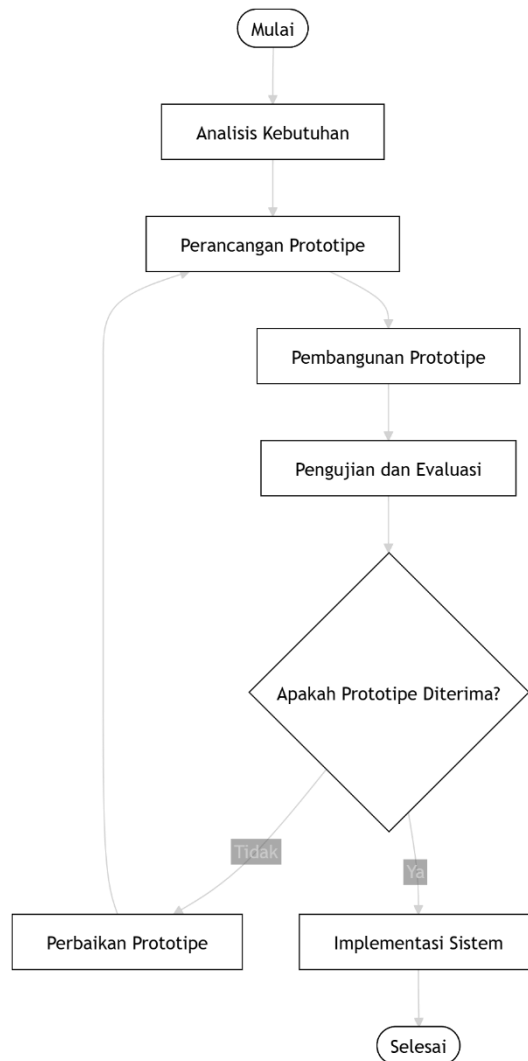
METODE PENELITIAN

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.

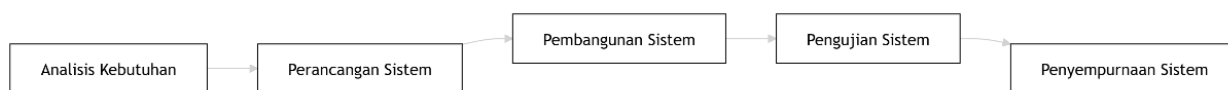
Pemilihan model prototipe juga didasarkan pada kebutuhan teknis untuk mengintegrasikan komponen elektronik presisi dengan sampel biologis yang kompleks. Dalam konteks ini, sistem tidak hanya dituntut mampu bekerja secara fungsional, tetapi juga harus menghasilkan data yang akurat dan stabil pada kondisi 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 1 Diagram Alir Model Pengembangan Sistem Prototipe

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 2 Diagram Alur Tahapan Pengembangan Sistem

HASIL DAN PEMBAHASAN

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 3 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.

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 memutuskan jalur analog internal ESP32 dan mengalihkan seluruh tugas akuisisi sinyal kepada perifer 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 ± 6.144 V, resolusi deteksi terkecil (1 LSB - Least Significant Bit) dipertajam menjadi:

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

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.

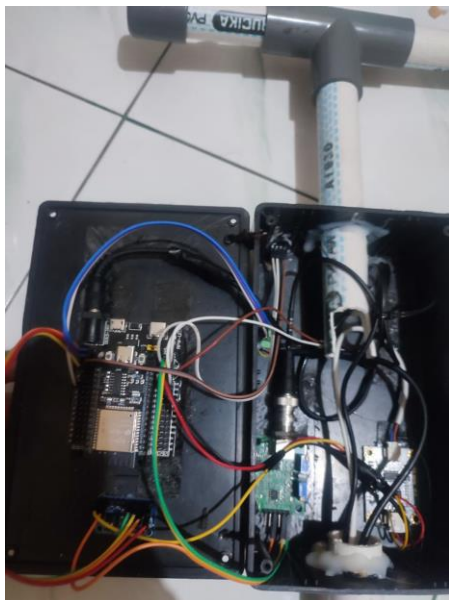
Integrasi perangkat keras dikonfigurasi melalui topologi bus antarmuka berseri I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Modul ADS1115 dipetakan ke mikrokontroler ESP32 menggunakan Pin GPIO 21 sebagai jalur SDA (*Serial Data*) dan Pin GPIO 22 sebagai jalur SCL (*Serial Clock*). Sensor elektrokimia pH dikonfigurasi 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*).

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 Detail Kompartemen Unit Kendali (IoT Box)

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:

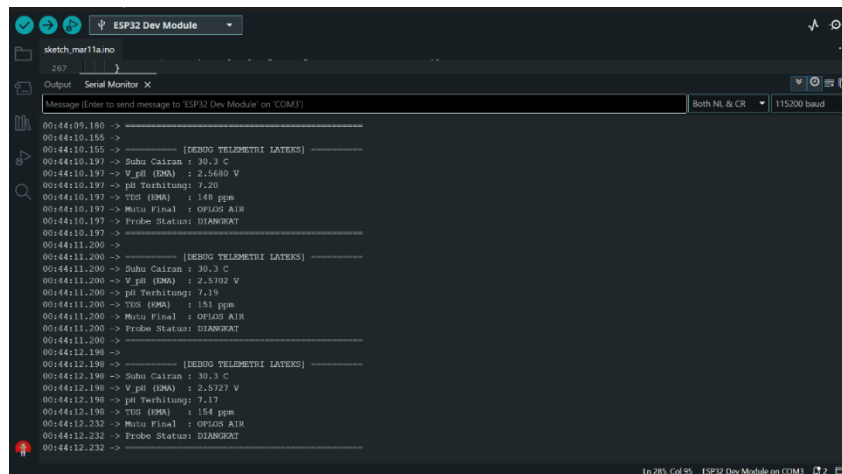
$$EMA_t = \alpha \cdot X_t + (1 - \alpha) \cdot EMA_{t-1} \quad 4.2$$

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 5 Log Debugging Serial Monitor

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

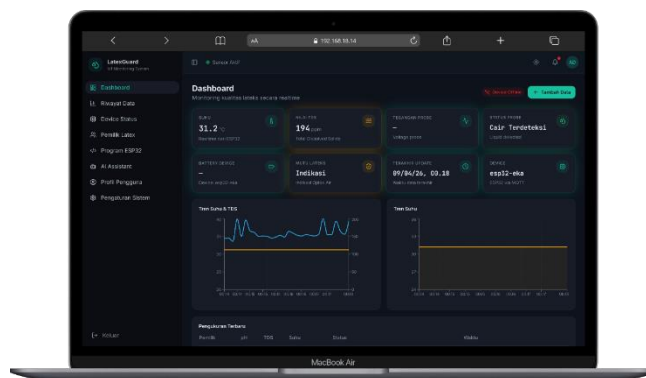
aksesibilitas dan kemudahan pengawasan korporat atau koperasi petani dari jarak jauh, dikembangkanlah sistem *Dashboard Monitoring* berbasis antarmuka web.

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 menyoroiti 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 6 Antarmuka *Dashboard* Monitoring Real-time Berbasis Web (LatexGuard)

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.

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 kuadrat 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 1 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: Pembusukan 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.

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 asalnya 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 kiloan 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 $pH \geq 9.0$. Logika hirarkis *firmware* mengonfirmasi cairan lateks ini melalui penyajian hasil AWET (AMONIA), menjustifikasi sampel sesuai kualifikasi.

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 antenna 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 penerbit-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 antrian 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.

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).

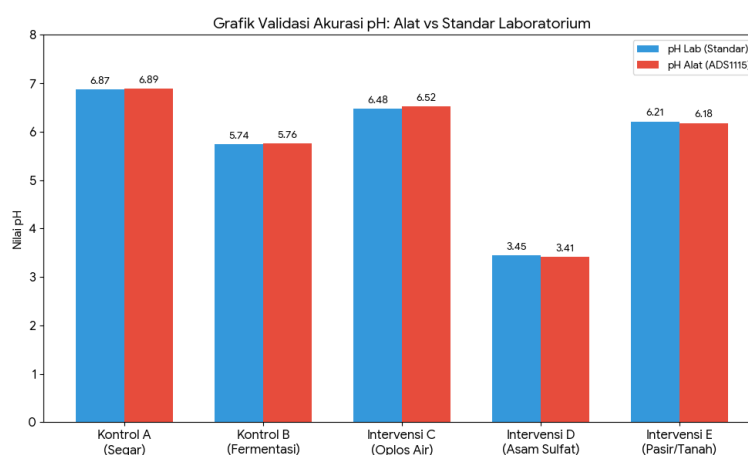
Di dalam paradigma tradisional pedesaan Nusantara selama puluhan dekade berturut-turut, justifikasi taksasi kualifikasi harga BOKAR di lantai farm gate masih mengacu kepada standardisasi evaluasi yang tak terukur secara objektif, melainkan bertumpu sepenuhnya kepada praktik penilaian subyektif dari panca 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 terbatas 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 7 Grafik Validasi Akurasi pH

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.

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 ADOPTSI 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. Akin 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>.