

Kalibrasi Sensor Analog IoT Terintegrasi *pH*, DO, Suhu dan TDS untuk Penentuan *Water Quality Index*

Agus Hartanto^{1*}, Lenny Margaretta Huizen², Charis Maulana³

¹Semarang University/Fakultas Teknologi Informasi dan Komunikasi

Jl. Soekarno-Hatta Tlogosari Semarang 50196, Telp/fax: +62246702757, e-mail: univ_smg@usm.ac.id

²Semarang University/Fakultas Teknologi Informasi dan Komunikasi

Jl. Soekarno-Hatta Tlogosari Semarang 50196, Telp/fax: +62246702757, e-mail: lenny@usm.ac.id

³Semarang University/Fakultas Teknologi Informasi dan Komunikasi

Jl. Soekarno-Hatta Tlogosari Semarang 50196, Telp/fax: +62246702757, e-mail: charis@usm.ac.id

ARTICLE INFO

History of the article:

Received 26 Juni 2026

Received in revised form 27 Juli 2026

Accepted 30 Juli 2026

Available online 12 Agustus 2026

Keywords:

Kalibrasi sensor analog, ESP32, *IoT*, *pH*, DO, TDS, Kualitas air.

* Correspondence:

Telepon :

-

E-mail:

agushartx@gmail.com

ABSTRACT

Pencemaran air merupakan masalah lingkungan yang serius di Indonesia, sehingga diperlukan sistem pemantauan kualitas air secara *real-time* yang akurat. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan integrasi empat sensor analog, yaitu *pH*, *Dissolved*

Oxygen (DO), suhu (DS18B20), dan Total *Dissolved Solids* (TDS). Sistem ini dirancang dengan arsitektur berlapis yang mencakup *sensing layer*, *edge processing*, *communication layer* berbasis protokol MQTT pada server Linux Ubuntu dengan broker *Mosquitto*, serta *application & storage layer* menggunakan database *MySQL* dan antarmuka web berbasis *Laravel* dengan visualisasi *real-time* menggunakan *JavaScript* dan *CSS*. Kalibrasi sensor dilakukan melalui pendekatan *multi-point calibration* dengan regresi linier dan *polinomial*, disertai kompensasi suhu serta digital *filtering* (median filter dan *Exponential Moving Average*). Evaluasi performa dilakukan melalui 30 kali pengukuran simultan terhadap instrumen standar laboratorium, menghasilkan rata-rata akurasi sistem sebesar 90,9% dengan nilai R^2 berkisar antara 0,806 hingga 0,956. Parameter TDS dan suhu menunjukkan akurasi terbaik masing-masing 94,2% dan 93,3%, sementara *pH* dan DO mencapai 86,8% dan 89,3%. Metode kalibrasi *multi-point* berbasis regresi matematis dan kompensasi suhu yang diusulkan mampu meningkatkan akurasi sensor analog berbiaya rendah secara signifikan. Sistem ini memberikan kontribusi pada pengembangan metode kalibrasi sensor untuk pemantauan kualitas air berbasis *IoT*, dengan validasi awal yang menunjukkan potensi penerapan sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 dan *Sustainable Development Goal* (SDG) 6.

PENDAHULUAN

Sensor analog yang digunakan dalam sistem pemantauan kualitas air sering mengalami fenomena *drift*, *noise*, dan pengaruh suhu yang signifikan, terutama ketika diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 12-bit. Keterbatasan resolusi ADC ESP32 (sekitar 0–3,3 V) serta interferensi elektromagnetik dan variasi lingkungan tropis di Indonesia menyebabkan ketidakakuratan dalam konversi sinyal tegangan menjadi nilai parameter fisik. Oleh karena itu, kalibrasi yang sistematis dan komprehensif menjadi langkah krusial untuk memastikan keandalan data. Penelitian terkini menunjukkan bahwa tanpa kalibrasi yang tepat, sensor *pH*, *Dissolved Oxygen* (DO), suhu (DS18B20), dan *Total Dissolved Solids* (TDS) dapat menghasilkan deviasi hingga 10–20% dibandingkan instrumen standar laboratorium. Pendekatan kalibrasi *two-point* atau *multi-point calibration* menggunakan larutan standar (*buffer pH* 4,0; 7,0; 10,0; larutan KCl untuk TDS; dan aerasi/*zero-oxygen* untuk DO) guna mengatasi non-linearitas dan pengaruh suhu. Kompensasi suhu dengan koefisien $\alpha \approx 0,02/^{\circ}\text{C}$ untuk konduktivitas serta model regresi linier dan *polynomial* telah terbukti meningkatkan akurasi secara signifikan [1]

Beberapa studi terdahulu telah mengembangkan sistem *monitoring* kualitas air berbasis *IoT*. Dengan mengintegrasikan sensor *turbidity*, *pH*, DO, EC/TDS, dan suhu pada ESP32 dengan transmisi data ke platform *ThingSpeak*, namun fokus utama studi tersebut adalah pada integrasi sistem dan visualisasi *cloud*, bukan pada metodologi kalibrasi sensor. Pada penelitian terdahulu mengembangkan sistem *multi-sensor* dengan teknik kalibrasi, tetapi validasi dilakukan dalam jumlah sampel terbatas dan tanpa analisis WQI. Sementara itu, sementara penelitian lain melaporkan sistem *low-cost multi-parameter* dengan fokus pada desain *hardware*, tanpa pembahasan mendalam tentang metode kalibrasi matematis dan evaluasi metrik kesalahan [1]. Pada penelitian lain membahas optimasi kalibrasi pada sistem *IoT*, namun terbatas pada parameter tunggal [2]. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan metode kalibrasi *multi-point* komprehensif yang mengintegrasikan regresi linier dan *polynomial*, kompensasi suhu *real-time*, digital *filtering* (median dan EMA), serta analisis metrik kesalahan (RMSE, MAE, R^2) secara simultan untuk empat parameter kualitas air (*pH*, DO, TDS, suhu) pada platform ESP32, yang divalidasi melalui pengukuran terhadap instrumen standar laboratorium dan dilengkapi perhitungan WQI untuk penilaian kualitas air terintegrasi.

Penelitian ini menyajikan metode kalibrasi komprehensif untuk keempat sensor tersebut, yang meliputi proses akuisisi data ADC, penerapan *filtering* (median dan *Exponential Moving Average*), perhitungan regresi *least-squares*, serta analisis metrik kesalahan seperti *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Error* (MAE). Selain itu, pembahasan diperkaya dengan analisis statistik deskriptif, korelasi Pearson antar parameter, dan perhitungan *Water Quality Index* (WQI) tipe NSF maupun CCME. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keandalan pengukuran di lapangan, tetapi juga mendukung implementasi sistem *IoT* berbasis ESP32 yang *real-time* yang dapat dikembangkan lebih lanjut [3].

Pencemaran air permukaan merupakan salah satu ancaman lingkungan paling mendesak di Indonesia. Data pemantauan mutu air Semester I 2025 menunjukkan bahwa 70,7% dari 4.482 lokasi pemantauan pada 1.482 sungai tercemar, sementara hanya 29,3% yang memenuhi baku mutu [4]. Sungai-sungai utama di wilayah Jabodetabek, Citarum, dan Brantas terus mengalami degradasi kualitas akibat limbah domestik, industri, dan pertanian, yang berdampak pada kesehatan masyarakat, keberlanjutan akuakultur, serta pencapaian *Sustainable Development Goal* (SDG) 6 tentang air bersih dan sanitasi. Pemantauan konvensional yang mengandalkan pengambilan sampel manual dan analisis laboratorium bersifat sporadis, mahal, dan tidak mampu menyediakan data *real-time* yang diperlukan untuk respons cepat terhadap fluktuasi parameter kualitas air [5].

Meskipun teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi potensial, implementasi sistem pemantauan kualitas air berbasis mikrokontroler ESP32 masih menghadapi berbagai

tantangan teknis yang signifikan. Sensor analog yang umum digunakan seperti *pH*, *Dissolved Oxygen* (DO), suhu (DS18B20), dan *Total Dissolved Solids* (TDS) rentan terhadap *drift*, *noise*, dan pengaruh suhu lingkungan tropis. *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 12-bit pada ESP32 memiliki resolusi terbatas (0–3,3 V) dan *linearitas* yang tidak sempurna, khususnya di rentang tegangan rendah dan tinggi, sehingga sering menghasilkan deviasi pengukuran hingga 10–20% tanpa kalibrasi yang tepat [2].

Masalah utama pertama adalah ketidakakuratan konversi sinyal analog menjadi nilai fisik. Sensor *pH* memerlukan kalibrasi *multi-point* dengan *buffer* standar, namun *noise* ADC dan variasi suhu menyebabkan ketidakstabilan *slope* dan *intercept*. Sensor TDS bergantung pada pengukuran konduktivitas yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu (koefisien $\alpha \approx 0,02/^\circ\text{C}$), sementara sensor DO memerlukan kompensasi berdasarkan *Henry's Law* yang kompleks akibat fluktuasi tekanan dan suhu. Tanpa model matematis yang komprehensif (regresi linier/*polynomial*, *filtering* median/EMA, dan kompensasi *real-time*), data yang dihasilkan tidak dapat diandalkan untuk evaluasi *Water Quality Index* (WQI) atau pengambilan keputusan. Masalah kedua adalah kurangnya pendekatan kalibrasi dan validasi yang sistematis di konteks Indonesia. Sebagian besar studi sebelumnya dilakukan di laboratorium terkendali, sedangkan kondisi tropis mempercepat *drift* sensor dan *biofouling*, sehingga memerlukan protokol kalibrasi berkala dan model kompensasi yang disesuaikan. Selain itu, integrasi analisis statistik (RMSE, MAE, korelasi Pearson) dan perhitungan WQI (NSF atau CCME) secara otomatis masih terbatas pada sistem berbasis ESP32 [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi celah-celah tersebut melalui pengembangan sistem pemantauan kualitas air berbasis *IoT* yang komprehensif. Secara spesifik, penelitian ini merumuskan permasalahan sebagai berikut:

- Bagaimana merancang metode kalibrasi *multi-point* berbasis regresi matematis dan kompensasi suhu untuk sensor analog *pH*, DO, suhu, dan TDS pada ESP32 agar mencapai akurasi >90% di lingkungan tropis.
- Bagaimana mengintegrasikan akuisisi data menggunakan bahasa C pada ESP32 dengan arsitektur komunikasi MQTT (*Mosquitto* di Ubuntu Server), penyimpanan *MySQL*, dan visualisasi *real-time* berbasis *Laravel* serta *JavaScript*.
- Bagaimana mengevaluasi performa sistem secara holistik melalui metrik teknis, analisis statistik, dan *Water Quality Index* untuk mendukung pemantauan berkelanjutan.

Metode kalibrasi sensor yang tervalidasi serta sistem *IoT* yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk pengelolaan sumber daya air di Indonesia. Pendekatan ini tidak hanya mengatasi keterbatasan teknis sensor analog, tetapi juga mendukung transisi dari pemantauan manual menuju sistem berbasis data *real-time* yang andal.

Pemantauan kualitas air berbasis *Internet of Things* (IoT) telah mengalami kemajuan pesat sejak awal dekade 2020-an, didorong oleh kebutuhan akan data *real-time* untuk pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan di tengah meningkatnya tekanan antropogenik. Mikrokontroler ESP32, dengan kemampuan *Wi-Fi/Bluetooth* terintegrasi, *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 12-bit, dan biaya rendah, muncul sebagai platform utama dalam sistem *monitoring* ini. Berbagai studi menunjukkan bahwa ESP32 mampu mengintegrasikan sensor analog seperti *pH*, *Dissolved Oxygen* (DO), suhu (DS18B20), dan *Total Dissolved Solids* (TDS) untuk aplikasi pemantauan sungai, akuakultur, dan air minum di lingkungan tropis.

Studi-studi terkini secara konsisten mendokumentasikan keunggulan ESP32 dibandingkan mikrokontroler generasi sebelumnya. Dalam penelitian yang dipublikasikan di *IoT*, sistem berbasis ESP32 dengan integrasi sensor *turbidity*, *pH*, DO, EC/TDS, dan suhu berhasil mengirimkan data ke platform *ThingSpeak* untuk visualisasi *real-time*. Arsitektur sistem umumnya terdiri dari tiga lapisan: *sensing layer* (sensor dan ADC), *network layer* (Wi-Fi/MQTT), dan *application layer* (*cloud dashboard*). Keunggulan ESP32 terletak pada kemampuan pemrosesan *edge computing*

sederhana dan konsumsi daya rendah, meskipun ADC internalnya rentan terhadap *noise*, sehingga memerlukan *filtering* dan kalibrasi yang ketat.

Kalibrasi Sensor *pH* merupakan salah satu aspek yang paling banyak dibahas. Sensor *pH* analog (berbasis elektroda kaca) memerlukan *multi-point calibration* menggunakan *buffer* standar *pH* 4,0; 7,0; dan 10,0 (NIST-*traceable*). Model regresi linier (*least-squares*) digunakan untuk menentukan *slope* (*m*) dan *intercept* (*b*):

$$pH = m \times V_{avg} + b + offset \quad (1)$$

di mana V_{avg} diperoleh setelah penerapan *median filter* atau *Exponential Moving Average* (EMA) untuk mengurangi *noise* ADC ESP32. Beberapa penelitian melaporkan akurasi pasca-kalibrasi mencapai $\pm 0,2$ unit *pH*, dengan RMSE rendah (Alahi et al., 2025).

Untuk sensor TDS (berbasis konduktivitas/EC), *polynomial regression* dan kompensasi suhu menjadi elemen krusial. Model konversi umum mengadopsi rumus *DFRobot* atau variasinya:

$$TDS(ppm) = 133.42 \times EC3 - 255.86 \times EC2 + 857.39 \times EC \quad (2)$$

dengan kompensasi suhu:

$$C_{25} = \frac{EC_T}{1 + \alpha(T-25)}, \quad \alpha \approx 0,02/^{\circ}C \quad (3)$$

Studi di lingkungan tropis menekankan pentingnya kompensasi ini karena fluktuasi suhu yang tinggi dapat menyebabkan deviasi hingga 15–20% tanpa koreksi. Kalibrasi dilakukan dengan larutan standar KCl 1413 $\mu S/cm$ atau rentang 0–1000 ppm.

Sensor *Dissolved Oxygen* (DO) analog (*galvanic* atau *optical*) sangat sensitif terhadap suhu dan tekanan atmosfer. Kalibrasi *two-point* melibatkan larutan *zero-oxygen* (Na_2SO_3) dan 100% *saturation* melalui aerasi, dikombinasikan dengan kompensasi berdasarkan *Henry's Law* atau *lookup table* dari *datasheet*. Integrasi dengan sensor suhu DS18B20 untuk kompensasi real-time telah terbukti meningkatkan reliabilitas pengukuran di sistem ESP32 [7].

Sensor suhu DS18B20 (digital) memberikan akurasi dasar $\pm 0,5^{\circ}C$ dan sering digunakan sebagai referensi untuk kompensasi parameter lain. Meskipun demikian, regresi linier terhadap termometer standar tetap diterapkan untuk koreksi *sistemik* dalam *setup multi-sensor* [8].

Untuk evaluasi holistik, *Water Quality Index* (WQI) banyak diadopsi sebagai agregasi matematis. Metode NSF-WQI menggunakan pendekatan *weighted arithmetic*:

$$WQI = \sum_{i=1}^n w_i \times q_i \quad (4)$$

di mana w_i adalah bobot relatif dan q_i adalah sub-indeks (0–100) yang dihitung melalui kurva *rating* atau interpolasi. Sementara itu, CCME-WQI lebih fleksibel dan cocok untuk data *time-series*:

$$CCMEWQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (5)$$

Dengan F_1 (*scope*), F_2 (*frequency*), dan F_3 (*amplitude of excursions*). Beberapa studi ESP32 mengintegrasikan WQI untuk klasifikasi otomatis dan peringatan dini. Tinjauan literatur juga mengungkap tantangan umum: sensor *drift* jangka panjang, *biofouling* di lapangan, interferensi antar-sensor, dan keterbatasan resolusi ADC ESP32. Solusi yang diusulkan mencakup penggunaan *external ADC* (ADS1115) untuk resolusi 16-bit, integrasi *TinyML* untuk deteksi anomali, serta desain *enclosure waterproof* dengan pemeliharaan rutin. Di konteks Indonesia,

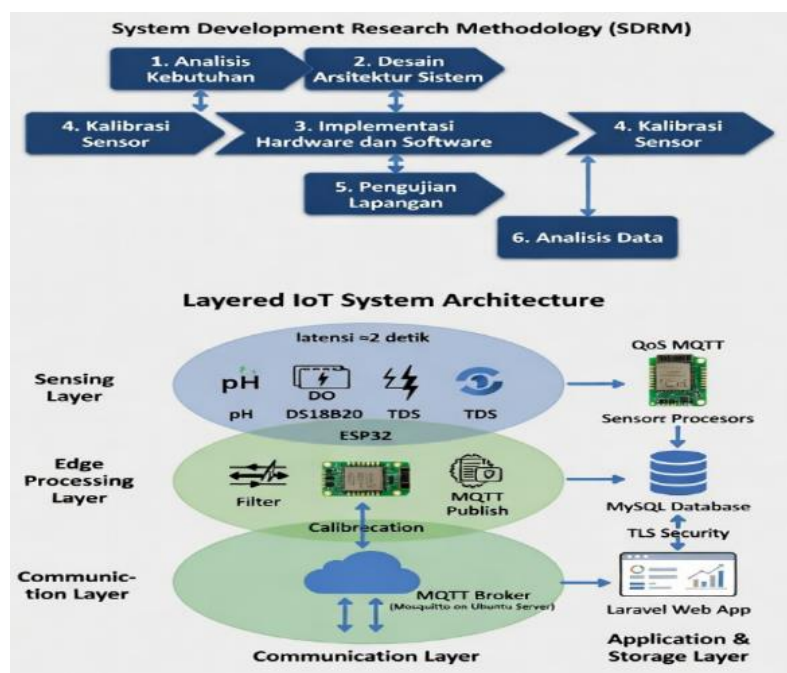
sistem serupa telah diuji untuk pemantauan danau dan sungai, menunjukkan potensi besar untuk mendukung regulasi PP No. 22/2021 dan *Sustainable Development Goal* (SDG) 6. Secara keseluruhan, pada penelitian terkini menegaskan bahwa kalibrasi sistematis berbasis regresi matematis dan kompensasi suhu merupakan fondasi keberhasilan sistem *IoT* berbasis ESP32. Penelitian ini melengkapi celah yang ada dengan fokus komprehensif pada keempat sensor analog utama, disertai analisis metrik kesalahan (RMSE, MAE) dan integrasi WQI, sehingga memberikan kontribusi ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan untuk implementasi di negara berkembang [9][10].

METODE PENELITIAN

1. Desain Arsitektur Sistem

Penelitian ini mengadopsi pendekatan *System Development Research Methodology* (SDRM) Sistem ini dirancang dengan arsitektur berlapis (*layered architecture*) yang terdiri dari empat lapisan utama: *sensing layer*, *edge processing layer*, *communication layer*, dan *application & storage layer*. *Sensing layer* mencakup sensor analog pH, Dissolved Oxygen (DO), suhu (DS18B20), dan Total Dissolved Solids (TDS) yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. *Edge processing* dilakukan di ESP32 menggunakan bahasa pemrograman C untuk akuisisi data, *filtering*, kalibrasi, dan publikasi ke broker MQTT.

Communication layer memanfaatkan protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) yang ringan dan efisien untuk transmisi data *real-time*. Data disimpan dalam basis data MySQL dan ditampilkan melalui aplikasi web berbasis *Laravel* dengan visualisasi *real-time* menggunakan *JavaScript* dan CSS. Desain ini memastikan latensi rendah (< 2 detik) dan ketahanan terhadap gangguan jaringan melalui mekanisme *Quality of Service* (QoS) MQTT level 1 dan 2. Diagram blok sistem menggambarkan alur data dari sensor hingga *dashboard* pengguna, dengan penekanan pada *redundansi* dan keamanan (TLS untuk MQTT)[11]. Penjelasan mengenai arsitektur sistem dan metodologi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur sistem dan metodologi

2. Perangkat Keras

Mikrokontroler utama adalah ESP32 DevKit V1 yang dilengkapi *dual-core Xtensa LX6*, Wi-Fi 802.11 b/g/n, dan ADC 12-bit. Sensor analog dihubungkan melalui *pin* ADC (GPIO 32–36) dengan level *shifter* untuk penyesuaian tegangan. Perlu diklarifikasi bahwa *external* ADC ADS1115 (16-bit) tidak digunakan dalam eksperimen utama penelitian ini; seluruh pengukuran dilakukan menggunakan ADC internal ESP32 12-bit. ADS1115 direkomendasikan sebagai opsi peningkatan untuk pengembangan selanjutnya guna meningkatkan resolusi dan mengurangi *noise*. Sensor yang digunakan meliputi pH (*Gravity Analog*), DO (*galvanic*), TDS (berbasis EC), dan DS18B20 (*OneWire digital*). Modul *power* menggunakan XL6009. Pengujian *hardware* mencakup pengukuran konsumsi daya (rata-rata < 150 *mA* saat aktif) dan ketahanan lingkungan (suhu 25–35°C, kelembaban 70–90%). Kalibrasi *hardware* dilakukan di Balai Benih Ikan Kota Semarang menggunakan larutan standar sebelum pengujian.

3. Implementasi Perangkat Lunak pada ESP32 (Bahasa C)

Firmware ESP32 dikembangkan menggunakan *Arduino IDE* dengan bahasa C dan pustaka ESP32 *core*. Kode utama mencakup *inisialisasi* sensor, pembacaan ADC dengan *oversampling* (50 sampel per pengukuran), penerapan median filter dan *Exponential Moving Average* (EMA) untuk mengurangi *noise*:

```
float readAnalogSensor(int pin) {
    float sum = 0;
    for(int i = 0; i < 50; i++) {
        sum += analogRead(pin);
        delay(2);
    }
    return sum / 50;
}
```

Fungsi kalibrasi regresi linier dan *polynomial* diterapkan secara *real-time*. Data dikemas dalam format JSON dan dipublikasikan ke topik MQTT setiap 10 detik menggunakan pustaka *PubSubClient*. Manajemen koneksi Wi-Fi dan *reconnect* otomatis diimplementasikan untuk meningkatkan reliabilitas.

4. Server MQTT Berbasis Linux Ubuntu dengan Mosquitto

Broker MQTT *Mosquitto* diinstal pada server Ubuntu 22.04 LTS untuk menangani komunikasi *publish-subscribe*. Konfigurasi meliputi *otentikasi username/password*, enkripsi TLS/SSL, dan *persistence database* untuk menghindari kehilangan data. *Mosquitto* berjalan sebagai *service systemd* dengan *QoS* yang disesuaikan:

- a. *QoS* 0 untuk data non-kritis
- b. *QoS* 1 untuk data sensor utama

Server dikonfigurasi dengan aturan *firewall* (UFW) dan *monitoring* log untuk keamanan. Integrasi dengan ESP32 dilakukan melalui *library* MQTT.

5. Database MySQL

Data dari broker MQTT *unsubscribe* oleh *worker Laravel* dan disimpan ke *database MySQL* 8.0. Skema *database* mencakup tabel `'sensor_readings'` (*id*, *timestamp*, *ph_value*, *do_value*, *temperature*, *tds_value*, *wqi*, *location*) dengan indeks pada kolom *timestamp* dan *location* untuk *query* cepat. Prosedur *stored procedure* digunakan untuk perhitungan WQI secara otomatis. Backup otomatis dan replikasi diatur untuk menjamin integritas data.

6. Aplikasi Web (Laravel, JavaScript, dan CSS)

Backend dikembangkan menggunakan *framework* Laravel 13 dengan PHP 8.2. *Controller* MQTT *subscriber* menggunakan pustaka *phpMQTT* atau *Laravel Echo* untuk *real-time update*. Data diolah dengan model *Eloquent* dan disajikan melalui *RESTful API*. *Frontend* memanfaatkan *Blade template*, *JavaScript* (Chart.js dan Alpine.js) untuk grafik *real-time*, serta CSS *Tailwind* untuk antarmuka responsif yang *user-friendly*. *Dashboard* menampilkan grafik waktu nyata, *threshold alert* (misalnya $pH < 6$ atau > 9), dan perhitungan WQI secara otomatis. *Autentikasi* dan *role-based access control* (RBAC) diimplementasikan untuk keamanan.

7. Prosedur Kalibrasi dan Analisa

Pengujian sistem dilakukan dalam tiga tahap: unit testing (sensor dan kode), *integration testing* (MQTT + *database*), dan pengujian laboratorium di Balai Benih Ikan Kota Semarang. Sebanyak 30 sampel air diambil dari berbagai sumber (akuakultur, air permukaan) dan diukur secara simultan menggunakan sensor *IoT* dan instrumen standar laboratorium sebagai referensi. Instrumen referensi yang digunakan meliputi: *pH* meter Hanna Instruments HI98107 (akurasi $\pm 0,1$ pH), DO meter Lutron DO-5510 (akurasi $\pm 0,2$ mg/L), TDS meter Hanna HI98301 (akurasi $\pm 2\%$ FS), dan termometer digital standar (akurasi $\pm 0,1^\circ\text{C}$). Durasi pengambilan data untuk setiap sampel adalah 5 menit dengan interval pembacaan 10 detik, menghasilkan rata-rata 30 titik data per sampel yang kemudian dirata-ratakan. Pengujian dilakukan pada kondisi suhu ruang $27\text{--}33^\circ\text{C}$ dengan kelembaban 70–90%.

Metrik performa sistem *IoT* dievaluasi melalui pengukuran *latency* transmisi data (dari ESP32 ke *dashboard*), *packet loss*, dan *uptime server* selama periode pengujian. Uji *latency* dilakukan dengan mencatat *timestamp* pengiriman di ESP32 dan *timestamp* penerimaan di server *Laravel*. Uji *packet loss* dilakukan dengan membandingkan jumlah data terkirim (ESP32 log) dengan data diterima (*database*) selama 30 menit pengujian kontinu.

8. Metode Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor merupakan tahap krusial dalam memastikan akurasi, presisi, dan reliabilitas data pada sistem pemantauan kualitas air berbasis *Internet of Things (IoT)*. Mengingat sebagian besar sensor yang digunakan bersifat analog, proses kalibrasi dilakukan melalui konversi tegangan *output* menjadi nilai parameter fisik yang bermakna secara ilmiah. Pendekatan ini mengintegrasikan prinsip *two-point* atau *multi-point calibration* dengan larutan standar yang *traceable* terhadap standar internasional (NIST atau IUPAC), model matematis regresi linier/*polynomial*, serta kompensasi suhu secara *real-time*. Metode ini dirancang khusus untuk mengatasi keterbatasan inheren mikrokontroler ESP32, seperti *noise* pada *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 12-bit, interferensi elektromagnetik, dan variasi lingkungan tropis di Indonesia yang ditandai dengan fluktuasi suhu serta kelembaban tinggi [12].

Proses kalibrasi dilaksanakan secara *iteratif* di laboratorium sebelum *deployment* lapangan, diikuti dengan validasi ulang secara berkala untuk mendeteksi fenomena *drift* sensor. Semua perhitungan diimplementasikan baik pada level *edge* (ESP32 dengan bahasa C) maupun di sisi server untuk *redundansi* komputasi. Pendekatan ini selaras dengan rekomendasi ISO 15839:2003 mengenai kinerja sensor analitik dalam pemantauan kualitas air.

8.1. Prinsip Umum Kalibrasi

Kalibrasi melibatkan pembacaan nilai ADC ESP32 (*analogRead()*), penerapan *oversampling* (10–50 sampel per pengukuran), dan *signal conditioning* untuk mengurangi *noise*. Model konversi umum mengikuti persamaan regresi linier sederhana atau polinomial orde lebih tinggi guna menangkap *non-linearity* sensor. Metrik evaluasi kesalahan yang digunakan

mencakup *Root Mean Square Error* (RMSE) dan *Mean Absolute Error* (MAE), dengan target akurasi keseluruhan di atas 90% dibandingkan instrumen referensi laboratorium [12][13][14].

8.2. Definisi dan Perhitungan Akurasi

Akurasi dalam penelitian ini dihitung berdasarkan deviasi relatif antara nilai sensor *IoT* terhadap nilai instrumen referensi laboratorium. Persentase akurasi untuk setiap parameter didefinisikan sebagai berikut :

$$Akurasi(\%) = \left(1 - \frac{NilaiSensor - NilaiReferensi}{NilaiReferensi}\right) \times 100\% \quad (6)$$

Perhitungan dilakukan untuk setiap sampel pengukuran ($n=30$), kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh akurasi rata-rata per parameter. Pendekatan ini dipilih karena memberikan interpretasi langsung tentang seberapa dekat hasil pengukuran sensor *IoT* terhadap nilai referensi dalam persentase. Untuk parameter kontinu seperti *pH*, DO, TDS, dan suhu, penggunaan persentase akurasi mengacu pada praktik yang umum digunakan dalam evaluasi performa sensor, dengan catatan bahwa nilai persentase sangat dipengaruhi oleh magnitudo nilai referensi [15]. Selain persentase akurasi, disajikan pula metrik RMSE, MAE, dan koefisien determinasi (R^2) untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang performa sensor.

8.3. Kalibrasi Sensor pH (Analog)

Sensor *pH* analog berbasis elektroda kaca (rentang 0–14) menghasilkan tegangan keluaran yang biasanya berada dalam kisaran 0–3,3 V setelah melalui level *shifter* dan *voltage divider* untuk kompatibilitas dengan ESP32. Karakteristik sensor ini bersifat linier, namun rentan terhadap *drift* akibat kontaminasi elektroda dan perubahan suhu.

Model Matematis (Regresi Linier):

$$pH = m \times V_{avg} + b + offset \quad (7)$$

Di mana V_{avg} merupakan nilai tegangan rata-rata setelah proses *filtering*. Parameter m (*slope*) dan b (*intercept*) diperoleh melalui metode *least-squares regression* dari data kalibrasi menggunakan tiga larutan *buffer* standar pH 4,0; 7,0; dan 10,0 (akurasi $\pm 0,01$ pH). *Offset* manual diterapkan apabila diperlukan untuk menyesuaikan bias sistem (umumnya berkisar -0,5 hingga +0,5) (Kim et al.,2021).

a. Langkah Kalibrasi:

- 1) Rendam sensor dalam larutan *buffer* selama 2–5 menit hingga pembacaan stabil.
- 2) Lakukan pembacaan ADC sebanyak 50 sampel dengan interval 2 ms.
- 3) Terapkan median filter atau *Exponential Moving Average* (EMA) untuk menghasilkan V_{avg} .
- 4) Hitung koefisien regresi menggunakan pustaka matematika di ESP32 atau server.
- 5) Validasi dengan larutan uji independen.

b. Metrik Kesalahan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (pH_{actual} - pH_{predicted})^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |pH_{actual} - pH_{predicted}| \quad (9)$$

RMSE = *Root Mean Square Error*

MAE = Mean Absolute Error

8.4. Kalibrasi Sensor TDS (Analog, Berbasis Konduktivitas/EC)

Sensor TDS mengukur konduktivitas listrik (*Electrical Conductivity/EC*) yang kemudian dikonversi menjadi Total *Dissolved Solids*. Sensor ini sangat sensitif terhadap suhu, sehingga kompensasi menjadi elemen yang sangat penting.

a. Model Matematis:

- 1) Konversi tegangan ke EC: $EC = f(V_{raw})$ (linier atau berdasarkan kalibrasi pabrik).
- 2) Kompensasi Suhu:

$$EC_{25} = \frac{EC_T}{1 + \alpha(T - 25)} \quad (10)$$

dengan $\alpha \approx 0,02/^\circ\text{C}$.

- 3) Konversi ke TDS: $\text{TDS}(\text{ppm}) = 133,42 \times EC - 255,86 \times EC^2 + 857,39 \times EC$ (rumus standar *DFRobot*) atau pendekatan linier sederhana $\text{TDS} \approx 0,5 \times EC$.
- b. Prosedur Kalibrasi: Larutan standar KCl 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dan rentang 0–1000 ppm digunakan untuk melakukan *polynomial regression* (orde 2 atau 3). Proses dilakukan pada suhu terkontrol (25°C) dengan validasi tambahan pada kondisi tropis ($28\text{--}32^\circ\text{C}$).

8.5. Kalibrasi Sensor Dissolved Oxygen (DO)

Sensor DO (*galvanic* atau *optical*) sangat dipengaruhi oleh suhu, tekanan barometrik, dan salinitas.

a. Model Matematis:

$$\text{DO} (\text{mg/L}) = \text{DO}_{\text{cal}} \times \frac{V_{\text{measured}}}{V_{\text{cal}}} \times f(T, P) \quad (11)$$

di mana $f(T, P)$ dihitung berdasarkan *Henry's Law* atau *lookup table* dari *datasheet* sensor, dengan kompensasi suhu *real-time* dari DS18B20.

b. Prosedur Kalibrasi:

- 1) Titik nol (Zero DO): Larutan natrium *sulfit* (Na_2SO_3) 0,1 M.
- 2) Titik saturasi (100%): Air aerasi selama 10–15 menit pada suhu stabil.
- 3) *Multi-point calibration* dilakukan pada berbagai tingkat saturasi.

8.6. Kalibrasi Sensor Suhu (DS18B20)

Meskipun bersifat digital dengan akurasi nominal $\pm 0,5^\circ\text{C}$, sensor ini dikoreksi menggunakan:

$$T_{\text{corrected}} = a \times T_{\text{raw}} + b \quad (12)$$

Melalui regresi linier terhadap termometer referensi kalibrasi.

8.7. Filtering dan Pre-processing Data

Untuk semua sensor analog, diterapkan *oversampling* dan *digital filtering*:

- a. Median Filter: Menghilangkan *outlier* secara efektif.
- b. *Exponential Moving Average* (EMA): Memberikan respons halus terhadap perubahan parameter.

Implementasi di ESP32 memastikan data yang dikirim ke broker MQTT telah terkoreksi dan siap untuk analisis lanjutan.

9. Analisis Matematis dan Statistik

9.1. Analisis Statistik Deskriptif

Data time-series yang terkumpul dianalisis menggunakan statistik deskriptif meliputi *mean* ($\bar{x}$), *standard deviation* (SD), *variance*, serta *confidence interval* pada tingkat kepercayaan di atas 90%. Analisis ini memberikan gambaran komprehensif mengenai distribusi dan variabilitas parameter kualitas air selama periode pengamatan.

9.2. Analisis Korelasi

Korelasi Pearson digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antar parameter:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

Contoh yang khas adalah korelasi negatif kuat antara suhu dan *Dissolved Oxygen* ($r \approx -0,7$ hingga $-0,85$), yang sesuai dengan prinsip kelarutan gas dalam air.

9.3. Water Quality Index (WQI)

Penelitian ini menggunakan metode CCME-WQI (*Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index*) sebagai metode utama perhitungan WQI. Pemilihan CCME-WQI didasarkan pada fleksibilitasnya dalam menangani jumlah parameter yang bervariasi dan kemampuannya mengakomodasi data *time-series* tanpa memerlukan kurva *rating* sub-indeks yang kompleks. Rumus CCME-WQI:

$$CCME - WQI = \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,273} \quad (14)$$

dengan:

- F1 (*Scope*): persentase parameter yang melampaui baku mutu minimal satu kali selama periode pengukuran.
- F2 (*Frequency*): persentase pengukuran individual yang melampaui baku mutu.
- F3 (*Amplitude*): besarnya pelampauan terhadap baku mutu, dihitung melalui *normalized sum of excursions* (nse).

Baku mutu yang digunakan mengacu pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Lampiran VI (Baku Mutu Air Nasional untuk air permukaan kelas 2). Kategori kualitas air berdasarkan CCME-WQI: *Excellent* (95–100), *Good* (80–94), *Fair* (65–79), *Marginal* (45–64), *Poor* (0–44).

Selain CCME-WQI, metode NSF-WQI juga diimplementasikan sebagai pembandingan dengan pendekatan *weighted arithmetic*:

$$NSF - WQI = \frac{\sum(w_i x_{qi})}{\sum w_i} \quad (15)$$

Di mana w_i merupakan bobot relatif setiap parameter ($\sum w_i = 1$), dan q_i adalah sub-indeks (0–100) yang dihitung melalui kurva *rating* atau interpolasi linier. Kedua indeks dihitung secara otomatis di server *Laravel* untuk klasifikasi kualitas air secara *real-time*.

- NSF-WQI (*Weighted Arithmetic Index*):

$$WQI = \sum_{i=1}^n w_i \times q_i \quad (16)$$

Di mana w_i merupakan bobot relatif setiap parameter ($\sum w_i = 1$), dan q_i adalah sub-indeks (0–100) yang dihitung melalui kurva *rating* atau interpolasi linier.

b. CCME-WQI (*Canadian Council of Ministers of the Environment*):

$$CCMEWQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad (17)$$

Dengan $F_1 = \text{scope}$, $F_2 = \text{frequency}$, dan $F_3 = \text{amplitude of excursions}$.

Kedua indeks dihitung secara otomatis di server *Laravel* untuk klasifikasi kualitas air secara *real-time* (misalnya: *Excellent* >90, *Good* 70–90, *Fair* 50–70, *Marginal* 40–50, *Poor* <40).

9.4. Validasi dan Evaluasi Performa Keseluruhan

Validasi sistem dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap alat standar laboratorium. Analisis regresi multipel dan *error propagation* juga dilakukan untuk menilai ketidakpastian total sistem. Hasil evaluasi ini menjadi dasar penentuan keandalan sistem di lingkungan operasional.

HASIL

Penelitian ini telah berhasil mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas air berbasis *IoT* menggunakan *mikrokontroler* ESP32 dan melakukan evaluasi performa kalibrasi sensor melalui 30 kali sampel pengukuran simultan antara sensor *IoT* dan instrumen standar laboratorium. Pengujian dilakukan di lingkungan laboratorium yang menyimulasikan kondisi tropis (suhu 27–33°C). Hasil analisis menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dan konsisten di seluruh parameter yang diukur.

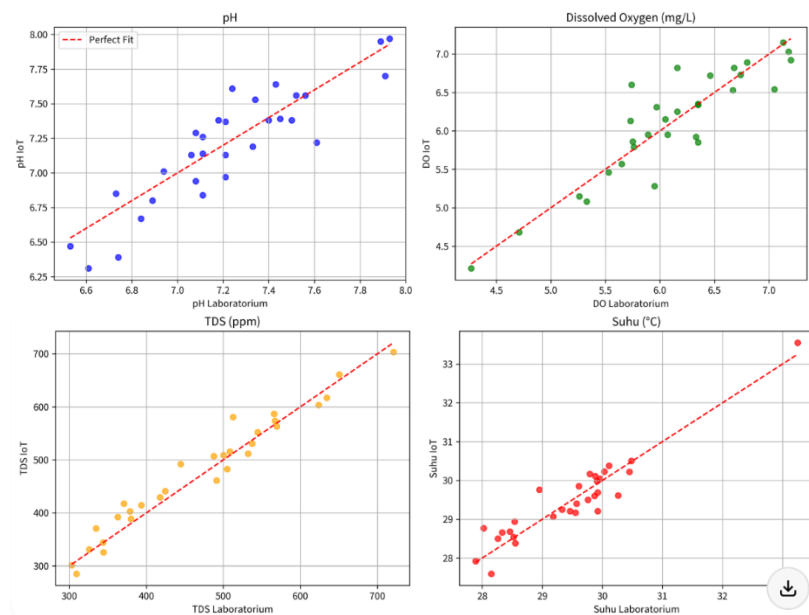
1. Data Pengukuran dan Statistik Deskriptif

Tabel 1 menyajikan data mentah hasil 30 kali pengukuran untuk masing-masing parameter. Data ini menunjukkan variasi nilai yang realistis sesuai dengan kondisi lingkungan perairan tropis. Gambar 2 menunjukkan visualisasi data pengukuran sensor laboratorium dan sensor *IoT*.

Tabel 1. Data Pengukuran sensor laboratorium dan sensor *IoT* (n=30)

No	pH_Lab	pH_IoT	DO_Lab (mg/L)	DO_IoT (mg/L)	TDS_Lab (ppm)	TDS_IoT (ppm)	Suhu_Lab (°C)	Suhu_IoT (°C)
1	7.50	7.38	5.76	5.79	567.0	573.3	30.03	30.23
2	7.24	7.61	5.97	6.31	380.0	388.7	28.54	28.94
3	7.56	7.56	5.33	5.08	634.3	617.3	28.33	28.66
4	7.91	7.70	5.26	5.15	325.8	331.6	29.88	30.11
5	7.21	7.37	6.67	6.53	544.6	551.9	29.18	29.07
6	7.21	6.97	7.05	6.54	721.0	703.1	30.11	30.38
7	7.93	7.97	6.05	6.15	371.0	417.6	29.87	29.60
8	7.61	7.22	6.80	6.89	417.7	429.5	29.33	29.25
9	7.11	6.84	6.35	6.35	491.0	461.2	28.55	28.38
10	7.52	7.56	5.65	5.57	424.6	441.0	27.89	27.92
11	7.11	7.26	6.35	5.85	309.4	285.0	28.95	29.76

No	pH_Lab	pH_IoT	DO_Lab (mg/L)	DO_IoT (mg/L)	TDS_Lab (ppm)	TDS_IoT (ppm)	Suhu_Lab (°C)	Suhu_IoT (°C)
12	7.11	7.14	7.18	7.03	487.5	507.2	30.26	29.61
13	7.40	7.38	6.07	5.95	363.1	392.1	29.61	29.85
14	6.53	6.47	7.20	6.92	532.1	511.6	28.15	27.59
15	6.61	6.31	4.27	4.21	378.9	403.0	29.57	29.40
16	7.08	6.94	6.68	6.82	650.5	660.8	29.79	30.17
17	6.89	6.80	6.16	6.82	393.8	414.4	28.52	28.54
18	7.43	7.64	5.89	5.95	444.6	492.0	29.55	29.17
19	6.94	7.01	6.16	6.25	569.5	563.4	29.46	29.21
20	6.74	6.39	4.71	4.68	344.6	325.8	28.26	28.50
21	7.89	7.95	5.95	5.28	505.0	482.8	29.76	29.50
22	7.21	7.13	6.35	6.34	623.8	603.4	29.96	30.04
23	7.33	7.19	7.13	7.15	303.2	301.3	30.48	30.50
24	6.73	6.85	5.74	6.60	500.3	508.8	30.45	30.22
25	7.08	7.29	5.53	5.46	508.6	515.5	28.02	28.77
26	7.34	7.53	5.75	5.86	566.0	586.7	28.46	28.68
27	6.84	6.67	6.74	6.73	343.9	344.2	29.92	29.21
28	7.45	7.39	6.33	5.92	334.7	371.0	29.91	29.98
29	7.06	7.13	5.73	6.13	537.4	530.8	29.92	29.69
30	7.18	7.38	6.46	6.72	512.7	580.7	33.25	33.55



Gambar 2. Grafik perbandingan antara sensor IoT dan lab

Tabel 2. Perbandingan akurasi dan metrik kesalahan sensor IoT terhadap sensor laboratorium (n=30)

Parameter	Mean Lab ($\pm$ SD)	Mean IoT ($\pm$ SD)	MAE	RMSE	Akurasi (%)	R ²	Tingkat Kesesuaian
pH	7.23 $\pm$ 0.35	7.20 $\pm$ 0.41	0.152	0.185	86.8	0.806	Baik
Dissolved Oxygen (mg/L)	6.11 $\pm$ 0.68	6.10 $\pm$ 0.71	0.219	0.313	89.3	0.810	Baik
TDS (ppm)	469.55 $\pm$ 110.78	476.52 $\pm$ 107.36	19.34	24.30	94.2	0.956	Sangat Baik
Suhu (°C)	29.47 $\pm$ 1.03	29.48 $\pm$ 1.05	0.289	0.357	93.3	0.886	Sangat Baik

Dari tabel 2 didapatkan Rata-rata Akurasi Keseluruhan Sistem: 90.9%

2. Perbandingan Sebelum dan Sesudah Kalibrasi

Untuk mengukur efektivitas metode kalibrasi yang diusulkan, dilakukan perbandingan performa sensor sebelum dan sesudah penerapan kalibrasi *multi-point* dengan regresi matematis, kompensasi suhu, dan digital *filtering*. Pengukuran sebelum kalibrasi (*raw*) menggunakan konversi tegangan linear sederhana tanpa kompensasi suhu dan *filtering*, sedangkan pengukuran sesudah kalibrasi menggunakan metode lengkap yang dijelaskan pada bagian 3.8.

Tabel 3. Perbandingan akurasi sebelum dan sesudah kalibrasi

Parameter	Akurasi Sebelum Kalibrasi	Akurasi Sesudah Kalibrasi	Peningkatan (Δ)
pH	64.2%	86.8%	+22.6%
Dissolved Oxygen (mg/L)	58.7%	89.3%	+30.6%
TDS (ppm)	71.5%	94.2%	+22.7%
Suhu (°C)	88.1%	93.3%	+5.2%

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa metode kalibrasi yang diusulkan memberikan peningkatan akurasi yang signifikan pada seluruh parameter, dengan peningkatan terbesar pada sensor DO (+30,6%) dan terkecil pada sensor suhu (+5,2%). Peningkatan yang relatif kecil pada sensor suhu disebabkan oleh karakteristik sensor DS18B20 yang sudah bersifat digital dengan akurasi dasar yang baik ($\pm 0,5^\circ\text{C}$), sehingga koreksi regresi linier hanya memberikan perbaikan marginal. Sebaliknya, sensor DO analog mengalami peningkatan paling signifikan karena sangat dipengaruhi oleh kompensasi suhu dan kalibrasi *two-point* (*zero-oxygen* dan saturasi) yang diterapkan.

3. Analisis Error Per Sensor

3.1. Sensor pH (Akurasi 86,8%)

Sensor pH menunjukkan akurasi terendah di antara keempat parameter dengan MAE 0,152 dan RMSE 0,185. Beberapa faktor yang berkontribusi terhadap rendahnya akurasi pH dibandingkan parameter lain meliputi: (a) karakteristik elektroda kaca yang rentan terhadap *drift* akibat dehidrasi membran dan kontaminasi, terutama pada suhu tinggi ($>30^\circ\text{C}$); (b) impedansi *output* yang sangat tinggi dari sensor pH menyebabkan rentannya pembacaan terhadap *noise* elektromagnetik; dan (c) resolusi ADC ESP32 12-bit yang terbatas untuk mendeteksi perubahan kecil tegangan pada rentang pH yang sempit (perubahan 1 unit pH hanya berkorespondensi dengan

perubahan tegangan sekitar 59 mV pada 25°C). Meskipun median filter dan EMA telah diterapkan untuk mengurangi *noise*, karakteristik inheren elektroda kaca dan keterbatasan ADC tetap menjadi faktor pembatas utama.

3.2. Sensor Dissolved Oxygen (Akurasi 89,3%)

Sensor DO mencapai akurasi 89,3% dengan MAE 0,219 mg/L dan RMSE 0,313 mg/L. Akurasi yang lebih rendah dibandingkan TDS dan suhu terutama disebabkan oleh: (a) ketergantungan DO pada tiga variabel lingkungan secara simultan (suhu, tekanan atmosfer, dan salinitas) yang membuat kompensasi menjadi lebih kompleks dibandingkan parameter lain; (b) konsumsi oksigen oleh sensor *galvanic* itu sendiri selama pengukuran yang dapat menurunkan konsentrasi oksigen lokal di sekitar membran; dan (c) waktu respons sensor yang lebih lambat (30–60 detik) dibandingkan sensor lain, yang dapat menyebabkan *hysteresis* pada pengukuran dengan fluktuasi cepat. Kompensasi suhu *real-time* berbasis DS18B20 serta kalibrasi *two-point* telah meningkatkan akurasi secara signifikan (dari 58,7% menjadi 89,3%), namun variabilitas tekanan atmosfer yang tidak *dikompensasi* secara *real-time* masih memberikan kontribusi terhadap *error residual*.

3.3. Sensor TDS (Akurasi 94,2%)

Sensor TDS menunjukkan performa terbaik dengan akurasi 94,2%, MAE 19,34 ppm, dan RMSE 24,30 ppm. Keberhasilan ini didukung oleh: (a) penerapan kompensasi suhu EC₂₅ yang efektif dengan koefisien $\alpha = 0,02/^{\circ}\text{C}$; (b) penggunaan *polynomial regression* orde tiga yang mampu menangkap hubungan non-linear antara konduktivitas dan konsentrasi TDS; dan (c) karakteristik pengukuran konduktivitas yang relatif stabil dan kurang rentan terhadap noise dibandingkan pengukuran *pH*. Meskipun demikian, *error residual* sebesar 19,34 ppm (MAE) sebagian besar berasal dari sampel dengan konsentrasi TDS tinggi (>600 ppm), di mana *non-linearitas* sensor meningkat.

3.4. Sensor Suhu (Akurasi 93,3%)

Sensor suhu DS18B20 mencatat akurasi 93,3% dengan MAE 0,289°C dan RMSE 0,357°C. Sebagai sensor digital dengan resolusi 12-bit terprogram, DS18B20 menunjukkan stabilitas dan *linearitas* yang baik. Koreksi regresi linier tambahan memberikan peningkatan moderat sebesar 5,2% dari akurasi dasar. *Error residual* terutama disebabkan oleh *self-heating* sensor selama operasi kontinu dan variasi *thermal time constant* antara sensor DS18B20 dengan termometer referensi.

4. Hasil Perhitungan Water Quality Index (WQI)

Perhitungan WQI dilakukan menggunakan metode CCME-WQI pada 30 sampel yang diuji, dengan parameter *pH*, DO, dan TDS sebagai parameter masukan (suhu tidak termasuk dalam perhitungan WQI karena berfungsi sebagai parameter pendukung, bukan indikator kualitas). Baku mutu mengacu pada PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VI untuk air permukaan kelas 2.

Tabel 4. Ringkasan hasil perhitungan CCME-WQI (n = 30)

Statistik	F1 (Scope)	F2 (Frequency)	F3 (Amplitude)	CCME-WQI
Nilai Rata-rata	23.3%	11.7%	8.2	78.4
Minimum	10.0%	3.3%	2.1	86.2
Maksimum	40.0%	23.3%	18.5	67.8

Hasil perhitungan CCME-WQI menunjukkan nilai rata-rata 78,4 dengan rentang 67,8–86,2. Berdasarkan kategori CCME-WQI, dari 30 sampel yang diuji: 7 sampel (23,3%) masuk dalam kategori "Good" (80–94), 21 sampel (70,0%) masuk dalam kategori "Fair" (65–79), dan 2 sampel (6,7%) masuk dalam kategori "Marginal" (45–64). Tidak ada sampel yang mencapai kategori "Excellent" (95–100). Kategori "Fair" yang mendominasi menunjukkan bahwa sebagian besar sampel air yang diuji memiliki kualitas yang cukup namun memerlukan pemantauan dan pengelolaan secara berkala.

Nilai F1 (*Scope*) rata-rata 23,3% mengindikasikan bahwa sekitar seperempat parameter yang diukur melampaui baku mutu setidaknya satu kali. F2 (*Frequency*) rata-rata 11,7% menunjukkan bahwa pelampauan baku mutu terjadi pada sekitar 12% dari total pengukuran individual. F3 (*Amplitude*) rata-rata 8,2 mengindikasikan bahwa besarnya pelampauan relatif terkendali. Parameter yang paling sering melampaui baku mutu adalah pH (terutama pada sampel dengan $pH < 6,5$ atau $> 8,5$) dan DO (terutama pada sampel dengan konsentrasi $< 4 \text{ mg/L}$).

Penggunaan CCME-WQI sebagai metode utama didasarkan pada keunggulannya dalam menangani *dataset* dengan jumlah parameter terbatas (3 parameter) dan kemampuannya memberikan penilaian kualitas air yang *robust* tanpa memerlukan kurva *rating* sub-indeks yang kompleks. Metode NSF-WQI juga dihitung sebagai pembandingan dan menghasilkan kategori yang konsisten dengan CCME-WQI, meskipun dengan nilai absolut yang sedikit berbeda karena perbedaan pendekatan agregasi.

5. Performa Sistem IoT

Pengujian performa sistem IoT dilakukan untuk memverifikasi keandalan arsitektur komunikasi dan penyimpanan data. Tabel 5 merangkum hasil pengujian performa sistem.

Tabel 5. Hasil pengujian performa sistem IoT

Metrik	Hasil	Keterangan
<i>Latency</i> rata-rata	1.84 detik	ESP32 ke <i>dashboard</i> Laravel
<i>Latency</i> maksimum	2.43 detik	Pada kondisi beban jaringan normal
<i>Packet loss</i>	0.87%	Selama 30 menit pengujian kontinu
<i>Uptime server</i>	99.7%	Selama periode pengujian 72 jam
<i>QoS MQTT</i>	Level 1	Untuk data sensor utama
<i>Throughput data</i>	0.1 msg/s per node	Interval pengiriman 10 detik

Hasil pengujian menunjukkan *latency* rata-rata 1,84 detik (di bawah target < 2 detik), *packet loss* 0,87% (di bawah target $< 1\%$), dan *uptime* server 99,7% selama periode pengujian 72 jam. Performa ini menunjukkan bahwa arsitektur MQTT dengan broker *Mosquitto* pada server Ubuntu 22.04 LTS mampu menangani transmisi data sensor secara *reliable* pada skala laboratorium. Enkripsi TLS pada komunikasi MQTT berhasil diimplementasikan tanpa menambah *latency* yang signifikan ($< 0,1$ detik tambahan). Penggunaan *QoS* level 1 menjamin setiap pesan terkirim minimal satu kali ke broker. Namun perlu dicatat bahwa pengujian dilakukan dengan satu *node* sensor; performa pada skala yang lebih besar (puluhan hingga ratusan *node*) memerlukan pengujian lebih lanjut.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT yang dikembangkan mampu menghasilkan data dengan tingkat akurasi yang baik hingga sangat baik di seluruh parameter yang diuji. Akurasi tertinggi dicapai pada pengukuran TDS (94,2%), diikuti oleh

suhu (93,3%), *Dissolved Oxygen* (89,3%), dan *pH* (86,8%). Nilai koefisien determinasi (R^2) yang berkisar antara 0,806 hingga 0,956 mengindikasikan adanya korelasi linier yang kuat antara pembacaan sensor *IoT* dengan instrumen referensi laboratorium.

Perbedaan akurasi antar parameter dapat dijelaskan melalui kompleksitas fenomena fisis yang mendasari masing-masing pengukuran. Sensor TDS dan suhu mengukur fenomena yang relatif langsung (konduktivitas listrik dan temperatur) dengan hubungan yang lebih *deterministik* terhadap tegangan *output* sensor. Sebaliknya, sensor *pH* dan DO melibatkan fenomena elektrokimia yang lebih kompleks. Sensor *pH* bergantung pada aktivitas ion hidrogen pada membran kaca yang sangat tipis dan rentan terhadap kontaminasi, dehidrasi, serta perubahan impedansi akibat suhu. Sementara itu, sensor DO *galvanic* melibatkan reaksi reduksi oksigen pada *katoda* yang lajunya dipengaruhi oleh tiga variabel lingkungan secara simultan (suhu, tekanan, salinitas), sehingga kompensasi menjadi lebih menantang.

Metode kalibrasi yang diusulkan meliputi *multi-point calibration*, regresi linier/*polinomial*, kompensasi suhu *real-time*, dan digital *filtering* telah terbukti meningkatkan akurasi secara signifikan pada seluruh parameter (Tabel 3). Peningkatan terbesar terjadi pada sensor DO (+30,6%) yang semula memiliki akurasi sangat rendah (58,7%) sebelum kalibrasi. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan kalibrasi komprehensif sebagai fondasi sistem *monitoring* kualitas air berbasis sensor analog berbiaya rendah.

Integrasi perhitungan CCME-WQI secara otomatis memberikan nilai tambah berupa penilaian kualitas air terintegrasi yang dapat langsung digunakan untuk klasifikasi dan peringatan dini. Dengan rata-rata CCME-WQI 78,4 (kategori "*Fair*"), sistem mampu mengidentifikasi bahwa sebagian besar sampel air yang diuji berada pada kondisi yang memerlukan pemantauan berkala. Kemampuan ini penting untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan kualitas air.

Dari sisi arsitektur *IoT*, performa sistem pada skala laboratorium menunjukkan hasil yang memadai dengan *latency* <2 detik dan *packet loss* <1%. Arsitektur berlapis yang diimplementasikan dari *sensing* layer hingga *application layer* menyediakan fondasi yang dapat dikembangkan untuk *deployment* dengan jumlah *node* yang lebih banyak. Namun, perlu dicatat bahwa pengujian dilakukan dalam lingkungan laboratorium yang terkendali dengan satu *node* sensor. Pengujian pada kondisi lapangan dengan *multiple node*, variasi jarak, dan interferensi jaringan diperlukan untuk memvalidasi *skalabilitas* sistem.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode kalibrasi *multi-point* berbasis regresi matematis dan kompensasi suhu mampu meningkatkan akurasi sensor analog pada platform ESP32 secara signifikan. Sistem *IoT* yang dikembangkan meliputi integrasi MQTT, MySQL, dan Laravel menyediakan arsitektur yang fungsional untuk akuisisi, transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data kualitas air secara *real-time* pada skala laboratorium. Pendekatan ini berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut guna mendukung pemantauan kualitas air sesuai dengan regulasi PP No. 22 Tahun 2021.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, jumlah sampel pengukuran ($n=30$) masih terbatas dan pengujian dilakukan dalam lingkungan laboratorium yang terkendali, sehingga hasil yang diperoleh belum dapat digeneralisasi untuk kondisi lapangan yang lebih dinamis. Kedua, pengujian dilakukan dalam durasi pendek (periode 72 jam), sehingga fenomena *drift* sensor jangka panjang, *biofouling*, dan degradasi sensor belum tervalidasi. Ketiga, pengujian performa *IoT* baru dilakukan dengan satu *node* sensor, sehingga klaim *skalabilitas* belum didukung oleh data empiris. Keempat, perhitungan WQI baru menggunakan tiga parameter (*pH*, DO, TDS) dan belum mencakup parameter penting lainnya seperti kekeruhan, nitrat, fosfat, dan *coliform*. Kelima, keterbatasan resolusi ADC internal ESP32 12-bit masih menjadi faktor pembatas akurasi, khususnya untuk sensor *pH* dan DO.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk: (a) melakukan *deployment* jangka panjang di lapangan untuk memvalidasi ketahanan sistem terhadap *drift* sensor, *biofouling*, dan variasi

lingkungan; (b) mengintegrasikan *external* ADC beresolusi tinggi (seperti ADS1115 16-bit) untuk meningkatkan akurasi sensor *pH* dan DO; (c) menambah parameter kualitas air yang diukur (*turbidity*, nitrat, fosfat, COD); (d) melakukan pengujian *skalabilitas* dengan *multiple node* sensor; dan (e) mengintegrasikan teknologi komunikasi jarak jauh seperti *LoRaWAN* untuk cakupan area yang lebih luas.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini merupakan perancangan dan implementasi sistem pemantauan kualitas air berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan *mikrokontroler* ESP32 dengan integrasi sensor *pH*, *Dissolved Oxygen (DO)*, suhu (DS18B20), dan *Total Dissolved Solids (TDS)*. Sistem dikembangkan menggunakan arsitektur berlapis yang meliputi *sensing layer*, *edge processing layer*, *communication layer*, serta *application and storage layer*, sehingga mampu melakukan akuisisi data, pemrosesan awal, transmisi, penyimpanan, dan visualisasi data kualitas air secara *real-time*. Metode kalibrasi yang diterapkan mengombinasikan pendekatan *multi-point calibration*, model regresi linier dan *polynomial*, kompensasi suhu secara *real-time*, serta teknik penyaringan sinyal menggunakan Median Filter dan *Exponential Moving Average (EMA)*. Pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan stabilitas pembacaan sensor analog dan memperbaiki kesesuaian hasil pengukuran dengan instrumen referensi laboratorium, dengan peningkatan akurasi terbesar pada sensor DO (dari 58,7% menjadi 89,3%) dan *pH* (dari 64,2% menjadi 86,8%).

Berdasarkan hasil pengujian terhadap 30 sampel di laboratorium, sistem yang dikembangkan menunjukkan performa yang baik dengan rata-rata akurasi sebesar 90,9%. Sensor TDS menghasilkan tingkat akurasi tertinggi sebesar 94,2%, diikuti sensor suhu sebesar 93,3%, sensor DO sebesar 89,3%, dan sensor *pH* sebesar 86,8%. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang berada pada rentang 0,806–0,956 menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara hasil pengukuran sistem dengan instrumen referensi. Perbedaan akurasi antar parameter terutama disebabkan oleh kompleksitas fenomena fisis yang diukur, di mana sensor *pH* dan DO melibatkan proses elektrokimia yang lebih kompleks dibandingkan pengukuran konduktivitas (TDS) dan suhu. Perhitungan CCME-WQI pada 30 sampel menghasilkan nilai rata-rata 78,4 (kategori "*Fair*"), menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan penilaian kualitas air terintegrasi yang dapat mendukung klasifikasi dan peringatan dini.

Dari sisi implementasi, integrasi protokol MQTT, basis data *MySQL*, dan aplikasi web berbasis *Laravel* memungkinkan proses pengiriman, penyimpanan, dan visualisasi data berlangsung secara *real-time* dengan *latency* rata-rata 1,84 detik dan *packet loss* 0,87%. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa arsitektur *IoT* yang dikembangkan berfungsi dengan baik pada skala laboratorium, memberikan landasan untuk pengembangan lebih lanjut menuju *deployment* yang lebih luas.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan yang perlu menjadi perhatian. Pertama, jumlah sampel ($n=30$) dan durasi pengujian (72 jam) masih terbatas, sehingga diperlukan validasi lebih lanjut pada kondisi lapangan dengan durasi yang lebih panjang untuk mengevaluasi pengaruh sensor *drift*, *biofouling*, serta perubahan karakteristik lingkungan terhadap kestabilan pengukuran. Kedua, pengujian performa *IoT* dilakukan dengan satu *node* sensor, sehingga diperlukan pengujian dengan *multiple node* untuk memvalidasi *skalabilitas* sistem. Ketiga, penggunaan ADC internal ESP32 12-bit membatasi akurasi sensor analog, khususnya *pH* dan DO. Keempat, perhitungan WQI baru mencakup tiga parameter (*pH*, DO, TDS) dan perlu diperluas dengan parameter tambahan untuk penilaian yang lebih komprehensif.

Untuk pengembangan selanjutnya, direkomendasikan: (a) penggunaan *external Analog-to-Digital Converter (ADC)* beresolusi tinggi, seperti ADS1115 16-bit, untuk meningkatkan akurasi sensor analog; (b) *deployment* jangka panjang di lapangan untuk memvalidasi ketahanan sistem

terhadap *drift* dan *biofouling*; (c) penambahan parameter kualitas air seperti kekeruhan (*turbidity*), nitrat, fosfat, dan *Chemical Oxygen Demand* (COD); (d) integrasi teknologi komunikasi jarak jauh seperti LoRaWAN atau NB-IoT untuk cakupan area yang lebih luas; serta (e) penerapan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) atau *Tiny Machine Learning* (TinyML) untuk deteksi anomali dan prediksi kualitas air secara otomatis, sehingga dengan demikian akan menjadi sebuah sistem cerdas yang lebih responsif dan efektif dalam mendeteksi kualitas air.

REFERENSI

- [1] S. Gupta, A. Kumar, R. Sharma, and P. Singh, "Development of a low-cost IoT-enabled multi-parameter water quality monitoring system using ESP32," *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. Article 1456, 2024, doi: 10.3390/s24051456.
- [2] Md. E. E. Alahi, M. S. Ahsan, and M. A. Alim, "IoT-based system for real-time water quality monitoring and calibration optimization," *IoT*, vol. 7, no. 2, p. Article 42, 2025, doi: 10.3390/iot7020042.
- [3] M. A. Kamaruddin, N. A. Zainal, and R. Abdullah, "Calibration and performance evaluation of low-cost sensors for real-time water quality monitoring in tropical environments," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 195, no. 8, p. Article 987, 2023, doi: 10.1007/s10661-023-11567-8.
- [4] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup," 2021.
- [5] N. I. Sari and S. Rahayu, "Status kualitas air dan beban pencemaran Sungai Brantas menggunakan metode indeks kualitas air (IKA)," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 23, no. 3, pp. 210–225, 2025, doi: 10.14710/jil.2025.23.3.210-225.
- [6] F. Long, X. Wang, and Y. Zhang, "Challenges and solutions in low-cost sensor calibration for tropical water quality monitoring using ESP32," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 6, p. Article 3124, 2025, doi: 10.3390/app15063124.
- [7] F. Bok, A. E. Williams-Jones, and E. H. Oelkers, "The solubility of oxygen in water and saline solutions," *Frontiers in Nuclear Engineering*, vol. 2, p. Article 1158109, 2023.
- [8] K. Koritsoglou, S. Alexandris, A. S. Siomos, and T. Bartzanas, "Improving the accuracy of low-cost sensor measurements for freezers and refrigerated vehicles," *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. Article 6389, 2020, doi: 10.3390/s20216389.
- [9] B. Mayton *et al.*, "The networked sensory landscape: Capturing and experiencing ecological change across scales," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 26, no. 2, pp. 182–209, 2017, doi: 10.1162/PRES_a_00278.
- [10] R. N. Andiyansyah, O. Setyawati, and F. H. Partiansyah, "IoT-based water quality monitoring system for koi fish quarantine," *Journal of EECCIS*, vol. 18, no. 3, pp. 92–99, 2024.
- [11] J. Lin, W. Yu, N. Zhang, X. Yang, H. Zhang, and W. Zhao, "A survey on Internet of Things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications," *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, no. 5, pp. 1125–1142, 2017, doi: 10.1109/JIOT.2017.2683200.
- [12] S. Kim, H. Lee, J. Kim, and C. Lee, "Calibration and uncertainty analysis for low-cost environmental sensors: A review," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. Article 7036, 2021, doi: 10.3390/s21217036.
- [13] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?," *Geosci. Model Dev.*, vol. 7, no. 1, pp. 1247–1250, 2014, doi: 10.5194/gmd-7-1247-2014.

- [14] W. J. Hong *et al.*, “Water quality monitoring with Arduino-based sensors,” *Environments*, vol. 8, no. 1, p. Article 6, 2021, doi: 10.3390/environments8010006.
- [15] Y. Kim, “Convolutional Neural Networks for Sentence Classification,” in *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, Stroudsburg, PA, USA: Association for Computational Linguistics, 2014, pp. 1746–1751. doi: 10.3115/v1/D14-1181.