



Sistem Pemantau Pencemaran Air Sungai Berbasis IoT dan Komunikasi Lora

Rasyid Achmad Fauzi, Kurniawan D Irianto*

Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
Jaten, Sendangadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

Email: ¹Rasyidahmad180@gmail.com, ^{2,*}k.d.iriato@uii.ac.id

Email Penulis Korespondensi: k.d.iriato@uii.ac.id

Submitted: 13/10/2025; Accepted: 31/10/2025; Published: 31/10/2025

Abstrak—Penurunan kualitas air sungai merupakan isu lingkungan signifikan yang mengancam ekosistem perairan dan kesehatan masyarakat. Sistem pemantauan konvensional memiliki keterbatasan terkait latensi perolehan data dan jangkauan operasional, terutama di lokasi terpencil. Penelitian ini menyajikan perancangan dan implementasi sistem pemantauan kualitas air sungai berbasis Internet of Things (IoT) untuk pengukuran pH dan Total Dissolved Solids (TDS) secara real-time. Arsitektur sistem terdiri dari node sensor berbasis Arduino Uno yang mengakuisisi data dan mentransmisikannya melalui modul Long Range (LoRa) ke sebuah gateway berbasis ESP32. Gateway tersebut kemudian menyimpan data pada cloud server Firebase untuk visualisasi pada antarmuka web kustom. Hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan transmisi data LoRa mencapai 100% pada jarak 20 meter dengan latensi sistem end-to-end rata-rata 3,08 detik. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem yang dikembangkan dapat menjadi solusi yang sangat responsif untuk deteksi dini pencemaran, sehingga mendukung upaya intervensi yang lebih cepat untuk proteksi ekosistem akuatik dan kesehatan publik..

Kata Kunci: Internet of Things (IoT); LoRa; Pemantauan Kualitas Air; Sensor Kualitas Air; Firebase.

Abstract—River water quality degradation is a significant environmental issue that endangers aquatic ecosystems and public health. Monitoring systems face limitations related to data acquisition latency and operational range, particularly in remote locations. This study presents the design and implementation of an Internet of Things (IoT)-based river water quality monitoring system for real-time pH and Total Dissolved Solids (TDS) measurement. The system architecture consists of an Arduino Uno-based sensor node that acquires data and transmits it via a Long Range Communication (LoRa) module to an ESP32-based gateway. The gateway then stores the data on a Firebase cloud server for visualization on a custom web interface. Test results show a 100% success rate of LoRa data transmission over a distance of 20 meters with an average end-to-end system latency of 3.08 seconds. These findings demonstrate that the developed system can be a highly responsive solution for early detection of contamination, thus supporting faster intervention efforts for aquatic ecosystem protection and public health.

Keywords: Internet of Things (IoT); LoRa; Water Quality Monitoring; Water Quality Sensor; Firebase.

1. PENDAHULUAN

Air merupakan komponen vital yang menunjang kelangsungan seluruh kehidupan di bumi. Dalam konteks ekosistem dan peradaban manusia, sungai memegang peranan krusial sebagai salah satu sumber air utama yang dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, mulai dari kebutuhan domestik, pertanian, industri, perikanan, hingga sarana transportasi. Namun, seiring dengan meningkatnya aktivitas manusia di sepanjang daerah aliran sungai (DAS), kualitas air sungai kian berada di bawah ancaman serius akibat pencemaran yang berasal dari berbagai sumber, seperti limbah rumah tangga, efluen industri yang tidak diolah, limpasan pestisida dan pupuk dari lahan pertanian, serta aktivitas pertambangan. Pencemaran ini tidak hanya mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, tetapi juga menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan bagi masyarakat yang bergantung pada sumber air tersebut, sehingga menjadikannya krisis lingkungan dan kesehatan masyarakat yang mendesak untuk ditangani[1].

Metode pemantauan kualitas air yang selama ini umum diterapkan adalah melalui pengambilan sampel air secara manual di lapangan, yang kemudian dianalisis di laboratorium. Meskipun metode ini mampu menghasilkan data dengan tingkat akurasi yang tinggi, ia memiliki kelemahan fundamental yang signifikan[2]. Proses yang melibatkan perjalanan ke lokasi, transportasi sampel, dan analisis laboratorium menciptakan jeda waktu yang sangat panjang-bisa berjam-jam hingga berhari-hari-antara terjadinya insiden pencemaran dengan ketersediaan data hasil analisis[3]. Keterlambatan atau latensi yang tinggi ini menjadi kendala utama, karena pada rentang waktu tersebut, polutan telah menyebar jauh ke hilir, memperluas area dampak, dan menyebabkan kerusakan ekologis yang mungkin tidak dapat dipulihkan. Upaya mitigasi yang dilakukan menjadi bersifat reaktif, bukan proaktif. Selain itu, metode manual ini juga menuntut biaya operasional yang tinggi dan tidak dapat memberikan gambaran kondisi air secara berkelanjutan (real-time), yang sangat esensial untuk respons cepat terhadap peristiwa pencemaran[4].

Menjawab tantangan tersebut, perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan pergeseran paradigma dalam pemantauan lingkungan. IoT memungkinkan integrasi sensor lingkungan dengan perangkat komputasi dan jaringan nirkabel untuk melakukan akuisisi data secara otomatis, kontinu, dan real-time. Dalam konteks ini, teknologi komunikasi Long Range (LoRa) muncul sebagai salah satu pilar utama yang memungkinkan aplikasi IoT di lapangan[5], [6]. LoRa adalah protokol komunikasi nirkabel yang dirancang khusus untuk transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya yang sangat rendah (Low Power Wide Area Network/LPWAN).

Keunggulan ini menjadikan LoRa sangat ideal untuk aplikasi pemantauan di lokasi-lokasi terpencil atau daerah rural yang seringkali tidak memiliki infrastruktur jaringan seluler atau WiFi yang memadai, seperti di sepanjang aliran sungai[7].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penggunaan IoT untuk pemantauan kualitas air. Sebagai contoh, beberapa sistem memanfaatkan platform seperti Blynk dan Google Sheets untuk visualisasi data, sementara yang lain menggunakan ThingSpeak atau mengimplementasikan gateway LoRa-MQTT [8]. Meskipun karya-karya ini telah menunjukkan potensi IoT, banyak di antaranya masih bergantung pada platform pihak ketiga yang seringkali memiliki batasan dalam hal kustomisasi, skalabilitas, dan biaya untuk penggunaan jangka panjang. Platform seperti Blynk, meskipun sangat baik untuk pembuatan prototipe cepat, dapat menjadi restriktif untuk pengembangan fitur-fitur lanjutan atau penyebaran skala besar[9], [10]. Hal ini menciptakan celah penelitian untuk pengembangan sistem yang terintegrasi secara end-to-end, yang menggabungkan keandalan komunikasi jarak jauh LoRa dengan fleksibilitas platform backend yang lebih terkontrol. Inovasi penelitian ini terletak pada integrasi menyeluruh antara komunikasi LoRa yang tangguh dengan backend berbasis Firebase dan dasbor visualisasi web yang dikembangkan secara kustom[11]. Pilihan arsitektur ini memberikan keleluasaan yang lebih besar untuk pengembangan di masa depan, seperti implementasi algoritma analitik yang lebih kompleks, sistem notifikasi yang disesuaikan, dan integrasi dengan sumber data lain-kemampuan yang sulit dicapai pada platform komersial yang terbatas.

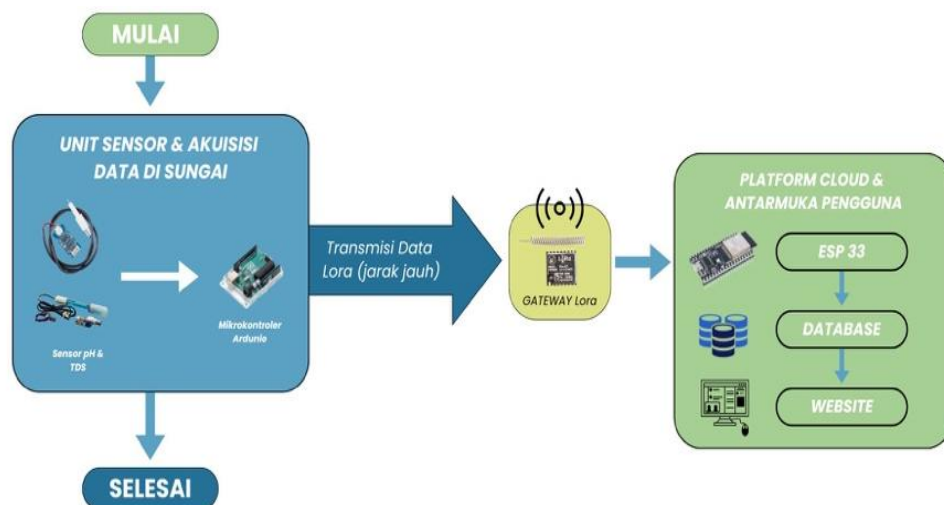
2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi metode Prototyping sebagai pendekatan pengembangan sistem. Model ini dipilih karena sifatnya yang iteratif, sangat sesuai untuk pengembangan sistem kompleks yang melibatkan integrasi perangkat keras dan perangkat lunak seperti perangkat IoT[12]. Pendekatan ini memungkinkan perbaikan dan penyempurnaan secara progresif melalui siklus berulang yang terdiri dari identifikasi kebutuhan, perancangan awal, pembuatan prototipe, pengujian di lapangan, dan revisi berdasarkan hasil evaluasi. Fleksibilitas ini memastikan bahwa sistem akhir yang dihasilkan tidak hanya fungsional secara teknis tetapi juga andal dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi di dunia nyata.

Sistem ini dirancang dengan arsitektur dua-node yang modular untuk memisahkan fungsi akuisisi data dan komunikasi ke cloud, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.

- Node Sensor (Transmitter): Bertanggung jawab untuk melakukan pengukuran parameter kualitas air secara langsung di lingkungan akuatik.
- Gateway (Receiver): Berfungsi untuk menerima data secara nirkabel dari node sensor dan meneruskannya ke server cloud melalui koneksi internet.

Pemisahan ini merupakan pilihan desain yang disengaja untuk mengoptimalkan kinerja dan efisiensi sistem. Dengan menugaskan Arduino Uno yang sederhana dan andal untuk tugas akuisisi data sensor, node ini dapat dioptimalkan untuk konsumsi daya yang rendah dan stabilitas operasional. Di sisi lain, ESP32 yang lebih bertenaga dengan konektivitas WiFi bawaan ditugaskan sebagai gateway, di mana ia dapat menangani tugas yang lebih kompleks seperti manajemen penerimaan data LoRa dan koneksi internet secara bersamaan. Arsitektur modular ini menciptakan sistem yang lebih stabil, mudah dikelola, dan dapat diskalakan di masa depan[13].



Gambar 1. Diagram Arsitektur Sistem

Keberhasilan dan reproduisibilitas penelitian ini bergantung pada komponen perangkat keras dan lunak yang dipilih secara cermat. Tabel 1 merangkum spesifikasi teknis dari setiap komponen yang digunakan dalam sistem.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat Keras dan Lunak

Kategori Komponen	Komponen	Spesifikasi / Model	Fungsi Utama
A. Node Sensor (Transmitter)	Mikrokontroler	Arduino Uno R3	Mengakuisisi data dari sensor pH dan TDS; mengontrol modul transmitter LoRa.
	Sensor pH	DFRobot SEN0161 atau sejenis	Mengukur tingkat keasaman atau kebasaan (pH) air.
	Sensor TDS	Gravity: Analog TDS Sensor	Mengukur Total Dissolved Solids (dalam ppm) untuk mengindikasikan partikel terlarut.
	Modul Komunikasi	Semtech SX1278 LoRa Module	Mentransmisikan data sensor secara nirkabel ke gateway menggunakan protokol LoRa.
B. Gateway (Receiver)	Mikrokontroler	ESP32-WROOM-32	Menerima paket data dari modul receiver LoRa; terhubung ke WiFi untuk mengunggah data ke cloud.
	Modul Komunikasi	Semtech SX1278 LoRa Module	Menerima paket data nirkabel yang dikirim oleh node sensor.
	Platform Cloud	Google Firebase Realtime Database	Menyimpan data sensor dengan stempel waktu dalam format JSON NoSQL; memungkinkan sinkronisasi data real-time.
C. Cloud & Visualisasi	IDE Pengembangan	Arduino IDE	Digunakan untuk memprogram mikrokontroler Arduino Uno dan ESP32.
	Frontend	Dasbor Web Kustom (HTML, CSS, JS)	Menyediakan antarmuka yang ramah pengguna untuk memvisualisasikan data real-time dan historis dari Firebase.

Pengumpulan data dilakukan melalui kombinasi pencatatan otomatis oleh sistem dan observasi teknis langsung. Sistem dikonfigurasi untuk mencatat pembacaan pH dan TDS pada interval waktu yang ditentukan, di mana setiap data yang diunggah ke Firebase Realtime Database secara otomatis diberi stempel waktu. Pengujian eksperimental dilakukan di Embung Tambakboyo, Sleman, sebuah lokasi yang representatif untuk lingkungan perairan dengan aliran tenang. Skenario pengujian mencakup: (1) validasi akurasi sensor dengan membandingkan pembacaan sistem terhadap alat ukur standar yang terkalibrasi, dan (2) pengujian kinerja komunikasi LoRa dengan memvariasikan jarak antara node sensor dan gateway untuk mengevaluasi kekuatan sinyal dan keandalan transmisi.

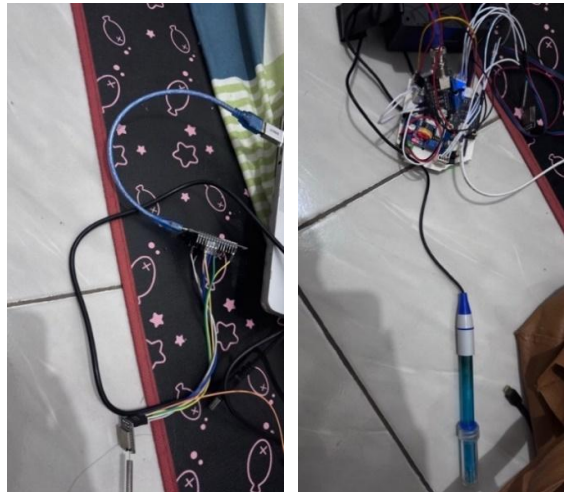
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Sistem dan Verifikasi Fungsional

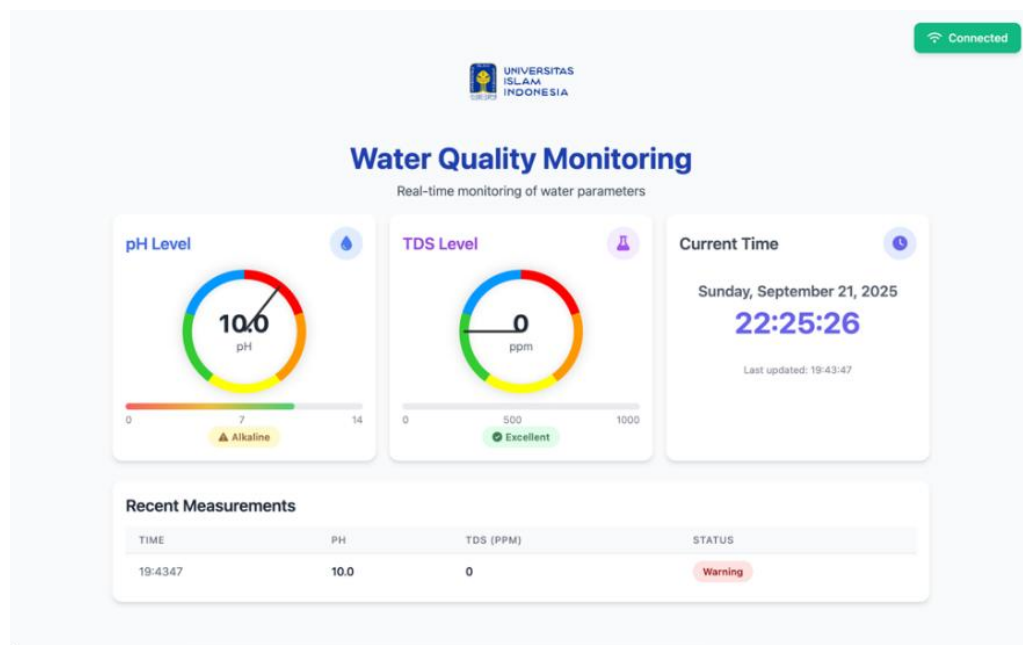
Implementasi sistem dan verifikasi fungsional merupakan tahap realisasi dari arsitektur yang telah dirancang . Prototipe sistem pemantauan kualitas air ini berhasil diwujudkan dengan mengadopsi arsitektur dua-node yang modular . Node pertama, yakni **Node Sensor (Transmitter)**, dirakit menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 . Pemilihan Arduino Uno didasarkan pada keandalannya untuk tugas spesifik akuisisi data sensor . Node ini diintegrasikan dengan sensor pH (DFRobot SEN0161) untuk mengukur tingkat keasaman dan sensor (Gravity Analog TDS) untuk mengukur total partikel terlarut. Data yang telah diakuisisi kemudian ditransmisikan menggunakan modul komunikasi Semtech SX1278 LoRa[14].

Node kedua, **Gateway (Receiver)**, berfungsi sebagai jembatan antara node sensor dan cloud . Gateway ini dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32-WROOM-32 yang lebih bertenaga , dipilih karena telah memiliki konektivitas WiFi bawaan yang esensial untuk koneksi internet. ESP32 ini juga dilengkapi modul LoRa SX1278 untuk menerima paket data yang dikirim oleh node sensor. Desain yang memisahkan fungsi akuisisi (Arduino) dan komunikasi (ESP32) ini sengaja dipilih untuk menciptakan sistem yang lebih stabil dan dapat diskalakan . Data yang diterima gateway kemudian diunggah dan disimpan pada Google Firebase Realtime Database, yang berfungsi sebagai backend cloud. Untuk visualisasi, sebuah dasbor web kustom dikembangkan menggunakan HTML, CSS, dan JavaScript[15].

Pengujian fungsional secara **end-to-end** dilakukan untuk memverifikasi bahwa seluruh alur kerja sistem beroperasi sesuai harapan . Hasil verifikasi mengonfirmasi bahwa (1) sensor berhasil mengakuisisi data pH dan TDS dari sampel air; (2) modul LoRa pada node sensor berhasil mentransmisikan data; (3) gateway berhasil menerima data LoRa dan mengunggahnya ke Firebase; dan (4) dasbor web berhasil menampilkan data tersebut secara real-time. Prototipe fisik dari node sensor dan gateway yang telah dirakit ditunjukkan pada Gambar 2, sementara tampilan antarmuka dasbor web yang menampilkan data secara langsung dapat dilihat pada Gambar 3. Keberhasilan realisasi dan verifikasi fungsional ini memastikan bahwa sistem telah beroperasi sesuai rancangan dan siap untuk pengujian kinerja[16].



Gambar 2. Prototipe Node Sensor dan Gateway



Gambar 3. Tampilan Dashboard Web untuk Pemantauan

3.2 Kinerja dan Akurasi Sensor

Validasi terhadap akurasi sensor merupakan langkah fundamental dan paling krusial dalam keseluruhan arsitektur sistem pemantauan ini. Keberhasilan sistem peringatan dini tidak hanya bergantung pada kecepatan transmisi data, tetapi juga pada integritas dan kebenaran data yang ditransmisikan. Tanpa data sensor yang andal, sistem yang canggih sekalipun hanya akan menyebarkan informasi yang salah, yang berpotensi mengarah pada keputusan yang keliru dan membahayakan. Oleh karena itu, fokus utama tahap ini adalah untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan oleh sistem prototipe benar-benar dapat diandalkan. Proses pengujian untuk validasi ini dilakukan dengan menerapkan metode komparatif yang ketat. Secara spesifik, pembacaan yang dihasilkan oleh sensor pH (DFRobot SEN0161 atau sejenis) dan sensor TDS (Gravity: Analog TDS Sensor) dari sistem prototipe, dibandingkan secara langsung dengan hasil pengukuran yang diambil menggunakan alat ukur standar profesional. Penting untuk dicatat bahwa alat ukur standar yang digunakan sebagai pembanding ini adalah instrumen yang telah terkalibrasi secara presisi, sehingga berfungsi sebagai "sumber kebenaran" (ground truth) dalam eksperimen ini [17].

Hasil dari pengujian komparatif ini sangat positif. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa kedua sensor yang digunakan dalam prototipe—baik sensor pH maupun sensor TDS memiliki tingkat kesalahan relatif yang rendah. Ini berarti bahwa deviasi atau perbedaan antara nilai yang dilaporkan oleh sensor sistem dengan nilai dari alat ukur standar yang terkalibrasi berada dalam margin yang sangat dapat diterima. Temuan ini secara efektif mengonfirmasi keandalan operasional kedua sensor tersebut untuk digunakan dalam aplikasi pemantauan di lapangan. Lebih lanjut, pencapaian tingkat akurasi yang tinggi ini bukanlah sebuah anomali. Hasil ini terbukti sejalan dan konsisten dengan temuan-temuan dalam penelitian sejenis yang telah dipublikasikan sebelumnya,



seperti yang dilaporkan secara terpisah oleh Faza et al. dan Widowati et al.. Keselarasan dengan literatur ilmiah yang ada ini semakin memperkuat dan memvalidasi kualitas data yang dihasilkan oleh sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini. Pada akhirnya, keandalan data sensor ini berfungsi sebagai fondasi vital bagi keseluruhan sistem. Informasi yang akurat dan tepercaya adalah prasyarat mutlak yang tidak dapat ditawar untuk setiap proses pengambilan keputusan yang tepat. Baik itu untuk memicu alarm pencemaran, menganalisis tren kualitas air jangka panjang, atau memberikan data bagi pemangku kepentingan, semua nilai tambah sistem ini bergantung penuh pada akurasi pengukuran di sumbernya[18].

3.3 Keandalan dan Jangkauan Komunikasi LoRa

Setelah memvalidasi integritas data pada sumbernya, fokus pengujian beralih ke validasi media transmisi data. Pengujian kinerja komunikasi LoRa (Long Range) dirancang khusus untuk mengevaluasi dan memvalidasi kemampuannya sebagai solusi transmisi data yang tangguh dan andal di lingkungan luar ruangan (outdoor), yang merupakan skenario penerapan sesungguhnya dari sistem pemantauan sungai. Untuk mendapatkan gambaran performa yang komprehensif, pengujian ini dilakukan dengan mencakup dua skenario kondisi lingkungan yang paling umum dan kritis: yaitu kondisi Line-of-Sight (LOS) dan Non-Line-of-Sight (NLOS). Skenario LOS, di mana tidak ada halangan fisik yang signifikan antara node sensor (Transmitter) dan gateway (Receiver), merepresentasikan kondisi ideal. Di sisi lain, skenario NLOS, di mana sinyal harus menembus atau melewati halangan fisik seperti vegetasi lebat, bangunan, atau kontur geografis, merepresentasikan tantangan yang lebih realistis di lapangan. Pengujian ini dilakukan dengan memvariasikan jarak antara kedua node untuk memetakan batas kemampuan sistem.

Hasil pengujian pada kondisi ideal LOS menunjukkan kinerja yang sangat baik. Sistem terbukti mampu mempertahankan koneksi komunikasi yang stabil dan konsisten hingga jarak 500 meter. Keandalan ini tidak hanya diukur dari konektivitas, tetapi juga dari metrik kuantitatif berupa Packet Delivery Ratio (PDR) yang tinggi. PDR yang tinggi mengindikasikan bahwa sebagian besar paket data yang dikirim oleh node sensor berhasil diterima secara utuh oleh gateway, meminimalkan kehilangan data yang krusial. Lebih lanjut, analisis parameter teknis seperti Received Signal Strength Indicator (RSSI) dan Signal-to-Noise Ratio (SNR) memberikan wawasan tambahan. Sesuai dengan hukum fisika propagasi gelombang radio, kedua parameter ini menunjukkan adanya redaman sinyal yang dapat diprediksi seiring bertambahnya jarak antara transmitter dan receiver. Namun, temuan yang paling penting adalah bahwa meskipun sinyal melemah, nilainya tetap berada dalam batas operasional yang dapat diterima oleh modul LoRa Semtech SX1278. Hal ini mengonfirmasi bahwa komunikasi yang andal dapat dicapai hingga jarak 500 meter dalam kondisi LOS[19].

Pada pengujian skenario NLOS, di mana terdapat halangan fisik yang substansial, hasil yang teramati sesuai dengan ekspektasi teoritis: jangkauan efektif komunikasi memang mengalami penurunan. Halangan fisik menyerap dan memantulkan sinyal, sehingga mengurangi jarak tempuh efektifnya. Akan tetapi, temuan yang paling signifikan dalam skenario ini adalah perbandingan kinerjanya. Meskipun jangkauannya berkurang, sistem LoRa tetap menunjukkan ketangguhan (robustness) yang jauh lebih unggul (superior) jika dibandingkan dengan teknologi komunikasi nirkabel jarak pendek lainnya, seperti WiFi atau Bluetooth, yang jangkauannya akan gagal total dalam kondisi serupa. Sintesis dari kedua hasil pengujian ini—jangkauan 500 meter yang stabil pada LOS dan ketangguhan superior pada NLOS—secara meyakinkan mengonfirmasi bahwa teknologi LoRa adalah pilihan yang sangat tepat dan strategis untuk aplikasi pemantauan lingkungan. Kemampuannya beroperasi di area yang luas dan seringkali terpencil, di mana infrastruktur komunikasi lain mungkin tidak tersedia, menjadikannya pilar utama yang memungkinkan sistem ini berfungsi secara efektif di dunia nyata.

3.4 Responsivitas Sistem: Latensi End-to-End

Metrik kinerja paling kritis untuk sistem peringatan dini adalah latensi. Pengujian kuantitatif dilakukan untuk mengukur waktu tunda total (end-to-end latency) dari saat sensor melakukan pembacaan hingga data ditampilkan di dasbor web. Hasil dari 10 kali percobaan pada jarak 20 meter disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengukuran Latensi Sistem End-to-End

Nomor Percobaan	Waktu Tunda (detik)	Status Transmisi
1	3.02	Berhasil
2	2.86	Berhasil
3	3.15	Berhasil
4	3.41	Berhasil
5	2.97	Berhasil
6	3.08	Berhasil
7	3.20	Berhasil
8	2.91	Berhasil
9	3.11	Berhasil
10	3.09	Berhasil
Rata-rata	3.08	Tingkat Keberhasilan 100%

Latensi sistem rata-rata yang terukur adalah 3,08 detik, dengan tingkat keberhasilan transmisi 100%. Angka ini bukan sekadar metrik teknis; ia adalah bukti kuantitatif dari kapabilitas sistem untuk berfungsi sebagai alat peringatan dini yang efektif. Latensi yang sangat rendah ini secara drastis mengurangi jendela risiko antara terjadinya peristiwa pencemaran dan deteksi. Jika metode manual membutuhkan waktu berjam-jam atau berhari-hari, sistem ini memberikan notifikasi dalam hitungan detik. Kemampuan ini memungkinkan pihak berwenang untuk mengambil tindakan intervensi—seperti mengidentifikasi sumber polusi, memperingatkan pengguna air di hilir, atau mengerahkan tim penanggulangan—saat peristiwa masih berlangsung, bukan setelah kerusakan yang luas telah terjadi. Dengan demikian, latensi rendah ini secara langsung mentransformasi pendekatan pemantauan dari reaktif menjadi proaktif, yang merupakan nilai paling signifikan dari teknologi ini.

3.5 Analisis Sistem Keseluruhan dan Keterbatasan

Sintesis dari keseluruhan hasil pengujian dan implementasi sistem mengonfirmasi secara kuat bahwa arsitektur yang diusulkan dalam penelitian ini yang mengintegrasikan sensor di lapangan, komunikasi LoRa, dan backend cloud berfungsi secara efektif dan menunjukkan kinerja yang tinggi. Analisis ini didasarkan pada tiga pilar kinerja utama yang divalidasi selama pengujian: akurasi sensor, keandalan komunikasi, dan responsivitas sistem.

Validasi sistem ini terbukti sebagai solusi yang tangguh untuk pemantauan kualitas air secara real-time. Hal ini ditunjukkan pertama oleh **kinerja dan akurasi sensor**. Pengujian validasi yang membandingkan sensor pH dan TDS sistem dengan alat ukur standar terkalibrasi menunjukkan tingkat kesalahan relatif yang rendah. Keandalan data ini, yang juga sejalan dengan temuan penelitian sejenis, menjadi fondasi krusial bagi keseluruhan sistem, karena pengambilan keputusan yang tepat sangat bergantung pada data yang akurat[19].

Pilar kedua adalah **keandalan komunikasi LoRa**. Pengujian di lingkungan luar ruangan memvalidasi LoRa sebagai media transmisi yang andal. Dalam kondisi Line-of-Sight (LOS), sistem mampu menjaga komunikasi stabil hingga jarak 500 meter dengan Packet Delivery Ratio (PDR) yang tinggi. Meskipun terjadi redaman sinyal yang dapat diprediksi seiring bertambahnya jarak (terpantau dari RSSI dan SNR), sinyal tetap berada dalam batas operasional. Bahkan dalam kondisi Non-Line-of-Sight (NLOS), di mana jangkauan efektif menurun akibat halangan fisik, LoRa tetap menunjukkan ketangguhan yang superior dibandingkan teknologi komunikasi jarak pendek lainnya. Hasil ini mengonfirmasi bahwa LoRa adalah pilihan teknologi yang sangat tepat untuk aplikasi di area terpencil.

Pilar ketiga, dan yang paling kritis, adalah **responsivitas sistem yang sangat rendah**. Pengujian kuantitatif pada jarak 20 meter menunjukkan latensi end-to-end rata-rata hanya 3,08 detik, dengan tingkat keberhasilan transmisi 100%. Angka ini adalah bukti kuantitatif bahwa sistem mampu berfungsi sebagai alat peringatan dini yang efektif. Latensi ini secara drastis mengurangi jendela risiko, mengubah paradigma pemantauan dari reaktif (yang memakan waktu berjam-jam atau berhari-hari untuk analisis manual) menjadi proaktif[20].

Jika dibandingkan dengan sistem lain, arsitektur yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan Firebase Realtime Database dan dasbor web kustom menawarkan fleksibilitas dan skalabilitas yang superior. Platform pihak ketiga seringkali memiliki batasan kustomisasi, namun pendekatan ini memberikan keleluasaan untuk pengembangan di masa depan, seperti implementasi analitik yang lebih kompleks atau sistem notifikasi yang disesuaikan.

Meskipun hasil validasi sangat positif, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui secara jujur dan harus menjadi dasar untuk perbaikan pada penelitian selanjutnya:

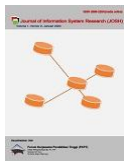
1. Jangkauan Pengujian Terbatas Keterbatasan utama adalah bahwa pengujian latensi yang mendetail dan kuantitatif (menghasilkan angka 3,08 detik) hanya dilakukan pada jarak pendek, yaitu 20 meter. Meskipun uji jangkauan LoRa (di Bagian 3.3) mencapai 500 meter, belum ada analisis latensi yang komprehensif di seluruh rentang jangkauan tersebut. Pemahaman yang lebih lengkap mengenai bagaimana latensi berubah pada jarak yang lebih jauh sangat diperlukan.
2. Parameter Terbatas Sistem saat ini hanya berfokus pada dua parameter: pH dan Total Dissolved Solids (TDS). Walaupun penting, sistem pemantauan yang komprehensif untuk menilai kesehatan sungai secara holistik idealnya juga harus mencakup parameter krusial lainnya seperti Oksigen Terlarut (DO), tingkat kekeruhan (turbidity), dan suhu air.
3. Tidak Ada Uji Jangka Panjang Penelitian ini bersifat studi implementasi dan validasi fungsional, sehingga tidak mengevaluasi kinerja sistem dalam jangka waktu yang lama (misalnya, berbulan-bulan). Uji jangka panjang sangat penting untuk memahami isu-isu keandalan di dunia nyata, seperti sensor drift (penyimpangan pembacaan sensor seiring waktu), menentukan kebutuhan kalibrasi ulang secara periodik, dan menguji ketahanan fisik perangkat keras terhadap kondisi lingkungan yang lembap atau ekstrem.
4. Sumber Daya Prototipe yang dikembangkan dalam penelitian ini masih ditenagai oleh sumber daya eksternal (listrik), seperti yang terlihat pada gambar prototipe. Untuk penyebaran otonom di lokasi lapangan yang terpencil (seperti di hulu sungai yang jauh dari infrastruktur), integrasi dengan sumber daya energi mandiri, seperti panel surya dan baterai, adalah suatu keharusan mutlak.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan memvalidasi sebuah sistem pemantauan kualitas air sungai yang beroperasi secara end-to-end. Sistem ini mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) dengan komunikasi Long Range (LoRa) untuk mengatasi kelemahan fundamental dari metode pemantauan konvensional yang memiliki latensi perolehan data yang tinggi. Di mana metode manual laboratorium bisa membutuhkan waktu berjam-jam hingga berhari-hari untuk menghasilkan data, sistem yang dikembangkan ini membuktikan kapabilitasnya sebagai solusi peringatan dini yang sangat responsif. Arsitektur modular yang terdiri dari node sensor berbasis Arduino Uno dan gateway berbasis ESP32 terbukti efektif dalam mengakuisisi data pH dan TDS dan mentransmisikannya ke cloud server Firebase untuk visualisasi pada antarmuka web kustom. Hasil pengujian fungsional dan kinerja menunjukkan keandalan sistem yang sangat tinggi. Pada pengujian jarak 20 meter, sistem mampu mencapai tingkat keberhasilan transmisi data 100%. Metrik kinerja paling kritis, yaitu latensi end-to-end, tercatat memiliki rata-rata hanya 3,08 detik. Angka ini merupakan bukti kuantitatif dari kemampuan sistem untuk mengurangi secara drastis jendela risiko antara terjadinya pencemaran dan deteksi, mentransformasi pendekatan pemantauan dari reaktif menjadi proaktif. Kinerja komunikasi LoRa juga terkonfirmasi andal untuk aplikasi lapangan, di mana pengujian menunjukkan kemampuan transmisi stabil hingga jarak 500 meter dalam kondisi Line-of-Sight. Akurasi sensor pH dan TDS juga telah divalidasi memiliki tingkat kesalahan relatif yang rendah. Meskipun validitas fungsional sistem telah terbukti, beberapa langkah pengembangan selanjutnya disarankan untuk menyempurnakan sistem. Pertama, perlu dilakukan pengujian jangkauan dan latensi yang lebih ekstensif pada kondisi lingkungan yang lebih beragam dan jarak yang lebih jauh untuk memetakan batas kemampuan LoRa secara realistis. Kedua, direkomendasikan untuk mengintegrasikan sensor tambahan, seperti Oksigen Terlarut (DO), kekeruhan, dan suhu, untuk memungkinkan kalkulasi Indeks Kualitas Air (IKA) yang lebih komprehensif. Ketiga, untuk penyebaran otonom di lokasi terpencil, pengembangan sistem catu daya mandiri berbasis energi terbarukan, seperti panel surya, adalah suatu keharusan. Terakhir, fungsionalitas sistem dapat ditingkatkan dengan implementasi notifikasi otomatis yang terpicu ketika parameter melampaui ambang batas aman.

REFERENCES

- [1] W. Jannah and N. Firmawati, "Sistem Monitoring Kekeruhan Air Menggunakan Sensor Turbidity dan Tranceiver Lora Ebyte E220 Pada Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Masyarakat (PAMSIMAS)," *J. Fis. Unand*, vol. 14, no. 2, pp. 103–109, 2025, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.14.2.103-109.2025>.
- [2] T. H. Rochadiani, H. Santoso, W. Widjaja, U. D. N. Ariqoh, R. A. S. Rahayu, and Y. Natasya, "RANCANG BANGUN SISTEM IOT UNTUK PETERNAKAN IKAN HIAS KOKI DAN MOLLY," *J. TEKINKOM*, vol. 5, no. 2, pp. 210–216, 2022, doi: [10.37600/tekinkom.v5i2.660](https://doi.org/10.37600/tekinkom.v5i2.660).
- [3] I. Anisah *et al.*, "Smart Agriculture untuk Mewujudkan Ketahanan Pangan Berbasis Lora di Desa Kalipadang-Benjeng Gresik," *J. Pengabd. Nas. Indones.*, vol. 5, no. 1, pp. 221–233, 2024, doi: <https://doi.org/10.35870/jpni.v5i1.648>.
- [4] I. S. Pirnadi, C. S. Sarwono, and D. W. Herdiyanto, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Gas CO dan CO 2 Berbasis LoRa dengan Topologi Point to Point," *J. Arus Elektro Indones. Vol.*, vol. 11, no. 02, pp. 28–35, 2025, doi: [10.19184/jaei.v11i1.50993](https://doi.org/10.19184/jaei.v11i1.50993).
- [5] A. G. Utomo, D. Alia, and A. A. I. S. Wahyuni, "Sistem Monitoring Limbah Oli Menggunakan Arduino Uno Berbasis Lora," *J. Penelit. Rumpun Ilmu Tek.*, vol. 3, no. 1, pp. 33–36, 2024, doi: <https://doi.org/10.55606/juprit.v3i2.3722>.
- [6] I. F. Radam, M. Maulida, N. F. Mustamin, F. H. N. Radam, and F. N. Radam, "Pengembangan Sistem Pemantauan Suhu dan Kadar Keasaman Kolam Budidaya Ikan Patin pada IRT Budidaya Patin Surgi Mufti Banjarmasin," *J. Pengabd. ILUNG (Inovasi Lahan Basah Unggul)*, vol. 3, no. 1, pp. 178–184, 2023, doi: <https://doi.org/10.20527/ilung.v3i1>.
- [7] M. Y. Muhaimin, A. D. Santoso, and M. Rahmawati, "CUACA MENGGUNAKAN LORA (LONG RANGE) BERBASIS," *JITET (Jurnal Inform. dan Tek. Elektro Ter.)*, vol. 13, no. 2, 2025, doi: <https://dx.doi.org/10.23960/jitet.v13i2.6335>.
- [8] D. R. Ningtias and N. Zulfa, "MONITORING KUALITAS AIR BERBASIS IoT (INTERNET OF THINGS) UNTUK MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS NELAYAN DI KABUPATEN DEMAK," vol. 5, no. November, pp. 198–206, 2024.
- [9] M. Afdhaluddin and I. P. Teknologi, "Analisis Rancangan Sistem Monitoring Posisi Hewan Menggunakan Lora," *J. Inf. Syst. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 1155–1167, 2023, doi: [10.47065/josh.v4i4.3771](https://doi.org/10.47065/josh.v4i4.3771).
- [10] A. Sanubari, S. Indriyanto, and S. Pramono, "SISTEM MONITORING PH AIR TANAMAN SELADA PADA SISTEM HIDROPONIK BERBASIS LORAWAN," *SINTA J. Sist. Inf. dan Teknol. Komputasi*, vol. 1, no. 1, pp. 57–64, 2024.
- [11] R. F. Ashori, M. Saleh, and A. Aula, "Rancang Bangun Sistem Pertanian Pintar Berbasis Long Range dan Internet of Things," *J. Comput. Sci. INFORMATICS Eng.*, vol. 04, no. 2, pp. 85–95, 2025, doi: <https://doi.org/10.55537/cosie.v4i2.1128>.
- [12] Z. Alamin, Khaeruddin, and Dahlan, "Sistem Penerangan Jalan Cerdas Berbasis Energi Surya dan IoT dengan Komunikasi LoRa," *J. Pengemb. Sains dan Teknol.*, vol. 1, no. 2, pp. 69–79, 2025, doi: [10.63866/jpst.v1i2.78](https://doi.org/10.63866/jpst.v1i2.78).
- [13] V. K. Bakti, A. Basit, and W. Suryanto, "Sistem Monitoring Kapasitas dan Kualitas Air dengan Metode SWAT (Smart Water Meter) menggunakan Protokol Lora berbasis IoT," *Komputika J. Sist. Komput.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–9, 2025, doi: [10.34010/9tchb305](https://doi.org/10.34010/9tchb305).
- [14] M. S. H. Solihin, A. Rosadi, and A. H. Tantri, "Pengembangan Sistem Pemantauan Kualitas Air Sumur secara Real-Time menggunakan Teknologi LoRaWAN Gateway," in *Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika*, Surabaya, 2024, pp. 181–189. doi: [10.31284/p.snestik.2024.5886](https://doi.org/10.31284/p.snestik.2024.5886).



- [15] Y. Sari *et al.*, “Internet of Things untuk Sistem Pemantauan Kualitas Air pada Kolam Ikan Lele pada Pembudidaya TDR Sultan Adam Banjarmasin,” *J. Pengabd. ILUNG (Inovasi Lahan Basah Unggul)*, vol. 3, no. 1, pp. 203–213, 2023, doi: <https://doi.org/10.20527/ilung.v3i1>.
- [16] I. Mahfudi, M. S. S, R. I. Syahputra, and D. Wirayuda, “Optimasi sistem deteksi kebocoran pipa distribusi air bersih secara real-time menggunakan LoRa Ebyte E220-400T22D dan visualisasi webserver,” *J. ELTEK*, vol. 23, no. 2, pp. 72–80, 2025, doi: 10.33795/eltek.v23i2.8683.
- [17] J. Marpaung, F. Imansyah, and R. Ratiandi, “Sistem Informasi Real Time Kadar Garam Air Baku Pdam Tirta Khatulistiwa Pontianak Berbasis Teknologi Lora Gateway,” *JUSTIN J. Sist. dan Teknol. Inf.*, vol. 10, no. 2, pp. 4–11, 2022, doi: 10.26418/justin.v10i2.50314.
- [18] M. M. Danial, F. Imansyah, and I. Sujana, “INOVASI TEKNOLOGI LORA DALAM SISTEM PEMANTAUAN KUALITAS AIR SUNGAI UNTUK Mendukung pertumbuhan budidaya tambak ikan yang berkelanjutan,” *J. ABDI Insa.*, vol. 11, no. September, pp. 23–33, 2024, doi: <https://doi.org/10.29303/abdiinsani.v11i3.1675>.
- [19] F. Lazuardi, J. T. Elektro, P. N. Jakarta, and J. Barat, “Implementasi sistem iot berbasis lora dan arima untuk optimasi distribusi air bersih,” *J. Elektr.*, vol. 17, no. 2, pp. 94–101, 2025, doi: 10.26623/elektrika.v17i2.12654.
- [20] M. N. Gani, R. Hanifatunnisa, R. Hasanah, M. Yamin, and D. S. Rohman, “Pemantauan kualitas air berbasis teknologi LoRa dengan metode Naïve Bayes,” *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 4, no. 2, pp. 145–154, 2024, doi: <https://doi.org/10.35313/jitel.v4.i2.2024.145-154>.