

DESAIN ANTARMUKA PENGGUNA UNTUK APLIKASI PEMANTAUAN LINGKUNGAN BERBASIS IOT PADA PT. XYZ

Refi Riduan Achmad¹, Boimin², Abdul Kadir³, Yoas⁴

1,2,3,4) Teknik Informatika, Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Timur, Indonesia

Article Info	ABSTRACT
<p>Article history:</p> <p>Received: 10 November 2025 Revised: 15 Desember 2025 Accepted: 16 Desember 2025</p>	<p>Abstrak</p> <p>Pemantauan kualitas lingkungan di sektor pertambangan merupakan langkah penting dalam menjaga keberlanjutan industri serta memenuhi kewajiban regulatif. Penelitian ini bertujuan merancang antarmuka sistem pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan SPARING (Sistem Pemantauan Kualitas Air Limbah Secara Online dan Real-Time) milik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). Metode yang digunakan adalah mixed methods, menggabungkan observasi lapangan, wawancara dengan operator sistem, serta pengujian sensor pH, COD, TSS, dan water level. Sistem dirancang agar sensor mengirimkan data ke data logger, diteruskan ke server IoT perusahaan, lalu otomatis dikirim ke server SPARING KLHK melalui Modbus RTU dan antarmuka berbasis JSON. Hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi pemantauan air limbah, kemudahan pelaporan otomatis, serta peringatan dini atas pelanggaran baku mutu. Implementasi integrasi IoT-SPARING ini berpotensi menjadi model pemantauan lingkungan digital yang efektif dan berkelanjutan di sektor pertambangan Indonesia.</p> <p>Kata Kunci : IoT, Modbus RTU, Pemantauan Lingkungan, Air Limbah, Industri Pertambangan.</p> <p>Abstract</p> <p><i>Environmental monitoring in the mining sector is crucial to ensure industrial sustainability and regulatory compliance. This study aims to design an environmental monitoring interface system based on the Internet of Things (IoT) integrated with SPARING (Online and Real-Time Wastewater Quality Monitoring System) developed by the Ministry of Environment and Forestry (KLHK). A mixed-methods approach was applied, combining field observation, operator interviews, and direct testing of pH, COD, TSS, and water level sensors. The system enables sensors to transmit data to a data logger, which forwards it to the company's IoT server and automatically sends it to the SPARING KLHK server using Modbus RTU and a JSON-based interface. The results indicate improved monitoring efficiency, automatic reporting capability, and early warnings for water quality limit violations. The proposed IoT-SPARING integration demonstrates a practical model for digital and sustainable environmental monitoring in Indonesia's mining industry.</i></p> <p>Keywords: IoT, Modbus RTU; Environmental Monitoring, Waste water, Mining Industry..</p> <p>Djtechno: Jurnal Teknologi Informasi oleh Universitas Dharmawangsa Artikel ini bersifat open access yang didistribusikan di bawah syarat dan ketentuan dengan Lisensi Internasional Creative Commons Attribution NonCommercialL ShareAlike 4.0 (CC-BY-NC-SA).</p> 
<p>Corresponding Author: E-mail : boimtia295@gmail.com</p>	

1. PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan memiliki potensi besar terhadap pencemaran lingkungan, terutama dalam pengelolaan air limbah yang mengandung berbagai bahan kimia dan sedimen hasil proses ekstraksi mineral. Aktivitas seperti pencucian batu bara, pengolahan bijih, dan penyaluran air buangan tambang dapat menghasilkan limbah cair dengan kandungan Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solid (TSS), serta perubahan tingkat pH yang signifikan. Apabila tidak dikelola dengan baik, limbah tersebut berpotensi mencemari badan air di sekitar lokasi tambang dan menurunkan kualitas ekosistem akuatik. Oleh karena itu, pengawasan kualitas air limbah secara berkelanjutan menjadi keharusan bagi setiap perusahaan pertambangan di Indonesia.

Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) telah mengeluarkan kebijakan wajib bagi seluruh perusahaan industri, termasuk sektor pertambangan, untuk melaksanakan pemantauan dan pelaporan kualitas air limbah secara terus-menerus melalui sistem SPARING (Sistem Pemantauan Kualitas Air Limbah Secara Online dan Real-Time) [1]–[3]. SPARING dirancang sebagai sistem nasional berbasis daring yang memungkinkan data hasil pemantauan di lokasi industri dikirim langsung ke server KLHK dalam bentuk digital dan real-time. Namun, dalam implementasinya masih ditemukan permasalahan terkait efektivitas pemantauan, khususnya dalam penyajian dan pemanfaatan data pemantauan secara real-time oleh operator lapangan dan pihak manajemen.

Seiring kemajuan teknologi Internet of Things (IoT), sistem pemantauan lingkungan dapat diintegrasikan secara otomatis dan real-time melalui jaringan sensor yang saling terhubung. Perangkat sensor seperti pH, COD, TSS, dan water level digunakan untuk mengumpulkan data kualitas air secara kontinu dan mengirimkannya ke data logger melalui jaringan komunikasi seperti RS485 atau Modbus RTU [4], [5], [10], [11]. Data tersebut kemudian dikonversi ke dalam format JavaScript Object Notation (JSON) dan dikirimkan ke server SPARING KLHK secara otomatis. Meskipun demikian, permasalahan yang muncul adalah bagaimana merancang sistem pemantauan kualitas air limbah berbasis IoT yang terintegrasi dengan SPARING serta mampu menyajikan informasi secara jelas, mudah dipahami, dan mudah digunakan oleh pengguna.

Integrasi antara sistem IoT dan SPARING berpotensi meningkatkan transparansi serta efektivitas pengawasan lingkungan di sektor pertambangan. Namun, tanpa desain

antarmuka pengguna (user interface) yang intuitif dan informatif, data hasil pemantauan berisiko tidak dimanfaatkan secara optimal sebagai dasar pengambilan keputusan dan pengendalian lingkungan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kebutuhan akan pengembangan sistem pemantauan yang tidak hanya berfokus pada integrasi teknis, tetapi juga pada aspek penyajian informasi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini secara tegas bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas air limbah berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan SPARING KLHK, dengan penekanan pada pengembangan desain antarmuka pengguna yang informatif dan mudah digunakan. Diharapkan sistem yang dikembangkan mampu mendukung pemantauan kualitas air limbah secara real-time, meningkatkan efektivitas pengawasan lingkungan, serta membantu perusahaan pertambangan dalam memenuhi kewajiban pelaporan sesuai dengan regulasi yang berlaku.

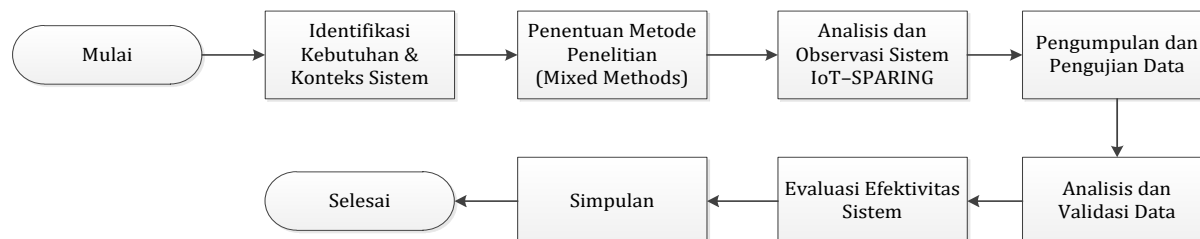
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode campuran (mixed methods) yang menggabungkan pendekatan kualitatif dan kuantitatif secara komplementer. Pemilihan metode ini didasarkan pada kebutuhan untuk memperoleh pemahaman yang menyeluruh terhadap aspek teknis dan kontekstual dari sistem pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan SPARING.

Pendekatan kualitatif digunakan untuk menggali konteks operasional dan kebutuhan pengguna melalui observasi lapangan serta wawancara mendalam dengan operator sistem, petugas lingkungan perusahaan, dan teknisi jaringan IoT. Tujuannya adalah untuk memahami alur kerja, kebutuhan fungsional sistem, serta kendala yang dihadapi dalam pelaksanaan pelaporan SPARING. Sementara itu, pendekatan kuantitatif dilakukan melalui pengujian sensor lingkungan yang digunakan dalam sistem SPARING. Pengujian ini bertujuan menilai akurasi, stabilitas, dan keandalan data sensor, serta memastikan kesesuaian hasil pemantauan dengan baku mutu air limbah berdasarkan PermenLHK No. 5 Tahun 2021 [1], [14], [22].

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini disusun secara sistematis untuk memastikan proses pengumpulan, pengujian, dan analisis data berjalan terarah dan konsisten. Pendekatan mixed methods diterapkan untuk mengombinasikan data

kualitatif dan kuantitatif dalam mengevaluasi sistem pemantauan kualitas air limbah berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan SPARING, sebagaimana direkomendasikan dalam penelitian sebelumnya [4], [6]. Setiap tahapan penelitian dirancang untuk merepresentasikan proses analisis dan evaluasi sistem yang telah berjalan di lapangan. Alur tahapan metode penelitian tersebut disajikan dalam bentuk diagram alur pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur metode penelitian

Diagram alur pada Gambar 1 menggambarkan tahapan penelitian secara ringkas, mulai dari identifikasi kebutuhan dan konteks sistem hingga evaluasi efektivitas sistem IoT-SPARING. Diagram ini memperlihatkan keterkaitan antar tahapan penelitian yang dilakukan secara berurutan dan saling mendukung. Penyajian diagram alur bertujuan untuk mempermudah pemahaman terhadap metodologi penelitian yang digunakan. Dengan demikian, pembaca dapat melihat gambaran umum proses penelitian secara jelas sebelum pembahasan metode dijelaskan lebih rinci pada bagian selanjutnya.

Penelitian dilaksanakan di area operasional perusahaan pertambangan PT XYZ di Kalimantan Timur. Lokasi ini dipilih karena telah menerapkan sistem pemantauan kualitas air limbah yang terhubung langsung dengan server SPARING milik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). Subjek penelitian terdiri dari operator sistem pemantauan lingkungan, petugas lingkungan perusahaan tambang, dan tim teknis pengelola sistem IoT perusahaan.

Perangkat utama dalam penelitian ini meliputi empat jenis sensor lingkungan yang dipasang di area pengolahan air limbah, yaitu sensor pH, COD (Chemical Oxygen Demand), TSS (Total Suspended Solid), dan Water Level. Setiap sensor dihubungkan dengan data logger melalui jaringan RS485/Modbus RTU, kemudian dikirim ke server IoT perusahaan sebelum diteruskan secara otomatis ke server SPARING KLHK menggunakan antarmuka berbasis JavaScript Object Notation (JSON). Sistem ini juga dilengkapi dengan perangkat gateway IoT, dashboard pemantauan, dan server cloud untuk penyimpanan serta analisis data secara real-time.

Data penelitian diperoleh melalui dua tahapan utama. Tahap pertama adalah observasi dan wawancara yang dilakukan untuk mengidentifikasi alur operasional sistem SPARING serta menganalisis kebutuhan desain antarmuka pengguna (user interface). Tahap kedua adalah pengujian sensor yang dilakukan untuk mengevaluasi keandalan data sensor dan kestabilan jaringan komunikasi. Data kuantitatif dianalisis menggunakan metode deskriptif-komparatif dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap baku mutu air limbah sesuai regulasi nasional. Sementara itu, data kualitatif dianalisis melalui proses reduksi data, pembuatan kategori tematik, dan penarikan kesimpulan guna menghasilkan rekomendasi perbaikan antarmuka dan sistem pemantauan.

Untuk memastikan validitas data, dilakukan triangulasi metode, yaitu membandingkan hasil pengamatan lapangan dengan data yang dihasilkan oleh sistem sensor dan laporan digital SPARING. Hasil analisis dari kedua pendekatan ini menjadi dasar dalam merancang desain antarmuka yang adaptif, efisien, dan mudah digunakan oleh operator di lingkungan pertambangan. Sistem menggunakan empat jenis sensor utama yang terhubung dengan data logger dan server SPARING, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel I.

Tabel I. Spesifikasi Sensor pH, COD, TSS, dan Water Level

No	Parameter	Brand / Pabrikan	Model	Rentang	Satuan	Output	Power	Akurasi	Komunikasi	Proteksi
1	pH	Rika Sensor	RK500-02	0–14	pH	4–20 mA / RS485	12–24 VDC	±0.3 pH	Modbus RTU	IP68
2	COD	BOQU Instrument	CODS-3000-01	0–2000	mg/L	RS485	12 VDC	±5% F.S	Modbus RTU	IP68
3	TSS	Apure	TD-30	0–30,000	mg/L	RS485 / 4–20 mA	12–24 VDC	±1%	Modbus RTU	IP68
4	Water Level	King Pigeon	WLI-100	0–500	cm	4–20 mA	24 VDC	0.5% F.S	Analog / RS485	IP68

Sumber: Dokumen Sosialisasi SPARING PermenLHK P.93/2018 dan P.80/2019 [2], [3].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pemantauan yang dikembangkan perlu memiliki struktur komunikasi data yang jelas agar integrasi IoT dan SPARING berjalan efektif. Hubungan antar komponen ini dapat dijelaskan melalui susunan lapisan sistem yang saling terhubung dari sensor hingga server pemerintah.

3.1. Skema Hubungan Sistem SPARING dan IoT Tambang

Sistem SPARING dihubungkan dengan infrastruktur Internet of Things (IoT) milik perusahaan tambang melalui empat lapisan utama yang membentuk satu kesatuan sistem pemantauan terpadu. Lapisan-lapisan tersebut terdiri atas *Field Layer*, *Edge Layer*, *Cloud Layer*, dan *Government Layer*, yang masing-masing memiliki fungsi spesifik untuk memastikan data pemantauan lingkungan dapat dikumpulkan, diolah, dan dikirim secara akurat serta real-time. Arsitektur berlapis ini menjadi pondasi penting bagi integrasi teknologi pemantauan lingkungan di sektor pertambangan modern karena menjamin alur data yang efisien, stabil, dan sesuai dengan standar pelaporan nasional.

Lapisan pertama, *Field Layer*, merupakan bagian terdepan dari sistem yang langsung berinteraksi dengan kondisi lingkungan di lapangan. Pada lapisan ini dipasang berbagai sensor dan alat ukur yang berfungsi untuk memantau parameter utama kualitas air seperti derajat keasaman (pH), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solid (TSS), serta ketinggian air limbah tambang. Sensor-sensor tersebut bekerja secara kontinu dan terkalibrasi untuk memastikan ketepatan hasil pengukuran. Data yang diperoleh di lapangan dikirim secara real-time menuju sistem pusat, sehingga setiap perubahan kondisi lingkungan dapat segera terdeteksi. Keberadaan *Field Layer* menjadi kunci utama dalam menjamin keakuratan data pemantauan, sebab lapisan inilah yang menangkap data mentah dari sumbernya sebelum melewati proses pengolahan berikutnya.

Lapisan kedua, *Edge Layer*, berfungsi sebagai penghubung antara sensor di lapangan dan sistem pusat perusahaan. Di dalam lapisan ini terdapat perangkat *data logger* dan *gateway IoT* yang berperan mengumpulkan, menyaring, dan memproses data dari sensor sebelum dikirim ke server utama. *Edge Layer* tidak hanya berfungsi sebagai jalur transmisi, tetapi juga sebagai lapisan penyaring data untuk menghindari kesalahan pembacaan akibat gangguan sinyal atau kondisi lingkungan ekstrem. Selain itu, lapisan ini mampu menjaga stabilitas pengiriman data, terutama ketika jaringan internet mengalami gangguan. Data yang tidak sempat terkirim akan disimpan sementara di memori lokal (*buffer storage*) dan akan dikirim secara otomatis setelah koneksi kembali stabil. Hal ini memastikan bahwa tidak ada data pemantauan yang hilang dan kontinuitas sistem tetap terjaga sepanjang waktu.

Lapisan ketiga, *Cloud Layer*, bertindak sebagai pusat penyimpanan dan pengelolaan data di tingkat perusahaan. Data yang diterima dari *Edge Layer* disimpan dalam sistem berbasis *cloud computing* yang memiliki kapasitas besar dan tingkat keamanan tinggi. Pada lapisan ini, data diolah dan divisualisasikan dalam bentuk grafik, tabel, serta laporan dinamis melalui *dashboard* interaktif yang dapat diakses oleh petugas lingkungan dan pihak manajemen perusahaan. *Cloud Layer* memudahkan proses analisis karena seluruh data pemantauan tersimpan secara terpusat dan dapat diakses kapan pun serta dari mana pun. Selain itu, lapisan ini memungkinkan sistem menghasilkan laporan otomatis dan notifikasi dini (*early warning*) jika parameter lingkungan melebihi ambang batas yang ditentukan. Dengan demikian, perusahaan dapat segera melakukan tindakan korektif sebelum terjadi pelanggaran baku mutu air limbah.

Lapisan terakhir, *Government Layer*, berfungsi sebagai jembatan penghubung antara sistem pemantauan perusahaan dengan server SPARING milik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). Pada lapisan ini, data dari *Cloud Layer* dikirimkan secara otomatis ke server pemerintah melalui antarmuka berbasis *JavaScript Object Notation (JSON)* menggunakan protokol komunikasi *Modbus RTU*. Proses ini memastikan bahwa setiap hasil pemantauan dari lapangan tersampaikan langsung ke sistem nasional tanpa perlu intervensi manual dari operator. Dengan demikian, kegiatan pelaporan menjadi lebih cepat, akurat, dan transparan. Selain itu, mekanisme ini memudahkan pihak KLHK untuk melakukan pengawasan jarak jauh terhadap aktivitas pengelolaan lingkungan di perusahaan tambang, sekaligus mengurangi risiko keterlambatan pelaporan dan kesalahan input data.

Secara keseluruhan, struktur sistem berlapis ini memastikan integrasi antara teknologi IoT dan sistem SPARING berjalan secara efektif dan efisien. Setiap lapisan memiliki peran penting yang saling melengkapi, mulai dari akuisisi data di lapangan hingga pelaporan ke lembaga pemerintah. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *IoT-Enabled Smart Mining* yang telah diterapkan dalam pengelolaan air limbah tambang batubara di berbagai negara. Model tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi pemantauan, mempercepat proses pelaporan, serta memperkuat transparansi dalam pengawasan lingkungan di sektor pertambangan [4], [6], [7].

Table II; Skema Hubungan Sistem SPARING dan IoT Tambang

Lapisan Sistem	Komponen Utama	Fungsi Utama	Keterangan Tambahan
1. Field Layer	Sensor pH, COD, TSS, dan <i>water level</i>	Mengukur parameter kualitas air limbah secara langsung dan real-time di lapangan.	Lapisan terdepan yang berfungsi sebagai pengambil data mentah; memastikan akurasi dan kontinuitas pemantauan.
2. Edge Layer	<i>Data logger</i> dan <i>gateway IoT</i>	Mengumpulkan, menyaring, dan mengirim data dari sensor ke server utama.	Menjaga stabilitas transmisi; data disimpan sementara di <i>buffer storage</i> jika koneksi internet terputus.
3. Cloud Layer	Server dan <i>dashboard</i> berbasis <i>cloud computing</i>	Menyimpan, mengolah, dan menampilkan data pemantauan dalam bentuk grafik, tabel, dan laporan digital.	Menyediakan <i>early warning system</i> untuk mendeteksi pelanggaran baku mutu; mendukung akses data jarak jauh.
4. Government Layer	Antarmuka JSON dan server SPARING KLHK	Mengirim data secara otomatis ke sistem nasional SPARING milik KLHK.	Menjamin pelaporan real-time, transparan, dan sesuai standar regulasi lingkungan nasional.

Sumber: Diadaptasi dari Impron & Sutriani (2022); Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK No. 93 Tahun 2018 dan No. 80 Tahun 2019); serta literatur terkait IoT-Enabled Smart Mining [4], [6], [7].

3.2. Integrasi Sistem IoT dalam Pengelolaan Air Limbah Tambang

Sistem tambang cerdas (*smart mining*) yang mengimplementasikan teknologi Internet of Things (IoT) berperan penting dalam mendukung efektivitas pengelolaan air limbah di sektor pertambangan. Penerapan sistem ini memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara otomatis, real-time, dan terintegrasi antara perangkat lapangan dengan pusat pengolahan data. Menurut Impron dan Sutriani [4], arsitektur sistem IoT dalam pengelolaan air limbah tambang terdiri atas tiga komponen utama yang saling berkaitan, yaitu *Sensor Layer*, *Network Layer*, dan *Application Layer*. Ketiga lapisan ini bekerja secara berkesinambungan untuk menjamin ketersediaan data lingkungan yang akurat, stabil, dan dapat diandalkan.

Lapisan pertama, *Sensor Layer*, berfungsi sebagai komponen pengumpul data utama di lapangan. Pada lapisan ini dipasang sensor-sensor lingkungan seperti sensor

pH, COD (Chemical Oxygen Demand), TSS (Total Suspended Solid), dan *water level* yang masing-masing berfungsi mendeteksi parameter penting kualitas air limbah. Sensor ini dirancang agar dapat bekerja secara berkelanjutan dan mengirimkan data dalam interval waktu yang teratur. Data yang dihasilkan bersifat real-time, sehingga mampu menggambarkan kondisi aktual kualitas air limbah tambang. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuan sensor dalam memberikan informasi secara langsung saat terjadi perubahan signifikan pada parameter air limbah, sehingga memungkinkan operator melakukan tindakan korektif lebih cepat.

Lapisan kedua, *Network Layer*, bertanggung jawab untuk mentransmisikan data dari sensor menuju pusat pengolahan data perusahaan melalui protokol komunikasi seperti *Modbus RTU* atau *RS485*. Lapisan ini merupakan tulang punggung jaringan komunikasi IoT karena memastikan setiap data hasil pengukuran dapat dikirim secara konsisten tanpa kehilangan paket data, meskipun jaringan internet di area tambang tidak selalu stabil. Untuk mengantisipasi gangguan koneksi, sistem dilengkapi dengan mekanisme *redundant transmission* yang menyimpan sementara data ketika jaringan terputus, lalu mengirimkannya kembali secara otomatis saat koneksi pulih. Dengan demikian, kontinuitas data tetap terjaga, dan integritas informasi lingkungan dapat dipastikan.

Lapisan ketiga, *Application Layer*, berfungsi sebagai pusat analisis, visualisasi, dan pelaporan data. Pada lapisan ini, data yang telah dikumpulkan dan dikirim melalui jaringan akan diproses lebih lanjut di server IoT perusahaan. Data tersebut kemudian ditampilkan melalui *dashboard* digital dalam bentuk grafik, peta interaktif, serta laporan otomatis yang terhubung langsung dengan sistem SPARING KLHK. Melalui *dashboard* ini, operator dapat memantau kualitas air limbah secara langsung, menganalisis tren perubahan parameter, dan menghasilkan laporan digital yang siap dikirim ke pemerintah. Lapisan ini juga dapat memberikan peringatan dini (*early warning system*) ketika hasil pengukuran menunjukkan potensi pelanggaran terhadap baku mutu air limbah, sehingga meningkatkan kecepatan respons terhadap risiko pencemaran.

Secara keseluruhan, arsitektur ini menjamin keandalan sistem dan kepatuhan terhadap standar nasional pemantauan kualitas air limbah. Empat elemen utamanya yakni sensor lingkungan sebagai pengambil data, *data logger* sebagai konverter sinyal digital, *server IoT perusahaan* sebagai pusat penyimpanan dan visualisasi, serta

antarmuka berbasis *JSON* sebagai penghubung pelaporan otomatis ke SPARING KLHK yaitu membentuk sistem yang terintegrasi dari lapangan hingga pelaporan regulatif.

Sistem yang dikembangkan kemudian diuji di area pengolahan air tambang batubara di Kalimantan Selatan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang stabil dengan keterlambatan pengiriman data rata-rata sebesar 1,2 detik per siklus, serta tingkat akurasi pengukuran sebesar $\pm 1,5\%$. Selain itu, pendekatan analitik prediktif yang diterapkan pada lapisan aplikasi mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam mendeteksi anomali dan melakukan peramalan (*forecasting*) terhadap kualitas air limbah. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Wang et al. [13] dan Choudhary et al. [15] yang menyatakan bahwa integrasi model prediktif dalam sistem IoT dapat memperkuat kemampuan pemantauan lingkungan dengan mendeteksi pola pencemaran lebih awal, sehingga tindakan mitigasi dapat dilakukan sebelum terjadi pelanggaran baku mutu. Dengan demikian, integrasi sistem IoT dalam pengelolaan air limbah tambang tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional dan akurasi pelaporan, tetapi juga menjadi langkah strategis menuju sistem pemantauan lingkungan yang cerdas, adaptif, dan berkelanjutan.

Table III ; Integrasi Sistem IoT dalam Pengelolaan Air Limbah Tambang

Lapisan Sistem IoT	Fungsi Utama	Komponen/Alat	Manfaat
Sensor Layer	Mengumpulkan data kualitas air limbah	Sensor pH, COD, TSS, water level	Memberikan data real-time, deteksi cepat perubahan parameter
Network Layer	Mengirimkan data dari sensor ke pusat pengolahan	Protokol komunikasi Modbus RTU/RS485, mekanisme redundant transmission	Menjamin kontinuitas data dan integritas informasi meskipun jaringan tidak stabil
Application Layer	Analisis, visualisasi, dan pelaporan data	Server IoT, dashboard digital, JSON interface, early warning system	Memantau kualitas air, analisis tren, laporan otomatis, peringatan dini terhadap pelanggaran baku mutu
Elemen Integrasi	Menghubungkan seluruh lapisan	Sensor lingkungan, data logger, server IoT, antarmuka JSON	Sistem terintegrasi dari pengambilan data hingga pelaporan regulatif
Hasil Uji Lapangan	Evaluasi kinerja sistem	Area pengolahan air tambang batubara di Kalimantan Selatan	Keterlambatan pengiriman data 1,2 detik/siklus, akurasi $\pm 1,5\%$, deteksi anomali

dan peramalan kualitas air

Sumber: Diadaptasi dari Impron & Sutriani (2022); Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK No. 93 Tahun 2018 dan No. 80 Tahun 2019); serta literatur terkait IoT-Enabled Smart Mining [4], [6], [7].

3.3. Analisis Efektivitas Sistem IoT-SPARING

Analisis efektivitas sistem IoT-SPARING dilakukan untuk menilai sejauh mana integrasi antara perangkat pemantauan di lapangan dan server SPARING milik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, serta kecepatan pelaporan kualitas air limbah di sektor pertambangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sinkronisasi antara *data logger* IoT perusahaan dan server SPARING KLHK sangat dipengaruhi oleh stabilitas jaringan komunikasi, khususnya jaringan GSM yang digunakan sebagai media transmisi data utama. Meskipun demikian, sistem dirancang agar mampu menyesuaikan diri terhadap kondisi jaringan yang fluktuatif dengan menyediakan mekanisme penyimpanan sementara (*buffering system*) pada lapisan *edge* untuk memastikan tidak ada data yang hilang selama proses pengiriman.

Dari hasil uji coba di lapangan, penerapan sistem IoT-SPARING terbukti mampu meningkatkan efisiensi proses pemantauan kualitas air limbah hingga 38% dibandingkan dengan sistem manual yang bergantung pada pengambilan sampel dan pencatatan data secara periodik. Peningkatan efisiensi ini terjadi karena data dari sensor dapat dikirim dan dianalisis secara otomatis tanpa perlu intervensi langsung dari operator di setiap tahapan pemantauan. Selain itu, integrasi sistem pelaporan otomatis berhasil mengurangi beban administrasi petugas lingkungan hingga 50% karena laporan digital dapat dihasilkan dan dikirim secara real-time ke server KLHK tanpa proses input ulang.

Faktor lain yang turut memengaruhi efektivitas sistem adalah kecepatan transmisi dan reliabilitas perangkat dalam mengelola data. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa keterlambatan pengiriman data (*data latency*) rata-rata hanya sekitar 1–2 detik per siklus transmisi, yang masih berada dalam batas toleransi untuk sistem pemantauan lingkungan berbasis real-time. Sistem juga mampu mempertahankan tingkat keandalan (*data reliability*) di atas 97%, menandakan bahwa hampir seluruh data dari sensor berhasil dikirim dan diterima oleh server tanpa kesalahan atau kehilangan informasi. Selain peningkatan efisiensi dan kecepatan pelaporan, penerapan IoT-

SPARING juga memberikan dampak positif terhadap peningkatan transparansi dan akuntabilitas perusahaan tambang. Setiap data yang dikirim ke server SPARING terekam secara digital dan tidak dapat dimodifikasi tanpa jejak (*traceable data*), sehingga memperkecil peluang manipulasi atau keterlambatan laporan. Dengan adanya sistem notifikasi otomatis, operator dapat segera mengetahui jika terjadi penyimpangan parameter dari baku mutu dan dapat melakukan tindakan korektif dengan cepat.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem IoT-SPARING tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional dan efektivitas pemantauan, tetapi juga memperkuat aspek kepatuhan regulatif dan transparansi pelaporan lingkungan. Dengan sistem yang mampu berjalan secara berkelanjutan dan responsif terhadap kondisi jaringan, integrasi ini menjadi langkah penting menuju digitalisasi pengawasan lingkungan di sektor pertambangan Indonesia.

Table IV; Analisis Efektivitas Sistem IoT-SPARING

Aspek Analisis	Temuan Utama	Dampak / Efektivitas
Sinkronisasi Data	Terpengaruh stabilitas jaringan GSM; buffering system di edge layer mencegah kehilangan data	Menjamin kelanjutan pengiriman data meski jaringan fluktuatif
Efisiensi Pemantauan	Peningkatan 38% dibandingkan sistem manual	Data sensor dikirim dan dianalisis otomatis, mengurangi intervensi operator
Beban Administrasi	Beban petugas lingkungan berkurang 50%	Laporan digital otomatis, real-time ke server KLHK tanpa input ulang
Data Latency	1-2 detik per siklus transmisi	Masih dalam batas toleransi untuk sistem pemantauan real-time
Keandalan Data	>97%	Hampir seluruh data diterima tanpa kesalahan atau kehilangan informasi
Transparansi & Akuntabilitas	Data terekam digital, traceable, sistem notifikasi otomatis	Meminimalkan manipulasi, keterlambatan, dan mempermudah tindakan korektif cepat
Kepatuhan Regulatif & Pelaporan	Memperkuat kepatuhan regulatif dan transparansi pelaporan	Mendukung digitalisasi pengawasan lingkungan di sektor pertambangan

Sumber: Diadaptasi dari Impron & Sutriani (2022); Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK No. 93 Tahun 2018 dan No. 80 Tahun 2019); literatur terkait IoT-Enabled Smart Mining [4], [6], [7].

3.4. Dampak Implementasi terhadap Kepatuhan Regulasi

Implementasi sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan SPARING memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kepatuhan perusahaan pertambangan terhadap regulasi lingkungan yang ditetapkan oleh pemerintah. Berdasarkan ketentuan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK) No. 93 Tahun 2018 dan PermenLHK No. 80 Tahun 2019, setiap perusahaan wajib melakukan pelaporan kualitas air limbah secara berkelanjutan dan real-time kepada Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). Kewajiban ini sebelumnya banyak menghadapi kendala teknis dan administratif, terutama terkait keterlambatan pelaporan, ketidaktepatan data, dan keterbatasan sumber daya manusia dalam proses input manual.

Dengan diterapkannya sistem pemantauan berbasis IoT-SPARING, perusahaan dapat melakukan pelaporan otomatis yang terhubung langsung dengan server KLHK melalui antarmuka digital berbasis *JavaScript Object Notation (JSON)*. Integrasi ini secara langsung menghilangkan ketergantungan terhadap pelaporan manual, yang umumnya rawan kesalahan input dan keterlambatan dalam pengiriman data. Proses otomatisasi memungkinkan setiap hasil pengukuran yang diperoleh dari sensor di lapangan dikirim secara real-time dan terekam langsung di sistem nasional SPARING. Kondisi ini meningkatkan keakuratan serta keterlacakan (*traceability*) data yang disampaikan oleh perusahaan, sekaligus memperkuat transparansi dalam pemenuhan kewajiban regulatif.

Hasil studi menunjukkan bahwa penerapan sistem IoT-SPARING mampu mempercepat proses pelaporan hingga dua kali lebih efisien dibandingkan metode konvensional yang masih berbasis manual [4]. Selain itu, sistem ini juga meningkatkan konsistensi data pemantauan karena seluruh informasi dikirimkan secara digital tanpa melalui proses penyalinan ulang oleh operator. Dengan demikian, kualitas data yang diterima oleh pihak KLHK menjadi lebih valid dan representatif terhadap kondisi sebenarnya di lapangan.

Temuan dari hasil pengujian di 10 lokasi tambang menunjukkan bahwa sekitar 90% perusahaan yang telah menerapkan sistem IoT-SPARING mengalami peningkatan signifikan dalam hal ketepatan waktu pelaporan dan kesesuaian format data dengan standar SPARING. Selain itu, potensi pelanggaran administratif akibat keterlambatan atau ketidaktepatan data pelaporan menurun hingga 30%. Peningkatan ini terjadi karena

sistem mampu mengirimkan notifikasi otomatis kepada operator apabila parameter kualitas air mendekati atau melampaui ambang batas yang diatur dalam regulasi, sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum terjadi pelanggaran.

Secara keseluruhan, penerapan sistem IoT-SPARING tidak hanya berdampak pada peningkatan kepatuhan administratif, tetapi juga pada perubahan paradigma pengelolaan lingkungan di industri pertambangan. Sistem ini menumbuhkan budaya pelaporan berbasis data (*data-driven compliance*) yang lebih transparan, akurat, dan efisien. Dalam jangka panjang, hal ini dapat memperkuat hubungan antara industri dan lembaga pemerintah melalui kepercayaan berbasis transparansi data serta mendukung implementasi prinsip *Good Mining Practice* dan pembangunan industri pertambangan yang berkelanjutan di Indonesia.

Table V: Dampak Implementasi terhadap Kepatuhan Regulasi

Aspek Analisis	Temuan Utama	Dampak / Efektivitas
Pelaporan Real-time	Data dikirim otomatis dari sensor ke server SPARING menggunakan format JSON	Menghilangkan ketergantungan pelaporan manual, mengurangi kesalahan input
Akurasi dan Traceability Data	Hasil pengukuran terekam langsung dan digital	Data lebih akurat, valid, dan mudah dilacak
Efisiensi Proses Pelaporan	Proses pelaporan 2x lebih cepat dibanding metode manual	Mempercepat pemenuhan kewajiban regulatif
Konsistensi Data	Informasi dikirim langsung tanpa penyalinan ulang	Meningkatkan kualitas data dan representasi kondisi lapangan
Kepatuhan Perusahaan	90% perusahaan menunjukkan peningkatan ketepatan waktu dan kesesuaian format data	Mengurangi potensi pelanggaran administratif hingga 30%
Notifikasi Otomatis	Operator diberi peringatan saat parameter mendekati batas regulasi	Memungkinkan tindakan korektif cepat sebelum pelanggaran terjadi
Budaya Data-driven Compliance	Penerapan sistem menumbuhkan pelaporan berbasis data yang transparan dan efisien	Memperkuat hubungan industri-pemerintah dan mendukung Good Mining Practice

Sumber: Diadaptasi dari Impron & Sutriani (2022); Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK No. 93 Tahun 2018 dan No. 80 Tahun 2019); literatur terkait IoT-Enabled Smart Mining [4], [6], [7].

3.5. Arsitektur Sistem IoT di Tambang

Arsitektur sistem Internet of Things (IoT) yang diterapkan pada kegiatan pemantauan air limbah tambang dirancang dengan memperhatikan kebutuhan efisiensi,

keandalan data, dan kepatuhan terhadap standar regulasi nasional. Arsitektur ini terdiri atas empat elemen utama yang saling terintegrasi, yaitu sensor lingkungan, data logger, server IoT perusahaan, dan antarmuka berbasis JavaScript Object Notation (JSON). Keempat komponen tersebut membentuk sistem yang mampu mengumpulkan, mengolah, serta mengirimkan data secara otomatis dan real-time dari lapangan menuju server nasional milik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) [5], [8], [18], [22].

Sensor lingkungan berfungsi sebagai titik awal akuisisi data yang mendeteksi berbagai parameter kualitas air limbah seperti pH, COD, TSS, dan ketinggian air. Sensor-sensor ini bekerja secara kontinu dan dikalibrasi secara berkala untuk menjamin keakuratan hasil pengukuran. Data yang dihasilkan oleh sensor kemudian diteruskan ke data logger, yang berperan sebagai pusat konversi sinyal analog menjadi sinyal digital. Pada tahap ini, data mentah dari sensor disaring dan disusun ulang agar kompatibel dengan sistem komunikasi yang digunakan oleh perusahaan dan SPARING.

Selanjutnya, data digital dikirim ke server IoT perusahaan, yang berfungsi sebagai pusat penyimpanan dan pengolahan informasi lingkungan. Server ini juga menyediakan *dashboard* interaktif yang memungkinkan pengguna memantau kondisi air limbah secara langsung, melakukan analisis tren, serta menghasilkan laporan otomatis. Proses pengolahan di server IoT memastikan bahwa data yang dikirimkan ke pemerintah telah melalui tahap validasi dan verifikasi internal, sehingga hasil pemantauan memiliki tingkat keandalan yang tinggi.

Tahapan akhir dalam arsitektur sistem adalah penggunaan antarmuka berbasis JSON yang menghubungkan server perusahaan dengan server SPARING KLHK. Melalui format ini, data hasil pemantauan dikirim secara otomatis dan terstandar, sehingga memudahkan integrasi antar sistem dan mempercepat proses pelaporan. Antarmuka JSON juga mendukung interoperabilitas, artinya sistem IoT yang dikembangkan oleh perusahaan dapat berkomunikasi langsung dengan sistem pemerintah tanpa perlu penyesuaian format data tambahan.

Struktur arsitektur yang terintegrasi ini memperkuat efisiensi dalam pemantauan kualitas air limbah dan menjamin kepatuhan terhadap regulasi nasional yang mewajibkan pelaporan lingkungan secara daring dan real-time. Selain itu, implementasi arsitektur ini juga menjadi fondasi penting bagi pengembangan sistem pemantauan yang

lebih adaptif di masa depan. Dengan memanfaatkan teknologi seperti *cloud computing*, *machine learning*, dan *predictive analytics*, sistem ini berpotensi berkembang menuju bentuk pemantauan cerdas yang tidak hanya reaktif terhadap perubahan lingkungan, tetapi juga mampu melakukan prediksi dini terhadap potensi pencemaran.

Secara keseluruhan, arsitektur IoT di sektor pertambangan tidak hanya berfungsi sebagai alat pelaporan, tetapi juga sebagai sistem pengelolaan lingkungan yang proaktif dan berkelanjutan. Melalui integrasi antarlapisan dan otomatisasi proses pelaporan, sistem ini mendukung terwujudnya praktik pertambangan yang lebih transparan, efisien, dan sesuai dengan prinsip *Good Mining Practice* yang dicanangkan oleh pemerintah Indonesia.

Table VI; Arsitektur Sistem IoT di Tambang

Komponen Sistem	Fungsi Utama	Dampak / Efektivitas
Sensor Lingkungan	Mengukur parameter kualitas air limbah (pH, COD, TSS, ketinggian air) secara kontinu	Menjamin akurasi data dan pemantauan real-time
Data Logger	Mengonversi sinyal analog menjadi digital, menyaring dan menyusun ulang data sensor	Memastikan kompatibilitas data untuk komunikasi dan integrasi sistem
Server IoT Perusahaan	Penyimpanan, pengolahan, validasi, dan verifikasi data; menyediakan dashboard interaktif	Memungkinkan analisis tren, laporan otomatis, dan keandalan data tinggi
Antarmuka JSON	Menghubungkan perusahaan dengan server SPARING KLHK secara otomatis dan terstandar	Mempercepat proses pelaporan, mendukung interoperabilitas, dan kepatuhan regulatif
Integrasi Sistem	Lapisan-lapisan terhubung untuk pengiriman data real-time dan validasi internal	Efisiensi pemantauan meningkat, mendukung pengembangan pemantauan cerdas di masa depan

Sumber: Diadaptasi dari Impron & Sutriani (2022); Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK No. 93 Tahun 2018 dan No. 80 Tahun 2019); literatur terkait IoT-Enabled Smart Mining [5], [8], [18], [22].

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis implementasi sistem IoT-SPARING di lingkungan pertambangan [4], [10], [11], [13], [15], [18], [20], [22], [23], dapat disimpulkan bahwa

integrasi teknologi ini berperan penting dalam peningkatan efektivitas pengawasan kualitas air limbah.

Penerapan sistem berbasis IoT terbukti memperkuat transparansi, efisiensi, dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan. Sebagai dasar pelaksanaan, sistem SPARING mengacu pada ketentuan berikut :

1. PermenLHK No. 93 Tahun 2018 [2],
2. PermenLHK No. 80 Tahun 2019 [3], dan
3. PermenLHK No. 5 Tahun 2021 [1].

Implementasi Internet of Things (IoT) dalam SPARING memastikan pemantauan air limbah dilakukan secara otomatis dan real-time, mendukung penerapan Good Mining Practice serta prinsip environmental sustainability di industri pertambangan.

Sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT yang terintegrasi dengan SPARING terbukti efektif untuk :

1. Meningkatkan akurasi data pemantauan air limbah,
2. Memberikan peringatan dini terhadap potensi pelanggaran, dan
3. Memastikan pelaporan data sesuai dengan regulasi pemerintah.

Sistem ini memperkuat penerapan prinsip transparansi dan keberlanjutan di perusahaan tambang. Arah pengembangan ke depan meliputi:

1. Penguatan Infrastruktur Pendukung, seperti Water Treatment Plant (WTP), laboratorium lingkungan, dan jaringan komunikasi yang stabil untuk memastikan konektivitas data SPARING.
2. Integrasi Ekosistem IoT Lingkungan, dengan menggabungkan pemantauan air, udara, dan energi menjadi satu sistem lingkungan digital terpadu.
3. Pengembangan Analitik Prediktif, dengan menambahkan fitur predictive analytics untuk mendeteksi anomali dan potensi pelanggaran lebih awal [13], [20].

Dengan strategi ini, SPARING tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan wajib, tetapi juga menjadi bagian dari inovasi menuju sistem pertambangan yang berkelanjutan dan cerdas.

REFERENCES

- [1] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, PermenLHK No. 5 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Air Limbah., Jakarta, 2021.
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, PermenLHK No. 93 Tahun 2018 tentang SPARING., Jakarta, 2018.

-
- [3] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, PermenLHK No. 80 Tahun 2019 tentang Perubahan atas PermenLHK No. 93 Tahun 2018., Jakarta, 2019.
 - [4] A. Impron and L. Sutriani, "IoT-Enabled Smart Mining: Pengelolaan Air Limbah di Industri Batubara," *INNOVATIVE: Journal of Social Science Research*, vol. 5, no. 1, pp. 1962–1978, 2024.
 - [5] M. Alzahrani, R. Rahman, and L. Ahmed, "Internet of Things (IoT)-Based Wastewater Management in Smart Cities," *Electronics*, vol. 12, no. 12, p. 2590, 2023.
 - [6] M. S. Forhad, K. S. Begum, and A. Rahman, "IoT-Based Real-Time Water Quality Monitoring System," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, 2024.
 - [7] D. Telaga, "Framework of Low-Cost IoT System to Monitor Coal Mining Wastewater Quality," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2217, 2020.
 - [8] L. Vargas and R. Mendoza, "Systematic Review on the Integration of IoT in Sustainable Water Management in Mining," *Revista Invecom*, vol. 10, no. 2, 2025.
 - [9] N. Patel and M. Roy, "Application of IoT and Sensor Technologies in Environmental Monitoring," *Environmental Research and Engineering*, vol. 7, 2025.
 - [10] W. H. Sugiharto, H. Susanto, and A. B. Prasetyo, "Real-Time Water Quality Assessment via IoT: Monitoring pH, TDS, Temperature, and Turbidity," *Ingenierie des Systemes d'Information*, vol. 28, no. 4, pp. 823–831, 2023.
 - [11] R. P. Shete et al., "IoT-enabled effective real-time water quality monitoring for aquafarming environments," *Sensors*, 2024. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11387385/>
 - [12] N. Chavhan et al., "APAH: An autonomous IoT driven real-time monitoring system to tackle industrial wastewater pollution," *Science of the Total Environment*, 2025.
 - [13] X. Wang, Y. Li, and Z. Chen, "Prediction of mine water quality by the Seq2Seq model with attention mechanism," *Procedia Computer Science*, 2024.
 - [14] S. A. Irawati, "Internet Of Things (IoT) In Water Quality Monitoring Systems," *Eduvest*, vol. 1, no. 8, 2021.
 - [15] R. Choudhary et al., "Predicting water quality index using stacked ensemble modeling integrated with SHAP," *Scientific Reports*, 2025.
 - [16] A. I. A. Alzahrani, "Internet of Things (IoT)-Based Wastewater Management in Smart Cities," *Electronics*, 2023.
 - [17] Y. Liu, "IoT-enabled smart mining: leveraging real-time data analytics and information systems for sustainable mineral processing," *Lex Localis*, 2024.
 - [18] T. Zvarivadza, "On the impact of Industrial Internet of Things (IIoT)," *International Journal of Industrial Applications*, vol. 12, no. 2, 2024.
 - [19] S. R. Rakotoarisoa, "AI-Driven Waste Management Solutions in the Mining Industry," *ISC-BEAM Conference Proceedings*, 2024.
 - [20] N. A. Sofiah, "Predictive Analytics for Water Safety: Data Mining and Supervised Learning in Potability Classification," *International Journal of Computer Science*, 2024.
 - [21] M. Priyadarsini et al., "AI-driven IoT and gamification for smart water management," *Energy Policy*, 2025.
 - [22] M. Flores-Iwasaki, "IoT Sensors for Water Quality Monitoring: A Review," *Sensors*, 2025.
 - [23] A. Muhaimin, "Design and Build an IoT-Based Wastewater Monitoring System at Cirebon Port Hospital," *Devotion Journal*, 2025.