



INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research

Volume 5 Nomor 1 Tahun 2024 Page 1962-1978

E-ISSN 2807-4238 and P-ISSN 2807-4246

Website: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>

IoT-Enabled Smart Mining: Pengelolaan Air Limbah di Industri Batubara

Ali Impron^{1✉}, Linda Sutriani²

Prodi Informatika, Universitas Muhammadiyah Sampit

Email: ali.impron@gmail.com^{1✉}

Abstrak

Menjaga kualitas air limbah dalam industri pertambangan batu bara sangat penting untuk mematuhi peraturan lingkungan. Salah satu parameter kunci adalah tingkat keasaman (pH), yang harus dipertahankan dalam rentang 6-9. Saat ini, proses pemantauan dilakukan secara manual dengan menggunakan kertas lakmus dan perbandingan visual untuk memperkirakan nilai pH. Penyesuaian pH dilakukan dengan menaburkan kapur secara manual hingga mencapai rentang yang diinginkan. Penelitian ini mengusulkan solusi otomatisasi dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mengoptimalkan proses pemantauan dan pengendalian. Dengan mengintegrasikan sensor pH ke dalam sistem air dan menggunakan kontrol relay berbasis IoT untuk penyebaran kapur, sistem ini memungkinkan pemantauan pH secara real-time serta penyebaran kapur secara otomatis. Sistem yang diusulkan bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam proses pengolahan air limbah, sejalan dengan upaya digitalisasi dan standar Industri 4.0.

Kata Kunci: *IoT, pH, Air, Tambang, Arduino*

Abstract

Ensuring wastewater quality in coal mining operations is crucial to comply with environmental regulations. One of the key parameters is the pH level, which must be maintained within the range of 6-9. Currently, the monitoring process is manual, involving the use of litmus paper and visual comparison to estimate the pH level. The adjustment of pH is achieved by manually adding limestone until the desired range is met. This research proposes an automated solution leveraging Internet of Things (IoT) technology to streamline both monitoring and control processes. By integrating pH sensors into the water system and employing IoT-enabled relay controls for limestone dispensing, the system enables real-time pH monitoring and automatic limestone release. The proposed system aims to improve the efficiency and accuracy of wastewater treatment processes, aligning with the digitalization efforts and Industry 4.0 standards.

Keywords: *IoT, pH, Water, Mining, Arduino*

PENDAHULUAN

Aktivitas pertambangan batubara terbuka memberikan kontribusi besar terhadap perekonomian, namun juga menjadi sumber tantangan lingkungan, khususnya dalam manajemen air limbah. Salah satu masalah penting dalam operasi tambang batubara adalah air asam tambang, yang terbentuk melalui oksidasi mineral sulfida seperti pirit (FeS_2). Proses oksidasi ini menghasilkan limbah cair dengan keasaman tinggi yang dapat mencemari lingkungan perairan di sekitarnya, merusak ekosistem lokal, dan menimbulkan risiko kesehatan bagi masyarakat sekitar. Di Indonesia, regulasi ketat diberlakukan untuk mengendalikan kualitas air limbah, seperti yang tercantum dalam Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011, yang mengharuskan nilai pH air limbah berada dalam rentang 6-9 untuk memastikan keamanan lingkungan [1] [2].

Proses pemantauan pH air limbah di lapangan umumnya masih dilakukan secara manual. Metode konvensional ini melibatkan penggunaan kertas lakmus atau perangkat uji pH sederhana, yang seringkali tidak efisien dan memerlukan waktu lama. Pengukuran manual tidak hanya memerlukan sumber daya manusia secara berkelanjutan, tetapi juga tidak mampu menangkap perubahan kualitas air secara *real-time*, sehingga mengurangi kecepatan respon terhadap perubahan drastis dalam kualitas air limbah. Situasi ini meningkatkan risiko ketidakpatuhan terhadap standar lingkungan dan mengakibatkan pemborosan sumber daya dalam proses pengendalian kualitas air.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan pH berbasis IoT di industri tambang batubara yang tidak hanya mampu memantau kualitas air secara real-time tetapi juga mengotomatisasi proses penanganan ketika parameter melebihi ambang batas yang ditetapkan. Sistem yang diusulkan mengintegrasikan sensor pH dengan modul relay otomatis untuk menambahkan kapur sesuai kebutuhan, sehingga sistem dapat mengatur tingkat keasaman air secara efisien. Dengan adanya fitur ini, sistem diharapkan tidak hanya memenuhi standar lingkungan yang berlaku tetapi juga mengurangi kebutuhan intervensi manual yang rentan terhadap kesalahan.

Kontribusi dari penelitian ini adalah penyediaan solusi berbasis IoT untuk tantangan besar dalam pengelolaan air limbah di industri pertambangan, dengan efisiensi yang ditingkatkan dan pemantauan yang lebih akurat. Sistem ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi penerapan IoT dalam menjaga kepatuhan lingkungan dan mendukung pencapaian standar Industri 4.0 di sektor pertambangan.

TINJAUAN PUSTAKA

Penerapan Internet of Things (IoT) untuk pemantauan kualitas air secara real-time menjadi semakin penting dalam upaya mendukung keberlanjutan lingkungan dan kepatuhan terhadap regulasi. Banyak studi menunjukkan bahwa pemanfaatan IoT dalam pemantauan kualitas air dapat memberikan solusi yang lebih efisien dan terstruktur dalam pengendalian parameter kualitas air, seperti pH, suhu, kekeruhan, dan oksigen terlarut, yang kritis untuk menjaga keseimbangan ekosistem perairan. Berikut ini adalah ulasan penelitian yang relevan dan kontribusi yang dihasilkan dari masing-masing studi terkait penerapan IoT dalam pemantauan kualitas air.

Studi oleh Daigavane dan Gaikwad (2020) merancang sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT yang memanfaatkan sensor untuk mengukur parameter suhu, kekeruhan, dan pH air. Data ini diproses melalui model ATMEGA 328 yang terhubung dengan jaringan Wi-Fi, memungkinkan pemantauan kualitas air secara real-time. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi IoT dalam meningkatkan efisiensi pemantauan kualitas air untuk mendeteksi polusi lebih dini, sehingga bisa diterapkan dalam industri atau sektor yang memerlukan monitoring air secara intensif [3].

Bhatt dan Jignesh (2016) mengembangkan sistem IoT untuk pemantauan polusi air, dengan mengumpulkan data dari sensor pH, suhu, dan saturasi oksigen pada air. Data yang dikumpulkan kemudian ditransmisikan menggunakan Raspberry Pi dan Zigbee sebagai jaringan interkoneksi. Sistem ini mampu melakukan pemantauan kualitas air secara real-time dan memberikan kontribusi yang signifikan dalam memantau berbagai parameter polusi lingkungan, termasuk pemantauan jarak jauh yang menjadi kunci bagi pengendalian kualitas air pada lokasi yang sulit dijangkau [4].

Marathe et al. (2021) menerapkan sistem IoT untuk mendeteksi kebocoran air sebagai solusi pada pengelolaan sumber daya air di kota pintar (smart city). Sistem ini menggunakan NodeMCU yang terhubung dengan platform Thingspeak untuk memonitor kebocoran air di saluran pipa kota. Hasil penelitian ini memperlihatkan efektivitas IoT dalam deteksi dini kebocoran, mengurangi potensi pemborosan air, dan memberikan peringatan otomatis kepada pengelola. Inovasi ini mendukung efisiensi pengelolaan air perkotaan di daerah yang padat penduduk [5].

Dalam konteks konservasi air, Nadipalli et al. (2021) mengembangkan sistem smart meter berbasis IoT yang memungkinkan pemantauan konsumsi air secara real-time. Sistem ini menggunakan ESP8266 yang terhubung ke server berbasis cloud, dengan data yang ditampilkan melalui platform seperti Thingier.io. Dengan menggunakan teknologi IoT, sistem ini memberikan kontribusi nyata dalam pengelolaan konsumsi air rumah tangga maupun

industri, terutama dalam menjaga keberlanjutan sumber daya air di tengah ancaman krisis air global [6].

Penelitian oleh Ajith Jerom et al. (2020) meneliti integrasi IoT dengan teknologi cloud untuk pemantauan kualitas air berbasis platform penyimpanan data yang mendukung pemrosesan dan analisis real-time. Sistem ini dirancang menggunakan NodeMCU ESP8266 dan memanfaatkan cloud untuk penyimpanan data kualitas air yang diukur, memungkinkan akses dan pemantauan kualitas air secara fleksibel. Kontribusi penelitian ini adalah pada optimalisasi pemantauan kualitas air untuk berbagai keperluan industri, termasuk pemantauan air untuk sektor-sektor yang rentan terhadap perubahan kualitas air [7].

Pada tahun yang sama, penelitian oleh [8] berjudul "Sensor Based Waste Water Monitoring for Agriculture Using IoT" menyelidiki dampak pestisida dan faktor pencemar lainnya pada sistem pertanian yang mengakibatkan degradasi kualitas air di sektor agrikultur. Penelitian ini mengumpulkan data utama seperti pH, kekeruhan, suhu, dan total dissolved solids (TDS) air untuk memantau kondisi kualitas air dalam waduk pertanian. Sistem yang dikembangkan mampu memberikan peringatan real-time secara langsung di lokasi serta mengirimkan notifikasi kepada pihak berwenang terkait. Metode yang digunakan melibatkan pengukuran kualitas air menggunakan sensor, pemberian peringatan langsung kepada pemangku kepentingan, dan penyimpanan data dalam cloud untuk analisis lebih lanjut. Implementasi sistem ini menggunakan Arduino ESP8266 yang dilengkapi dengan modul GSM dan display untuk mendukung pengumpulan dan transmisi data.

Penelitian lain [9] berjudul "IoT based Water Quality Monitoring System and Evaluation" menyoroti masalah kualitas air pada kolam renang, khususnya terkait dengan tingginya tingkat pH yang berpotensi menimbulkan iritasi pada mata dan kulit pengguna. Studi ini mengumpulkan data pH dan suhu air, dengan metode pengukuran yang dilakukan melalui sensor yang terhubung dengan IoT untuk pengumpulan data secara otomatis. Sistem ini mengirimkan peringatan via aplikasi Telegram jika nilai yang terukur melampaui ambang batas yang ditentukan dan menampilkan data melalui dashboard di Ubidots. Kontribusi utama penelitian ini adalah pada kemampuan sistem untuk memantau kualitas air secara efektif serta memberikan peringatan dini kepada pengguna.

Selanjutnya, penelitian [10] yang berjudul "Integrated Water Monitoring and Control System" mengeksplorasi tantangan dalam pemantauan dan pengukuran kualitas air dalam tangki yang selama ini masih dilakukan secara manual. Ketidapraktisan ini menambah beban kerja pada pihak penyedia layanan air untuk memastikan kualitas dan ketersediaan air tetap optimal. Penelitian ini menggunakan metode untuk menghitung volume air di dalam tangki, mengidentifikasi tangki yang masih tersedia, dan mengotomatiskan kontrol

buka-tutup katup untuk aliran masuk air. Data yang dikumpulkan meliputi kelembaban, aliran air, level air, serta kualitas air. Kontribusi dari penelitian ini berupa sistem terintegrasi untuk monitoring dan kontrol penyimpanan air yang lebih efisien, yang diterapkan melalui Total Water Monitoring System.

Memon et al. (2020) meneliti pemantauan kualitas air minum di Pakistan yang berfokus pada parameter pH, suhu, dan kekeruhan. Dengan menggunakan sensor turbidity, pH, dan suhu yang terhubung ke platform ThingSpeak melalui WeMos D1, sistem ini berhasil menciptakan pemantauan kualitas air yang efisien dan terjangkau untuk aplikasi skala rumah tangga maupun industri. Hasil penelitian ini berkontribusi pada peningkatan kualitas air dan efisiensi biaya pemantauan kualitas air, serta dapat diterapkan di berbagai sektor [11].

Ranjan et al. (2020) mengembangkan sistem IoT untuk pemanenan air hujan berdasarkan kualitas air yang terdeteksi. Sistem ini mengukur kualitas pH air hujan, menentukan tempat penyimpanan yang optimal, dan memproses data menggunakan ESP8266. Teknologi ini penting di tengah kebutuhan akan solusi pemanenan air hujan yang berkualitas tinggi dalam menghadapi perubahan iklim global. Sistem ini menawarkan solusi yang berkelanjutan dengan menggunakan teknologi IoT untuk menyimpan air dalam kualitas yang sesuai untuk keperluan pertanian dan konsumsi [12].

Di tahun yang sama, [13] melaksanakan penelitian berjudul "IoT and Cloud Computing based Smart Water Metering System," yang dilatarbelakangi oleh kurangnya perencanaan pemerintah, meningkatnya privatisasi, serta limbah dari sektor industri dan rumah tangga yang memperburuk krisis air di India. Penelitian ini menghasilkan Smart Water Meter yang dikembangkan menggunakan NodeMCU dan didukung oleh teknologi machine learning untuk mencegah kebocoran air. Sistem ini memanfaatkan data dari sensor konsumsi air dan menerapkan machine learning untuk mengklasifikasikan pola aliran air, yang memungkinkan deteksi dini terhadap kemungkinan kebocoran. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah peningkatan efisiensi manajemen air melalui analisis konsumsi air secara real-time.

Sementara itu, di Irak, [14] dalam penelitian berjudul "Drinking Water Monitoring in Mosul City Using IoT" menyoroti tantangan pencemaran air pada waduk di Kota Mosul yang selama ini dipantau secara manual. Studi ini mengumpulkan data meliputi pH, konduktivitas listrik (EC), total dissolved solids (TDS), suhu, dan kekeruhan untuk menganalisis kualitas air. Metode yang diterapkan melibatkan pengukuran otomatis menggunakan sensor yang terhubung ke platform Thingspeak, kemudian hasil analisis ditampilkan melalui perangkat PC atau smartphone. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pengembangan alat pemantauan air dengan biaya rendah yang secara otomatis mengunggah dan menghitung data kualitas air.

Penelitian lainnya [15] berjudul “Smart Water Management in Agricultural Land Using IoT” berfokus pada tantangan irigasi di lahan pertanian yang terdampak oleh perubahan iklim yang tidak menentu. Penelitian ini memanfaatkan data suhu, kelembaban, dan pH air untuk mengevaluasi kondisi lingkungan dan menentukan waktu irigasi yang optimal. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan manajemen air dengan pendekatan daur ulang air, yang secara efektif dapat mengurangi dampak kekeringan di sektor pertanian.

Billah et al. (2019) mengembangkan aplikasi IoT yang fokus pada pemantauan kualitas air di peternakan, di mana pencemaran air limbah dapat berdampak pada kesehatan hewan dan lingkungan sekitar. Dengan menggunakan perangkat IoT seperti CC3200, sistem ini mampu mengurangi intervensi manusia dalam pemantauan kualitas air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini sangat efektif dalam meningkatkan kontrol kualitas air, khususnya di sektor peternakan [16].

Di Indonesia, Budiarti et al. (2019) mengembangkan sistem IoT yang unik dengan menggabungkan sensor aktif dan data pasif untuk memantau kualitas air dalam lingkungan pertanian. Data dikumpulkan melalui sensor-sensor yang diintegrasikan dengan platform Raspberry Pi, sementara data tambahan diambil dari scraping web untuk menyediakan informasi lingkungan yang lebih komprehensif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi data aktif dan pasif memungkinkan efisiensi lebih tinggi dan merupakan solusi hemat biaya untuk pengelolaan kualitas air di lingkungan pertanian, yang sangat bergantung pada air dalam proses produksinya [17].

LANDASAN TEORI

Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan salah satu inovasi teknologi yang mendukung komunikasi antarmuka perangkat dengan memanfaatkan jaringan internet untuk berbagi data dan informasi [18]. IoT berfungsi sebagai penghubung antara perangkat fisik dan sistem digital melalui platform data terintegrasi, yang memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara real-time. Konsep IoT mendorong otomatisasi dan optimasi di berbagai sektor, seperti pertanian, kesehatan, transportasi, dan industri, yang semuanya memanfaatkan kemampuan IoT untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi intervensi manusia dalam proses pemantauan dan kontrol. Adapun beberapa komponen dasar IoT yang menunjang kinerja IoT adalah sebagai berikut:

Radio Frequency Identification (RFID)

RFID memungkinkan identifikasi dan pengumpulan data secara otomatis menggunakan gelombang radio. Sistem RFID terdiri dari dua komponen utama yaitu tag dan reader, di mana tag menyimpan data tertentu dan reader bertugas membacanya. Teknologi ini unggul dalam identifikasi produk dalam industri logistik dan ritel karena mampu menyimpan lebih banyak informasi dibandingkan barcode konvensional, menjadikannya alat yang efektif untuk pelacakan inventaris, kontrol aset, dan logistik rantai pasokan.

Jaringan Sensor Nirkabel (WSN)

WSN adalah kumpulan sensor yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi perubahan lingkungan atau fisik, seperti suhu, kelembapan, tekanan, dan lokasi. Dengan menggunakan WSN, sistem IoT dapat memantau lingkungan secara efisien, memproses data dari berbagai titik, dan mengirimkan informasi penting untuk tindakan lebih lanjut. Dalam IoT, WSN digunakan untuk pelacakan objek, pemantauan kondisi lingkungan, serta sebagai sarana komunikasi antar-sensor yang memperkaya data IoT.

Middleware

Middleware adalah lapisan perangkat lunak yang menghubungkan berbagai aplikasi dan perangkat IoT dalam satu jaringan. Middleware ini menyederhanakan interaksi antar-perangkat melalui integrasi yang efisien, memungkinkan perangkat IoT untuk berkomunikasi tanpa hambatan teknis yang kompleks. Teknologi ini memungkinkan pengembang untuk fokus pada fungsionalitas aplikasi IoT tanpa perlu khawatir mengenai detail integrasi perangkat, sehingga mempercepat proses pengembangan aplikasi IoT.

Cloud Computing

Cloud computing dalam konteks IoT berfungsi sebagai infrastruktur utama untuk penyimpanan, pengolahan, dan analisis data dalam skala besar. Dengan adanya cloud computing, data dari perangkat IoT dapat diakses secara on-demand melalui layanan berbasis cloud seperti IaaS (Infrastructure as a Service) atau SaaS (Software as a Service). Hal ini memungkinkan perangkat IoT untuk menyimpan data secara efisien dan memberikan akses cepat ke data yang diperlukan untuk pengambilan keputusan yang lebih tepat waktu.

Perangkat Lunak Aplikasi IoT

Aplikasi IoT adalah perangkat lunak yang mengendalikan interaksi antara perangkat IoT dan pengguna. Perangkat lunak ini memungkinkan perangkat untuk berkomunikasi satu sama lain dan dengan manusia, serta mampu merespon lingkungan sekitar. Perangkat lunak ini dibangun untuk menyediakan kecerdasan buatan yang dapat mengenali kondisi

lingkungan, mengidentifikasi masalah, dan memberikan solusi tanpa perlu campur tangan manusia.

Masalah Air Asam Tambang

Air asam tambang merupakan limbah yang sering dihasilkan oleh proses pertambangan, khususnya tambang terbuka, sebagai akibat dari reaksi kimia antara mineral sulfida seperti pirit (FeS_2) dengan oksigen dan air. Reaksi ini menghasilkan asam sulfat yang meningkatkan keasaman lingkungan sekitar. Limbah ini merupakan tantangan bagi perusahaan tambang karena pH yang rendah dapat menyebabkan kerusakan lingkungan dan membahayakan kesehatan ekosistem sekitar tambang. Selain itu, tingkat keasaman yang tinggi berpotensi merusak saluran air yang mengarah ke area pemukiman dan pertanian, sehingga penting untuk dilakukan pemantauan dan pengelolaan yang konsisten agar limbah ini tidak mencemari sumber air yang lebih luas[1].

Power of Hydrogen (pH)

pH adalah ukuran yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan suatu larutan[19]. Skala pH berkisar dari 0 hingga 14, di mana nilai di bawah 7 menunjukkan kondisi asam, nilai 7 netral, dan nilai di atas 7 bersifat basa. Dalam dunia pertambangan, pH menjadi parameter penting yang harus dikendalikan untuk memastikan bahwa limbah cair yang dibuang tidak merusak lingkungan. Teknologi IoT memungkinkan pengukuran pH secara real-time, sehingga perubahan tingkat keasaman air dapat langsung terdeteksi dan diambil tindakan penanganan, seperti penambahan bahan penetral seperti kapur untuk mencapai pH yang sesuai dengan regulasi.

Arduino

Arduino adalah perangkat mikrokontroler yang dirancang untuk memudahkan pengembangan prototipe elektronik interaktif. Platform Arduino terdiri dari perangkat keras (hardware) yang berbasis pada mikrokontroler AVR dari Atmel dan perangkat lunak (software) dalam bentuk IDE (Integrated Development Environment)[20]. Arduino menyediakan ekosistem yang dapat diakses oleh pengembang untuk memprogram mikrokontroler menggunakan bahasa pemrograman C atau C++, serta pustaka yang mendukung interaksi dengan sensor dan perangkat eksternal[21]. Arduino banyak digunakan dalam proyek IoT karena kemudahannya dalam pengembangan dan ketersediaan komunitas yang luas yang mendukung pertumbuhan inovasi berbasis IoT.

Sensor

Sensor adalah perangkat yang mendeteksi perubahan lingkungan sekitar dan mengirimkan data ke sistem untuk dianalisis lebih lanjut. Sensor memainkan peran penting dalam IoT karena menyediakan data mentah yang dibutuhkan untuk pengambilan

keputusan dalam sistem otomatis. Misalnya, dalam sistem pemantauan kualitas air tambang, sensor pH mengukur tingkat keasaman air secara kontinu, sehingga sistem dapat menyesuaikan pengolahan air dengan tepat berdasarkan nilai pH yang terdeteksi. Sensor memberikan fleksibilitas dalam berbagai kondisi operasional dan meningkatkan akurasi pemantauan kondisi lingkungan[8].

ESP8266

ESP8266 adalah modul Wi-Fi berbiaya rendah yang terintegrasi dengan mikrokontroler, dikembangkan oleh Espressif Systems[22]. Modul ini memungkinkan perangkat IoT untuk terhubung ke jaringan Wi-Fi dan berkomunikasi melalui protokol TCP/IP, sehingga data dapat dikirim dan diterima secara langsung dari cloud. ESP8266 dikenal karena kemampuannya untuk menjalankan berbagai aplikasi IoT dengan biaya yang lebih rendah, menjadikannya populer untuk implementasi di berbagai proyek, seperti pemantauan air, pengelolaan energi, dan kontrol jarak jauh pada perangkat IoT[23].

ThingSpeak

ThingSpeak adalah platform analitik IoT[14] berbasis cloud yang mendukung integrasi dengan MATLAB untuk pemrosesan dan visualisasi data real-time dari perangkat IoT[24]. Dengan ThingSpeak, data dari sensor yang terhubung ke mikrokontroler seperti Arduino atau ESP8266 dapat dikumpulkan, diproses, dan divisualisasikan secara langsung di dashboard. ThingSpeak juga memungkinkan pengguna untuk menganalisis data secara instan dan menyediakan peringatan yang dikirimkan langsung ke aplikasi atau perangkat, yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi pemantauan lingkungan dan pengelolaan kualitas air.

Notifikasi melalui Telegram

Telegram adalah aplikasi perpesanan instan berbasis cloud yang memungkinkan pengguna untuk mengirim pesan, foto, video, dan data lainnya[25]. Dalam implementasi IoT, Telegram sering digunakan untuk notifikasi real-time dari perangkat IoT ke pengguna terkait. Fitur enkripsi dan multiplatform dari Telegram menjadikannya pilihan yang ideal untuk komunikasi antara sistem IoT dan penggunanya. Dalam sistem pemantauan kualitas air, Telegram dapat digunakan untuk mengirim peringatan langsung kepada petugas saat pH air melebihi ambang batas yang telah ditentukan, memungkinkan respons cepat terhadap kondisi lingkungan yang berubah.

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang untuk mengembangkan sistem pemantauan otomatis terhadap pH air limbah di industri pertambangan batu bara menggunakan teknologi Internet of Things (IoT). Tahapan metodologi ini meliputi studi literatur, pemilihan alat dan bahan, pengumpulan data, serta analisis dan perancangan sistem. Berikut ini adalah penjelasan lengkap dari setiap tahapan yang dilakukan:

A. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk memahami konsep dan metode yang telah diterapkan dalam penelitian terdahulu terkait pemantauan kualitas air berbasis IoT. Sumber literatur mencakup penelitian yang menggunakan platform IoT seperti Arduino dan ESP8266 dalam sistem pemantauan kualitas air pada lingkungan tambang, pertanian, dan sektor lainnya. Beberapa penelitian mengimplementasikan IoT untuk mendeteksi parameter fisik dan kimiawi air seperti pH, suhu, dan kekeruhan secara real-time. Studi ini menjadi dasar dalam menentukan arsitektur sistem, pemilihan komponen, serta strategi pengiriman data dalam sistem pemantauan kualitas air

B. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat keras dan perangkat lunak yang berfungsi untuk pengumpulan dan analisis data. Rincian alat dan bahan yang digunakan adalah sebagai berikut:

Notebook – Spesifikasi yang digunakan meliputi prosesor Intel Core i7 dengan RAM 8 GB dan sistem operasi Windows 10 64-bit untuk pengembangan dan pengujian program.

Perangkat Keras IoT – Menggunakan Arduino Uno sebagai mikrokontroler utama dan ESP8266 sebagai modul Wi-Fi untuk konektivitas data. Komponen tambahan meliputi sensor pH untuk mendeteksi tingkat keasaman air limbah secara real-time.

Perangkat Lunak – IDE Arduino digunakan untuk pemrograman Arduino Uno dan ESP8266. Data yang diperoleh dianalisis dengan menggunakan Microsoft Excel untuk membantu visualisasi hasil penelitian

C. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan sensor pH yang terhubung pada Arduino Uno untuk mengukur tingkat keasaman air limbah secara otomatis. Data diambil dari air limbah yang dihasilkan oleh PT. XYZ dalam periode penelitian tertentu. Untuk memastikan akurasi, pengukuran dilakukan di dua lokasi berbeda yaitu pada inlet pond dan outlet pond tempat pengolahan limbah. Hasil pengukuran dikirimkan melalui

ESP8266 ke platform cloud ThingSpeak, yang berfungsi sebagai repositori data untuk penyimpanan dan analisis lebih lanjut.

D. Analisis dan Perancangan Sistem

Bagian ini menjelaskan tahap perancangan sistem yang melibatkan komponen perangkat keras dan perangkat lunak untuk mendukung implementasi IoT dalam pengendalian kualitas air. Proses perancangan ini terdiri dari beberapa langkah:

Pengumpulan Data Sensor

Sensor pH yang dipasang pada inlet pond dan outlet pond bertugas mendeteksi tingkat keasaman air. Arduino Uno berperan sebagai pusat kontrol yang mengumpulkan data dari sensor secara kontinu.

Pemrosesan Data dan Aktivasi Relay

Jika nilai pH yang terdeteksi berada di luar ambang batas yang ditentukan ($\text{pH} < 6$ atau $\text{pH} > 9$), Arduino mengaktifkan relay yang terhubung ke tempat penyimpanan kapur (lime hopper). Relay berfungsi untuk mengontrol proses penambahan kapur ke air limbah secara otomatis, sehingga pH air dapat dinetralisasi sesuai standar yang telah ditetapkan.

Pengiriman Data ke Cloud dengan ESP8266

Data yang diukur oleh sensor dikirim melalui ESP8266 ke ThingSpeak, platform IoT yang memungkinkan analisis data secara real-time. Platform ini juga menyediakan visualisasi data dalam bentuk grafik yang dapat diakses oleh pihak yang terkait dengan pengelolaan kualitas air

Notifikasi Real-Time melalui Telegram

Sistem juga diatur untuk mengirim notifikasi otomatis ke petugas menggunakan aplikasi Telegram jika nilai pH melebihi batas kritis. Fitur notifikasi ini dirancang agar petugas dapat segera mengambil tindakan darurat jika diperlukan, sekaligus mengurangi risiko pencemaran lingkungan akibat air limbah yang tidak sesuai standar

Analisis Data di Platform Cloud

Data yang tersimpan di ThingSpeak dianalisis untuk mengidentifikasi pola perubahan pH yang signifikan. Analisis ini memungkinkan prediksi kebutuhan kapur berdasarkan tren perubahan pH, sehingga penggunaan bahan dapat dioptimalkan dan biaya operasional dapat ditekan. Data yang diperoleh juga digunakan untuk mengkaji efektivitas sistem pemantauan berbasis IoT dalam memenuhi standar regulasi lingkungan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan prototipe dilakukan untuk membuktikan sistem dapat bekerja dengan baik. Sistem kontrol untuk mematikan dan menghidupkan arus ke saklar yang berfungsi untuk menyalakan dan mematikan alat pelarut kapur ke dalam air.

Software yang digunakan untuk melakukan penulisan kode dan compiling/upload adalah software arduino versi 1.8.16 yang mempunyai lisensi gratis.

Dalam penelitian IoT ini, terdapat 2 kode yaitu:

1. Kode yang ditulis dan diunggah ke Modul Arduino uno
2. Kode yang ditulis dan diunggah ke modul ESP8288

Setelah kode ditulis, dan akan dilakukan upload, terlebih dahulu dilakukan compiling untuk mengecek masing masing kode, apakah ada kesalahan.

Untuk melakukan compile dan upload, harus melakukan pemilihan board, karena 2 board yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan board yang berbeda.

Sebelum melakukan konektivitas ke jaringan, ESP8266 akan melakukan sambungan ke wifi dengan nama wifi dan password yang sudah di hardcode kedalam source code , dan setelah sistem berhasil melakukan koneksi ke jaringan, arduino akan melakukan inisiasi ke thingspeak , yaitu dengan mendefinisikan channel number dan apikey.

Selama kurun waktu terus menerus, data yang diperoleh oleh arduino, akan dikirimkan ke thingspeak, dengan urutan:

1. Melakukan koneksi ke wifi (termasuk jika tidak terhubung, akan berusaha melakukan hubungan kembali)
2. Melakukan pengiriman data

Proses yang dilakukan untuk mengirim data dari lokal ke thingspeak menggunakan kode berikut:

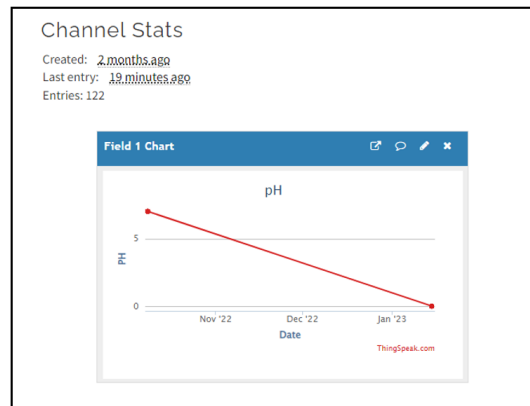
```
void sendData() {
  ThingSpeak.setField(1, pHValue);
  ThingSpeak.setField(2, tssValue);

  int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

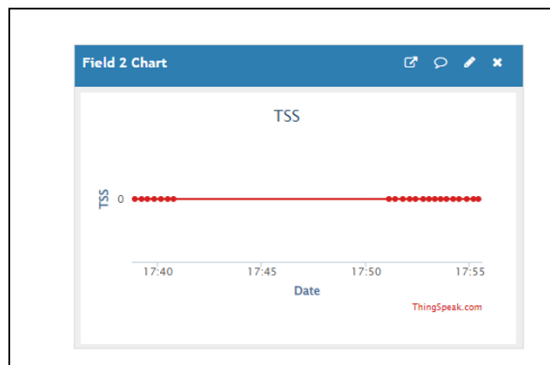
  if (x == 200) {
    thingspeakStatus = "Channel update successful.";
  } else {
    thingspeakStatus = "Problem updating channel. HTTP error code ";
  }
}
```

}

Jika data yang terukur oleh arduino berhasil dikirim ke data thingspeak, visualisasi akan terlihat sebagai berikut:



Begitu juga dengan data TSS yang berhasil dikirim oleh arduino ke dashboard, akan terlihat pada field2:



Sesuai dengan kondisi yang ditentukan sebelumnya, yaitu jika nilai pH yang di dapat pada saat pengukuran, melebihi dari ambang batas tertentu yaitu pH 9, maka relay yang digunakan sebagai simulasi limehoper, akan dinonaktifkan. Tetapi jika nilai pH yang di dapat kurang dari atau sama dengan pH 9, maka akan dilakukan pengaktifan relay, sehingga limehoper akan bekerja kembali.

```
void turnOnOff_R1() {  
  if (pHValue > ph_MaxVal) {  
    bR1_On = false;  
  } else if (pHValue <= ph_MinVal) {  
    bR1_On = true;  
  }  
}
```

Pengujian proses treatment ini dilakukan dengan data yang sama, dan hasil yang diperoleh sebagai berikut:

Tabel 1. Pengujian IoT dan Relay

Uji Ke-	Pengujian IoT	Relay
1	6,3	ON
2	8,9	ON
3	7,1	ON
4	5,3	ON
5	8,1	ON
6	9,5	OFF
7	5,5	ON
8	4,8	ON
9	9,9	OFF
10	4,2	ON

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pemantauan dan pengendalian kualitas air limbah tambang secara real-time dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT). Sistem ini mencakup pengintegrasian sensor pH, relay otomatis untuk penambahan kapur, serta penyimpanan data berbasis cloud melalui ThingSpeak. Dengan kemampuan untuk memantau pH air limbah dan mengirimkan peringatan langsung ke petugas melalui Telegram, sistem ini terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan akurasi pemantauan kualitas air pada industri pertambangan batu bara.

Penerapan teknologi IoT dalam sistem ini memberikan beberapa kontribusi penting, antara lain:

Efisiensi Operasional: Sistem mampu mengotomatisasi proses pemantauan dan pengaturan tingkat keasaman air limbah, mengurangi kebutuhan intervensi manual, dan memastikan bahwa pH air tetap berada dalam rentang yang sesuai dengan regulasi.

Peningkatan Respons Pengendalian: Dengan kemampuan untuk mengirimkan peringatan secara otomatis ketika nilai pH melebihi batas yang ditetapkan, sistem ini memungkinkan respons yang lebih cepat dari pihak terkait, sehingga membantu mencegah dampak lingkungan yang lebih besar akibat limbah asam.

Integrasi Data dan Analitik: Pemanfaatan ThingSpeak sebagai platform cloud memungkinkan penyimpanan dan analisis data secara berkelanjutan. Data historis yang dikumpulkan memberikan wawasan bagi manajemen perusahaan untuk melakukan evaluasi dan perbaikan sistem, serta mengoptimalkan penggunaan bahan kapur dalam pengolahan air limbah.

Potensi Pengembangan Lebih Lanjut: Penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi IoT memiliki potensi besar dalam meningkatkan pengelolaan limbah industri. Untuk penelitian lanjutan, direkomendasikan agar sistem ini diperluas dengan penambahan parameter lain, seperti kekeruhan dan suhu air, serta pengembangan antarmuka yang lebih fleksibel melalui aplikasi pesan instan lainnya, seperti WhatsApp, guna meningkatkan aksesibilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- I. Wahyudin, S. Widodo, and A. Nurwaskito, "Analisis Penanganan Air Asam Tambang Batubara," *J. Geomine*, vol. 6, no. 2, pp. 85–89, 2018, doi: 10.33536/jg.v6i2.214.
- (PEMDA KALTIM), "Peraturan Daerah Provinsi Kalimantan Timur Nomor 02 Tahun 2011 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air," vol. 64, pp. 10–14, 2011.
- V. V. Daigavane and D. M. . Gaikwad, "Water Quality Monitoring System Based on IoT," *ICDCS 2020 - 2020 5th Int. Conf. Devices, Circuits Syst.*, vol. 10, no. 5, pp. 279–282, 2017, doi: 10.1109/ICDCS48716.2020.243598.
- J. Bhatt and P. Jignesh, "IOT Based Water Quality Monitoring System," *SSRN Electron. J.*, no. 4, pp. 44–48, 2016, doi: 10.2139/ssrn.3645467.
- R. Marathe, M. Tapale, V. Jadhav, V. Hulbatte, and A. Pawar, "IoT based water leakage detection using smart objects for smart city," *Proc. 3rd Int. Conf. Intell. Commun. Technol. Virtual Mob. Networks, ICICV 2021*, no. Icicv, pp. 415–419, 2021, doi: 10.1109/ICICV50876.2021.9388562.
- L. S. P. Sairam Nadipalli, D. Sai Akhil, A. A. Kumar, and N. Ganesh, "Water Conservation Control by using IoT Smart Meter," *Proc. - 5th Int. Conf. Comput. Methodol. Commun. ICCMC 2021*, no. Iccmc, pp. 448–452, 2021, doi: 10.1109/ICCMC51019.2021.9418251.
- B. Ajith Jerom, R. Manimegalai, and R. Manimegalai, "An IoT Based Smart Water Quality Monitoring System using Cloud," *Int. Conf. Emerg. Trends Inf. Technol. Eng. ic-ETITE 2020*, 2020, doi: 10.1109/ic-ETITE47903.2020.450.
- R. P, S. K, S. S, S. A, T. G, and P. R, "Sensor Based Waste Water Monitoring for Agriculture Using IoT," *Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst.*, pp. 4–7, 2020.
- S. A. Hamid, A. M. A. Rahim, S. Y. Fadhlullah, S. Abdullah, Z. Muhammad, and N. A. M. Leh, "IoT based Water Quality Monitoring System and Evaluation," *Proc. - 10th IEEE Int. Conf. Control Syst. Comput. Eng. ICCSCE 2020*, no. August, pp. 102–106, 2020, doi: 10.1109/ICCSCE50387.2020.9204931.
- S. Hattaraki, A. Patil, and S. Kulkarni, "Integrated Water Monitoring and Control System-IWMCS," *Proc. B-HTC 2020 - 1st IEEE Bangalore Humanit. Technol. Conf.*, 2020, doi:

10.1109/B-HTC50970.2020.9297890.

- A. R. Memon, S. K. Memon, A. A. Memon, and T. D. Memon, "IoT Based Water Quality Monitoring System for Safe Drinking Water in Pakistan," *2020 3rd Int. Conf. Comput. Math. Eng. Technol. Idea to Innov. Build. Knowl. Econ. iCoMET 2020*, pp. 2–8, 2020.
- V. Ranjan, M. V. Reddy, M. Irshad, and N. Joshi, "The Internet of Things (IOT) Based Smart Rain Water Harvesting System," *2020 6th Int. Conf. Signal Process. Commun. ICSC 2020*, pp. 302–305, 2020, doi: 10.1109/ICSC48311.2020.9182767.
- A. Ray and S. Goswami, "IoT and Cloud Computing based Smart Water Metering System," *2020 Int. Conf. Power Electron. IoT Appl. Renew. Energy its Control. PARC 2020*, pp. 308–313, 2020, doi: 10.1109/PARC49193.2020.236616.
- Y. Al-Khashab, R. Daoud, M. Majeed, and M. Yassen, "Drinking water monitoring in mosul city using IoT," *ICCISTA 2019 - IEEE Int. Conf. Comput. Inf. Sci. Technol. their Appl. 2019*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/ICCISTA.2019.8830662.
- A. Arun, J. Abisha Sugirtharani, P. Jenifer Mercy Carolina, and C. Angel Teresa, "Smart Water Management in Agricultural Land Using IoT," *2019 5th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst. ICACCS 2019*, pp. 708–711, 2019, doi: 10.1109/ICACCS.2019.8728529.
- M. M. Billah, Z. M. Yusof, K. Kadir, A. M. M. Ali, and I. Ahmad, "Real-time Monitoring of Water Quality in Animal Farm: An IoT Application," *2019 IEEE 6th Int. Conf. Smart Instrumentation, Meas. Appl. ICSIMA 2019*, no. August, pp. 27–29, 2019, doi: 10.1109/ICSIMA47653.2019.9057320.
- R. P. N. Budiarti, A. Tjahjono, M. Hariadi, and M. H. Purnomo, "Development of IoT for Automated Water Quality Monitoring System," *Proc. - 2019 Int. Conf. Comput. Sci. Inf. Technol. Electr. Eng. ICOMITEE 2019*, vol. 1, pp. 211–216, 2019, doi: 10.1109/ICOMITEE.2019.8920900.
- I. Lee and K. Lee, "The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises," *Bus. Horiz.*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, 2015, doi: 10.1016/j.bushor.2015.03.008.
- C. Nugroho, "Pengaruh Mengkonsumsi Buah Nanas Terhadap pH Saliva Pada Santriwati Usia 12-16 Tahun Pesantren Perguruan Sukahideng Kabupaten Tasikmalaya," *J. ARSA*, vol. 11, no. 1, pp. 10–15, 2016.
- Y. A. Badamasi, "The working principle of an Arduino," *Proc. 11th Int. Conf. Electron. Comput. Comput. ICECCO 2014*, 2014, doi: 10.1109/ICECCO.2014.6997578.
- M. A. Montironi, B. Qian, and H. H. Cheng, "Development and application of the ChArduino toolkit for teaching how to program Arduino boards through the C/C++ interpreter Ch," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 25, no. 6, pp. 1053–1065, 2017, doi:

10.1002/cae.21854.

- G. Chursin and M. Semenov, "Using an ESP8266 Microcontroller to Develop a Learning Game," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1611, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1611/1/012059.
- S. Samanta, K. K. Khan, A. Bhattacharyya, S. Das, and A. Barman, "Home Automation Using Arduino and ESP8266," vol. m, no. 9, pp. 1446–1456, 2016.
- S. Pasha, "Thingspeak Based Sensing and Monitoring System for IoT with Matlab Analysis," *Int. J. New Technol. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 19–23, 2016.
- A. D. Nobari, N. Reshadatmand, and M. Neshati, "Analysis of telegram, an instant messaging service," *Int. Conf. Inf. Knowl. Manag. Proc.*, vol. Part F1318, pp. 2035–2038, 2017, doi: 10.1145/3132847.3133132.