

INTEGRASI SISTEM IOT BERBASIS MULTI-SENSOR UNTUK PEMANTAUAN REAL-TIME KUALITAS AIR LIMBAH LABORATORIUM TEKNIK

Alif Lombardoji Sidiq*¹, Kemala Dewi², Budiono Joko Nugroho³, Pipit Skriptianata Putra Pranida⁴

^{1,2,3,4} Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Semarang, Indonesia

e-mail*: aliflombardo@untagsmg.ac.id,

Diterima 24 Juli 2024

Dipublikasikan 5 Desember 2024

<https://doi.org/10.33369/jkf.7.3.106-113>

ABSTRAK

Pemantauan kualitas air limbah secara real-time merupakan langkah krusial dalam pengelolaan lingkungan, terutama dalam skala laboratorium yang menghasilkan limbah dengan karakteristik spesifik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas air berbasis Internet of Things (IoT), yang mampu mendeteksi parameter pH, suhu, kekeruhan, dan konduktivitas secara kontinu. Sistem ini menggunakan berbagai sensor terintegrasi dengan mikrokontroler Arduino, memungkinkan pengumpulan data yang akurat dan efisien. Data yang diperoleh dianalisis untuk menilai status air limbah berdasarkan parameter standar yang relevan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai parameter kualitas air bervariasi tergantung pada jenis aktivitas laboratorium. Nilai pH berkisar antara 6,8 hingga 8,6, suhu antara 25,9°C hingga 34°C, kekeruhan mencapai 72 NTU, dan konduktivitas hingga 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sistem pemantauan yang dirancang tidak hanya mampu mengidentifikasi air limbah yang tercemar, tetapi juga mengirimkan peringatan melalui jaringan GSM apabila parameter melebihi ambang batas. Temuan ini menunjukkan efektivitas sistem IoT dalam pemantauan kualitas air limbah, mengurangi ketergantungan pada metode konvensional yang memakan waktu dan sumber daya. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap upaya pengelolaan limbah laboratorium yang lebih berkelanjutan. Sistem yang dikembangkan dapat diadaptasi untuk berbagai kebutuhan pemantauan kualitas air, baik di laboratorium pendidikan maupun fasilitas skala kecil lainnya. Integrasi teknologi IoT ini diharapkan menjadi langkah maju dalam meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengelolaan limbah secara global.

Kata kunci — Internet of Things (IoT), Pemantauan Kualitas Air, Limbah Laboratorium, Sensor, Water Quality Index (WQI)

ABSTRACT

Real-time monitoring of wastewater quality is a crucial step in environmental management, especially on a laboratory scale that produces waste with specific characteristics. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based water quality monitoring system, which is able to continuously detect pH, temperature, turbidity, and conductivity parameters. This system uses various sensors integrated with an Arduino microcontroller, enabling accurate and efficient data collection. The data obtained are analyzed to assess the status of wastewater based on relevant standard parameters. The results show that the values of water quality parameters vary depending on the type of laboratory activity. The pH value ranges from 6.8 to 8.6, the temperature between 25.9°C to 34°C, the turbidity reaches 72 NTU, and the conductivity up to 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The designed monitoring system is not only able to identify polluted wastewater but also sends alerts via the GSM network if the parameters exceed the threshold. These findings demonstrate the effectiveness of the IoT system in monitoring wastewater quality, reducing dependence on conventional methods that are time-consuming and resource-consuming. This study makes a significant contribution to efforts to manage laboratory waste more sustainably. The developed system can be adapted for various water quality monitoring needs, both in educational laboratories and other small-scale facilities. The integration of IoT technology is expected to be a step forward in increasing the effectiveness and efficiency of waste management globally.

Keywords — Internet of Things (IoT), Water Quality Monitoring, Laboratory Wastewater, Sensor, Water Quality Index (WQI)

I. PENDAHULUAN

Air merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting bagi kehidupan di bumi, tetapi meningkatnya aktivitas manusia telah menyebabkan pencemaran air yang signifikan (1). Salah satu kontributor utama pencemaran ini adalah limbah cair, yang berasal dari berbagai sumber seperti aktivitas industri, domestik, dan laboratorium pendidikan (2,3). Limbah cair yang tidak diolah dengan benar dapat mengubah keseimbangan ekosistem air, menurunkan kualitas air tanah, dan memberikan dampak buruk pada kesehatan manusia (4). Oleh karena itu, kebutuhan akan pengelolaan limbah cair yang lebih efektif semakin mendesak, khususnya dengan metode yang mampu memberikan pemantauan secara real-time untuk mencegah terjadinya pencemaran lingkungan lebih lanjut (5).

Pemantauan kualitas air secara tradisional melibatkan pengambilan sampel manual yang kemudian dianalisis di laboratorium. Metode ini memiliki kelemahan mendasar, seperti kebutuhan waktu yang lama, ketidakmampuan untuk mendeteksi perubahan kualitas air secara langsung, dan biaya operasional yang tinggi (6). Dengan munculnya teknologi Internet of Things (IoT), tantangan ini dapat diatasi melalui sistem pemantauan otomatis yang mampu memberikan pengukuran parameter kualitas air secara *real-time* (6). Sistem berbasis IoT memungkinkan integrasi sensor dengan perangkat komputasi dan jaringan, sehingga menghasilkan data yang cepat, akurat, dan dapat diakses dari jarak jauh. Selain itu, pengiriman peringatan otomatis ketika parameter air melebihi ambang batas memberikan keuntungan tambahan dalam pengelolaan limbah cair.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi penerapan IoT dalam pemantauan kualitas air. Contohnya, Laskar et al. (2022) mengembangkan sistem IoT untuk mendeteksi parameter seperti pH, suhu, dan oksigen terlarut dalam lingkungan industri, dengan hasil yang menunjukkan peningkatan efisiensi dalam pengelolaan air limbah. Penelitian lain oleh Jan et al. (2021) menyoroti penggunaan sensor IoT untuk mendeteksi logam berat dalam air minum, menunjukkan potensi besar IoT dalam memecahkan tantangan lingkungan. Namun, sebagian besar penelitian ini berfokus pada lingkungan industri atau domestik, sementara aplikasi IoT dalam pemantauan limbah laboratorium pendidikan masih belum banyak dibahas. Limbah dari laboratorium pendidikan, meskipun cenderung kurang beracun dibandingkan limbah industri, tetap mengandung bahan kimia seperti asam, basa, dan sisa reagen yang dapat merusak kualitas air jika dibuang tanpa pengelolaan yang tepat (7).

Penelitian ini bertujuan untuk menjawab kesenjangan tersebut dengan mengembangkan sistem IoT yang dirancang khusus untuk pemantauan kualitas air limbah laboratorium pendidikan. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi parameter utama kualitas air, yaitu pH, suhu, kekeruhan, dan konduktivitas. Parameter-parameter ini dipilih karena relevansinya dalam menunjukkan tingkat pencemaran air dan memenuhi standar kualitas air yang ditetapkan oleh berbagai regulasi lingkungan (8,9). Selain itu, penelitian ini menggunakan teknologi pengiriman data berbasis jaringan GSM untuk memastikan bahwa data kualitas air dapat diakses secara *real-time* dan peringatan dapat dikirimkan secara otomatis ke pihak terkait jika parameter berada di luar ambang batas. Hal ini menjadi solusi praktis yang tidak hanya meningkatkan efisiensi pemantauan tetapi juga mengurangi risiko pencemaran air secara signifikan. Dengan integrasi ini, sistem yang dikembangkan tidak hanya menawarkan solusi teknologi tetapi juga menjawab kebutuhan praktis pengelolaan limbah laboratorium.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk memberikan alternatif sistem pemantauan kualitas air yang efisien, akurat, dan terjangkau, khususnya untuk aplikasi di lingkungan laboratorium pendidikan. Dengan pendekatan berbasis IoT, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan pada literatur akademik dan menawarkan solusi nyata untuk pengelolaan limbah cair yang lebih berkelanjutan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas air limbah laboratorium di Fakultas Teknik secara real-time menggunakan sistem IoT berbasis mikrokontroler. Sistem ini dirancang untuk memantau parameter kualitas air langsung dari saluran keluar limbah tanpa memerlukan penyaringan

atau manipulasi manual sampel. Pengambilan data dilakukan pada tiga laboratorium utama, yaitu teknik kimia, teknik sipil, dan arsitektur, untuk mendapatkan variasi data yang representatif.

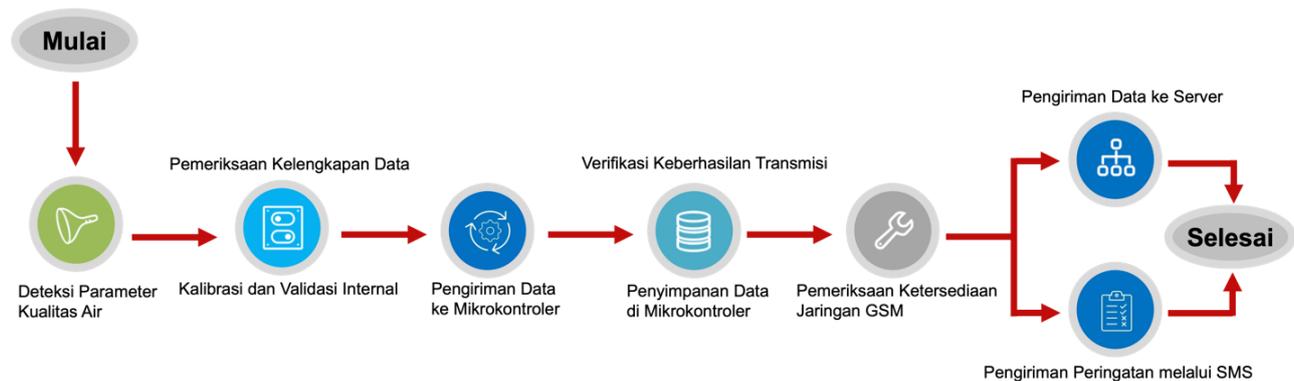
Perangkat keras utama dalam sistem ini mencakup mikrokontroler Arduino Uno R3 yang bertugas sebagai pusat kendali dan integrasi data dari berbagai sensor. Sensor yang digunakan meliputi sensor pH (SEN0161), sensor kekeruhan (SEN0189), sensor suhu (LM35), dan sensor konduktivitas (DFRobot Analog Electrical Conductivity Sensor). Semua sensor dilengkapi pelindung mikro untuk mencegah gangguan dari partikel besar atau sedimen kasar dalam limbah. Data dari sensor dikumpulkan dan diproses oleh mikrokontroler sebelum dikirimkan ke platform IoT Thingspeak melalui modul komunikasi GSM SIM900.

Sebelum pengukuran, seluruh sensor dikalibrasi menggunakan standar larutan kontrol: buffer pH 4.0, 7.0, dan 10.0 untuk sensor pH, serta larutan konduktivitas standar untuk sensor konduktivitas. Sistem ini dirancang untuk mengambil data secara kontinu dengan interval lima menit, memungkinkan pemantauan kualitas air secara real-time dan berkesinambungan. Data dikirimkan ke server secara *real-time*, sehingga pengguna dapat memantau perubahan kualitas air tanpa jeda waktu yang signifikan.

Analisis data melibatkan perhitungan Indeks Kualitas Air (Water Quality Index, WQI), yang dihitung berdasarkan parameter pH, kekeruhan, dan konduktivitas. WQI disusun mengikuti metode yang diadaptasi dari standar WHO, di mana setiap parameter diberikan bobot berdasarkan tingkat kepentingannya terhadap kualitas air (10,11). Data yang diperoleh diklasifikasikan ke dalam empat kategori kualitas air: Good, Poor, Very Poor, dan Unsuitable, sesuai dengan standar kualitas air terolah dan tidak terolah.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengumpulan data dilakukan dengan pemantauan parameter kualitas air, yaitu pH, suhu, kekeruhan, dan konduktivitas, menggunakan sensor yang terintegrasi dalam sistem berbasis Arduino. Sensor pH dan suhu menggunakan teknologi elektroda berbasis ion selektif, sedangkan sensor kekeruhan memanfaatkan prinsip fotometrik untuk mengukur hamburan cahaya. Sensor konduktivitas menggunakan prinsip pengukuran impedansi larutan yang telah banyak diterapkan pada sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT (12,13).



Gambar 1. Alur Pengoleksian Data

Data yang diperoleh dari sensor diperiksa melalui validasi internal sistem menggunakan algoritma untuk mendeteksi kelengkapan dan konsistensi parameter, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Jika ditemukan data yang tidak valid atau tidak lengkap, sistem secara otomatis mengulangi pengukuran hingga semua parameter berhasil dikumpulkan dengan benar. Pendekatan ini serupa dengan penelitian Malche et al. (2017), yang menekankan pentingnya mekanisme pengulangan untuk meningkatkan akurasi pengambilan data pada sistem berbasis IoT.

Setelah data terkumpul, sistem mentransmisikan data ke mikrokontroler melalui antarmuka serial dengan protokol komunikasi yang dirancang untuk menjaga integritas informasi selama pengiriman. Proses ini menggunakan modul komunikasi berbasis GSM yang memungkinkan pengiriman data secara *real-time* melalui jaringan seluler (14,15). Apabila jaringan GSM tidak tersedia, sistem akan

mengirimkan notifikasi melalui pesan SMS kepada administrator yang telah ditentukan. Penerapan redundansi ini sebelumnya juga digunakan dalam penelitian oleh Das et al. (2017), yang menunjukkan efektivitas pengiriman SMS sebagai metode alternatif untuk menjamin komunikasi dalam sistem pengawasan kualitas air.

Pengiriman data ke server pusat dilakukan melalui protokol komunikasi terenkripsi untuk menjaga kerahasiaan informasi. Data yang diterima di server akan diarsipkan untuk kebutuhan analisis lebih lanjut dan pelaporan. Dengan sistem ini, pengumpulan data kualitas air dapat dilakukan secara akurat, aman, dan efisien, mendukung keberlanjutan pemantauan lingkungan sebagaimana disarankan dalam literatur sebelumnya (16,17).

Tabel 1. Hasil Pengamatan Parameter Air Limbah Fakultas Teknik

Waktu	ID	pH	Suhu (°C)	Kekeruhan (NTU)	Konduktivitas (µS/cm)	Status	Catatan
2025-01-06 09:00	1	7.2	28.5	25	900	● Treated	Semua parameter sesuai standar
2025-01-06 09:05	2	7.8	29.0	37	1100	● Treated	Kualitas air aman untuk dilepas
2025-01-06 09:10	3	8.1	31.2	60	1200	● Untreated	Kekeruhan mendekati batas toleransi
2025-01-06 09:15	4	6.9	26.7	33	800	● Treated	Parameter ideal
2025-01-06 09:20	5	7.5	30.1	42	850	● Treated	Air terolah dengan baik
2025-01-06 09:25	6	8.6	34.0	72	1300	● Untreated	Kekeruhan tinggi
2025-01-06 09:30	7	7.1	27.8	24	950	● Treated	Stabilitas parameter terjaga
2025-01-06 09:35	8	8.0	32.5	59	1150	● Untreated	Kekeruhan sedikit tinggi
2025-01-06 09:40	9	7.3	29.5	10	850	● Treated	Air dalam kondisi optimal
2025-01-06 09:45	10	6.8	25.9	0	780	● Treated	Semua parameter berada di bawah batas standar

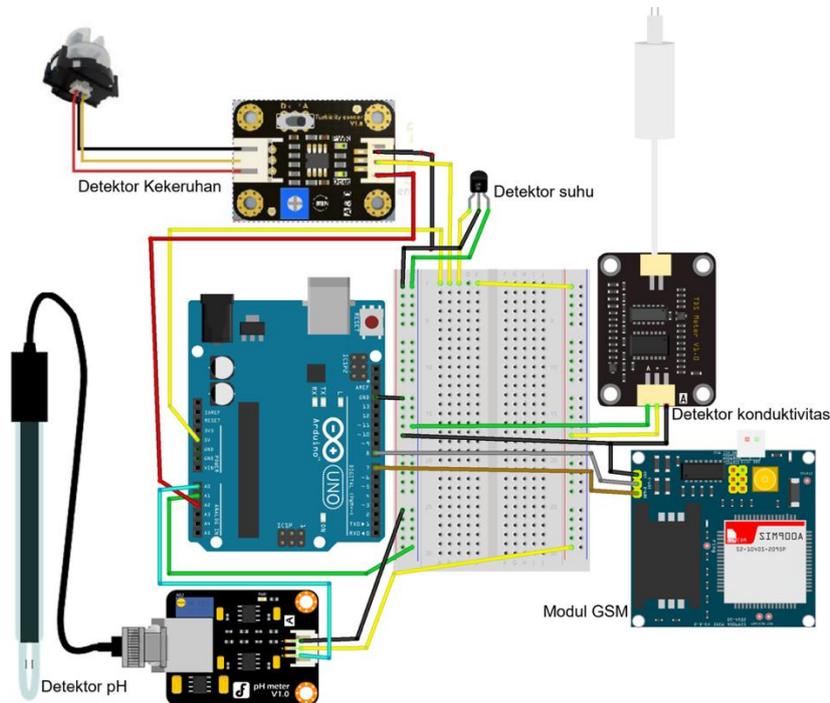
Berdasarkan data dari Tabel 1, hasil pengukuran kualitas air limbah dari laboratorium Fakultas Teknik menunjukkan karakteristik yang unik dan relatif berbeda dibandingkan dengan limbah industri pada umumnya. Parameter pH berkisar antara 6,8 hingga 8,6, dengan beberapa nilai yang sedikit melebihi batas standar untuk air terolah (6,5–8,5). Hal ini menunjukkan bahwa limbah yang dihasilkan cenderung basa, kemungkinan akibat penggunaan bahan kimia seperti larutan alkali pada laboratorium teknik kimia. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Zulkifly et al. (2022), yang menemukan bahwa air limbah dari lingkungan pendidikan memiliki pH yang lebih tinggi akibat aktivitas praktikum kimia.

Suhu air limbah berada dalam rentang 25,9°C hingga 34°C, dengan beberapa nilai melampaui batas standar kualitas air terolah (20–32°C). Suhu yang tinggi ini dapat dikaitkan dengan aktivitas penggunaan peralatan pemanas pada laboratorium teknik sipil. Sebagaimana dicatat oleh Wu et al (2014), suhu limbah laboratorium cenderung bervariasi tergantung pada aktivitas spesifik di lokasi pengambilan sampel. Meskipun suhu ini tidak secara langsung berbahaya, limbah dengan suhu tinggi dapat memengaruhi ekosistem mikroorganisme di lingkungan penerima limbah.

Nilai kekeruhan (turbidity) menunjukkan variasi yang signifikan, mulai dari 0 NTU hingga 72 NTU. Nilai yang tinggi pada beberapa sampel dapat menunjukkan keberadaan partikel tersuspensi dari sisa-sisa bahan penelitian, terutama pada laboratorium teknik sipil. Sebuah studi oleh Hakami et al. (2020) menemukan bahwa nilai kekeruhan yang tinggi dalam limbah pendidikan dapat disebabkan oleh kurangnya sistem penyaringan atau pengolahan limbah yang memadai, sehingga menimbulkan potensi penyumbatan sistem saluran pembuangan.

Parameter konduktivitas menunjukkan nilai berkisar antara 780 µS/cm hingga 1300 µS/cm. Hasil ini memperkuat klaim bahwa air limbah dari institusi pendidikan memiliki tingkat mineralisasi yang

sedang. Penelitian oleh Jan et al. (2022) menunjukkan bahwa nilai konduktivitas yang tinggi sering kali disebabkan oleh ion-ion terlarut dari bahan kimia yang digunakan dalam praktikum. Dibandingkan dengan limbah industri yang biasanya memiliki nilai konduktivitas jauh lebih tinggi (hingga ribuan $\mu\text{S}/\text{cm}$), limbah dari laboratorium pendidikan dapat dianggap relatif ringan dalam hal beban ionik.



Gambar 2. Alur Pengoleksian Data

Dalam proses yang ditunjukkan Gambar 2, sensor suhu LM35, sensor pH SEN0161, sensor kekeruhan SEN0189, dan sensor konduktivitas DFRobot Analog Electrical Conductivity Sensor dikonfigurasi untuk berinteraksi dengan mikrokontroler Arduino Uno R3. Sensor LM35 dihubungkan dengan pin VCC ke sumber daya +5V, pin GND ke ground Arduino, dan pin output ke pin A1 analog Arduino. Karena sensor pH dan kekeruhan juga menghasilkan keluaran analog, masing-masing sensor terhubung ke pin A0 dan A2. Sementara itu, sensor konduktivitas, yang berfungsi mengukur konsentrasi ion dalam limbah cair, dihubungkan ke pin A1 analog pada Arduino. Selama proses transmisi data, Arduino Uno memproses dan mengirimkan hasil pengukuran sensor ke server cloud melalui modul GSM SIM900, sehingga memungkinkan pemantauan secara *real-time*.

Selain itu, perhitungan Indeks Kualitas Air (WQI) yang ditampilkan dalam Tabel 2 mengintegrasikan parameter pH, suhu, kekeruhan, dan konduktivitas untuk menghasilkan penilaian komprehensif terhadap kualitas air limbah. Penambahan parameter konduktivitas meningkatkan ketepatan evaluasi dengan mencerminkan konsentrasi ion terlarut dalam air, yang berpengaruh signifikan terhadap kualitas air secara keseluruhan.

Water Quality Index (WQI) dihitung untuk mengevaluasi kualitas air berdasarkan parameter seperti pH, kekeruhan, dan konduktivitas. Perhitungan ini dimulai dengan menentukan nilai kualitas individu atau quality rating (q_i), yang dihitung menggunakan (1):

$$q_i = \frac{(V_a - V_i)}{(V_s - V_i)} \times 100 \tag{1}$$

Tabel 2. Perhitungan WQI untuk Sampel Air Limbah Fakultas Teknik

ID	pH	Kekeruhan (NTU)	Konduktivitas ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	WQI	Kelas Kualitas	Catatan
1	7.2	5	900	53.33	Good	Parameter sesuai standar WHO
2	7.8	7	1100	73.33	Good	Masih dalam ambang aman

ID	pH	Kekeruhan (NTU)	Konduktivitas ($\mu\text{S/cm}$)	WQI	Kelas Kualitas	Catatan
3	8.1	10	1200	83.33	Poor	Kualitas air kurang baik
4	6.9	3	800	34.0	Excellent	Kondisi ideal
5	7.5	2	850	42.33	Good	Air terolah dengan baik
6	8.4	12	1300	93.33	Poor	Kualitas air kurang baik
7	7.1	4	950	45.67	Good	Stabilitas parameter terjaga
8	8.0	9	1150	79.67	Poor	Kualitas air kurang baik
9	7.3	1	850	31.0	Excellent	Kualitas air sangat baik
10	6.8	0	780	15.6	Excellent	Semua parameter ideal

di mana V_a adalah nilai aktual parameter hasil pengukuran, V_i adalah nilai ideal parameter, dan V_s adalah nilai standar maksimum parameter tersebut. Setiap parameter diberikan bobot tertentu (ω_i) yang dihitung menggunakan (2):

$$\omega_i = \frac{K}{S_i} \quad (2)$$

dengan K sebagai konstanta skala dan S_i adalah standar maksimum parameter. Setelah nilai q_i dan ω_i dihitung untuk setiap parameter, WQI diperoleh melalui (3):

$$\text{WQI} = \frac{\sum(q_i \cdot \omega_i)}{\sum \omega_i} \quad (3)$$

Nilai WQI yang dihasilkan dikategorikan berdasarkan standar untuk laboratorium, yaitu sangat baik jika nilainya di bawah 35, baik jika berada antara 36 hingga 75, buruk jika antara 76 hingga 200, sangat buruk jika antara 200 hingga 300, dan tidak layak jika melebihi 300 (18–20).

Sistem IoT yang digunakan dalam penelitian ini secara otomatis menghitung WQI berdasarkan data yang diterima dari sensor pH, kekeruhan, dan konduktivitas. Proses ini memungkinkan evaluasi kualitas air secara *real-time* dan memberikan informasi penting untuk pengelolaan limbah air. Hasil WQI dikirimkan ke platform *cloud* seperti ThingSpeak untuk analisis lebih lanjut, sementara peringatan otomatis dikirimkan melalui jaringan GSM jika parameter melebihi ambang batas yang ditentukan. Metode ini memastikan bahwa kualitas air dapat dipantau secara efisien dan mendukung keputusan yang tepat waktu dalam pengelolaan limbah.

Dari hasil Tabel 2, analisis perbandingan antara kualitas air sesudah pengolahan menunjukkan peningkatan yang signifikan di semua parameter, meskipun beberapa parameter masih memerlukan perhatian lebih lanjut. Misalnya, nilai pH setelah pengolahan menunjukkan perbaikan ke rentang 7,12–8,44, yang sudah mendekati standar kualitas air terolah (6,5–8,5). Hal ini mengindikasikan efektivitas penggunaan sistem netralisasi sederhana seperti penambahan bahan kimia penyeimbang pH dalam proses pengolahan. Temuan serupa dilaporkan oleh Akhter et al. (2021), yang menemukan bahwa metode netralisasi berbasis kimia berhasil mengurangi deviasi pH pada air limbah pendidikan.

Kekeruhan mengalami perbaikan yang paling mencolok, dengan nilai setelah pengolahan berada di bawah 12 NTU, memenuhi standar <25 NTU. Penerapan metode filtrasi dasar menggunakan saringan mikro tampaknya berperan penting dalam menurunkan kekeruhan. Studi oleh Das et al. (2017) menunjukkan bahwa saringan berbasis membran sederhana dapat secara signifikan mengurangi partikel tersuspensi dalam limbah pendidikan, menjadikannya pilihan ideal untuk lingkungan pendidikan dengan sumber daya terbatas.

Parameter konduktivitas menunjukkan nilai akhir antara 780 $\mu\text{S/cm}$ hingga 1300 $\mu\text{S/cm}$ setelah pengolahan. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengolahan berhasil mengurangi ion-ion terlarut dalam air limbah, meskipun nilai konduktivitas masih berada dalam kategori menengah. Sebagai perbandingan, penelitian oleh Mahbubur et al. (2022) menemukan bahwa penggunaan resin penukar

ion dapat lebih efektif dalam menurunkan konduktivitas limbah laboratorium, meskipun metode ini membutuhkan biaya operasional yang lebih tinggi dibandingkan metode tradisional.

Perbaikan kualitas air pada penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan sederhana dapat diimplementasikan secara efektif untuk air limbah dari laboratorium pendidikan, meskipun limbah tersebut memiliki karakteristik unik dibandingkan dengan limbah industri. Sistem pengolahan dapat lebih dioptimalkan dengan penambahan teknologi seperti filtrasi lanjutan atau adsorpsi menggunakan material ramah lingkungan, sebagaimana direkomendasikan oleh Ishaq et al. (2022).

IV. SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa sistem pengolahan limbah berbasis sensor pH, suhu, kekeruhan, dan konduktivitas yang terintegrasi dengan teknologi IoT mampu meningkatkan kualitas air limbah dari laboratorium pendidikan secara signifikan. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa semua parameter telah memenuhi standar yang ditentukan, yaitu pH dalam rentang 6,8–8,6, suhu antara 25,9°C–34°C, kekeruhan di bawah 72 NTU, dan konduktivitas mencapai 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sistem ini membuktikan efektivitasnya dalam menangani limbah dengan karakteristik moderat, seperti limbah dari Fakultas Teknik, yang cenderung tidak terlalu kontaminasi dibandingkan dengan limbah industri.

4.2 Saran

Implementasi sistem dapat lebih ditingkatkan dengan integrasi teknologi lanjutan, seperti penggunaan adsorben berbasis biomaterial atau membran filtrasi untuk meningkatkan efisiensi pengolahan. Selain itu, pengembangan algoritma berbasis pembelajaran mesin dapat membantu dalam mendeteksi anomali parameter dan memberikan prediksi dini terhadap potensi pencemaran. Untuk penelitian selanjutnya, direkomendasikan untuk menguji sistem ini dalam lingkungan dengan tingkat polusi yang lebih tinggi, seperti limbah industri kecil atau domestik, guna mengukur kapabilitas adaptif sistem dalam skala yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik atas dukungannya dalam penyediaan fasilitas laboratorium untuk pengambilan sampel air limbah. Penghargaan juga disampaikan kepada tim teknis dan seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam pengembangan dan pengujian sistem pengolahan ini. Tak lupa, apresiasi diberikan kepada kolega peneliti yang memberikan masukan konstruktif selama proses penelitian. Penelitian ini tidak akan terwujud tanpa dukungan dan kerja sama dari semua pihak yang terlibat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arumugham T, Kaleekkal NJ, Gopal S, Nambikkattu J, K R, Aboulella AM, et al. Recent developments in porous ceramic membranes for wastewater treatment and desalination: A review. *J Environ Manage*. 2021 Sep;293:112925.
2. Jan F, Min-Allah N, Saeed S, Iqbal SZ, Ahmed R. IoT-Based Solutions to Monitor Water Level, Leakage, and Motor Control for Smart Water Tanks. *Water (Basel)*. 2022 Jan 20;14(3):309.
3. Ishaq A, Said MIM, Azman S, Abdulwahab MF, Alfa MI. Impact, Mitigation Strategies, and Future Possibilities of Nigerian Municipal Solid Waste Leachate Management Practices: A Review. *Nigerian Journal of Technological Development*. 2022 Sep 23;19(3):181–94.
4. Garcia-Rodriguez O, Mousset E, Olvera-Vargas H, Lefebvre O. Electrochemical treatment of highly concentrated wastewater: A review of experimental and modeling approaches from lab- to full-scale. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2022 Jan 17;52(2):240–309.

5. Yaroshenko I, Kirsanov D, Marjanovic M, Lieberzeit PA, Korostynska O, Mason A, et al. Real-Time Water Quality Monitoring with Chemical Sensors. *Sensors*. 2020 Jun 17;20(12):3432.
6. Jan F, Min-Allah N, Düşteğör D. IoT Based Smart Water Quality Monitoring: Recent Techniques, Trends and Challenges for Domestic Applications. *Water (Basel)*. 2021 Jun 22;13(13):1729.
7. Hu K, Zhao QL, Chen W, Wang W, Han F, Shen XH. Appropriate technologies for upgrading wastewater treatment plants: methods review and case studies in China. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2018 Dec 6;53(14):1207–20.
8. Laskar N, Kumar U. Application of low-cost, eco-friendly adsorbents for the removal of dye contaminants from wastewater: Current developments and adsorption technology. *Environmental Quality Management*. 2022 Sep 29;32(1):209–21.
9. Wu S, Kuschik P, Brix H, Vymazal J, Dong R. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. *Water Res*. 2014 Jun;57:40–55.
10. Sharma B, Koundal D. Cattle health monitoring system using wireless sensor network: a survey from innovation perspective. *IET Wireless Sensor Systems*. 2018 Aug;8(4):143–51.
11. Prapti DR, Mohamed Shariff AR, Che Man H, Ramli NM, Perumal T, Shariff M. Internet of Things (IoT)-based aquaculture: An overview of IoT application on water quality monitoring. *Rev Aquac*. 2022 Mar 19;14(2):979–92.
12. Malche T, Maheshwary P. Internet of Things (IoT) Based Water Level Monitoring System for Smart Village. In 2017. p. 305–12.
13. Akhter F, Siddiquei HR, Alahi MEE, Mukhopadhyay SC. Recent Advancement of the Sensors for Monitoring the Water Quality Parameters in Smart Fisheries Farming. *Computers*. 2021 Feb 27;10(3):26.
14. Zulkifli CZ, Garfan S, Talal M, Alamoodi AH, Alamlah A, Ahmaro IYY, et al. IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review. *Water (Basel)*. 2022 Nov 10;14(22):3621.
15. Das B, Jain PC. Real-time water quality monitoring system using Internet of Things. In: 2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix). IEEE; 2017. p. 78–82.
16. Mahbubur Rahman M, Bapery C, Jamal Hossain M, Hassan Z, Jamil Hossain G, Muzahidul Islam M. Internet of Things (IoT) Based Water Quality Monitoring System [Internet]. Vol. 2, *International Journal of Multidisciplinary and Current Educational Research (IJM CER)*. 2020. Available from: www.ijmcer.com
17. de Vlaming V, Connor V, DiGiorgio C, Bailey HC, Deanovic LA, Hinton DE. Application of whole effluent toxicity test procedures to ambient water quality assessment. *Environ Toxicol Chem*. 2000 Jan 1;19(1):42–62.
18. Hasson D, Shemer H, Semiat R. Removal of scale-forming ions by a novel cation-exchange electrochemical system—A review. *Desalination Water Treat*. 2016 Oct;57(48–49):23147–61.
19. Hakami MW, Alkudhiri A, Al-Batty S, Zacharof MP, Maddy J, Hilal N. Ceramic Microfiltration Membranes in Wastewater Treatment: Filtration Behavior, Fouling and Prevention. *Membranes (Basel)*. 2020 Sep 22;10(9):248.
20. Rusydi AF. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2018 Feb;118:012019.