

Constructed Wetlands Free Water System Dengan Sistem Monitoring IoT Pada Air Lindi

¹Senki Desta Galuh, ²Fitriana, ²Bagus Setya Rintyarna, ²Muhammad Ridho Pamuji, ²Erza Rizki Albani, ³Latifa Mirzatika Al-Rosyid, ⁴Mokh Hairul Bahri

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

²Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

³Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

⁴Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

Jalan Karimata 49 Jember

E-mail: senki.desta@unmuhjember.ac.id

Naskah Masuk: 16 April 2025; Diterima: 08 Agustus 2025; Terbit: 31 Agustus 2025

ABSTRAK

Abstrak - Air lindi merupakan cairan terkontaminasi yang mengandung banyak material terlarut atau terendapkan. Karakteristik dari cairan tersebut tergantung dari proses yang terjadi dalam landfill di setiap TPA. Adapun kandungannya dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu jenis sampah terdeposit, jumlah curah hujan di daerah TPA, dan kondisi spesifik tempat pembuangan tersebut. Salah satu TPA di Kabupaten Jember ialah TPA pakusari yang melayani penimbunan sampah bersumber dari 7 (tujuh) kecamatan di sekitar. TPA Pakusari memiliki luas Kawasan sebesar 6,8 Ha dengan catatan pada tahun 2022 menerima 160 – 180 ton perhari meningkat menjadi 194 ton pada 2023 sampah disuplai setiap harinya. Terdapat bermacam jenis tumbuhan air yang dapat ditemui sekitar TPA pakusari. Pada penelitian ini, digunakan metode wetlands sebagai media pada air lindi TPA Pakusari guna mengetahui jenis potensial yang paling baik digunakan sebagai pengurai Polutan TDS, EC, dan pH. Pengambilan sample uji dilaksanakan pada 1 (satu) titik lokasi, sampel tersebut kemudian diletakan pada sistem konstruksi lahan basah buatan (wetlands) Free water system (FWS). Selanjutnya dilakukan monitoring perubahan TDS, EC, pH, dan temperatur pada sistem konstruksi wetlands tersebut menggunakan sistem berbasis IoT. Penggunaan sistem IoT ini memungkinkan monitoring dapat dilakukan dari jarak jauh melalui smartphone meskipun pemonitor tidak berada di dekat sistem konstruksi wetlands. Monitoring dilakukan setiap 1 jam dalam kurun waktu selama 3 (tiga) hari.

Kata kunci: Air Lindi, Wetlands, Tempat Pemrosesan Akhir, Polutan, IoT

ABSTRACT

Abstract - Leachate is a contaminated liquid that contains a lot of dissolved or deposited material. The characteristics of the liquid depend on the process that occurs in the landfill at each TPA. The content is influenced by several factors, namely the type of waste deposited, the amount of rainfall in the TPA area, and the specific conditions of the disposal site. One of the TPAs in Jember Regency is the Pakusari TPA which serves the storage of waste from 7 (seven) surrounding sub-districts. The Pakusari TPA has an area of 6.8 Ha with a record that in 2022 it will receive 160-180 tons per day increasing to 194 tons in 2023 of waste supplied every day. There are various types of aquatic plants that can be found around the Pakusari TPA. In this study, the wetlands method was used as a medium for the Pakusari TPA leachate in order to determine the best potential types used as decomposers of TDS, EC, and pH pollutants. Test sampling was carried out at 1 (one) location point, the sample was then placed in the Free Water System (FWS) artificial wetland construction system. Furthermore, monitoring of changes in TDS, EC, pH, and temperature was carried out in the wetlands construction system using an IoT-based system. The use of this IoT system allows monitoring to be carried out remotely via smartphone even though the monitor is not near the wetlands construction system. Monitoring is carried out every 1 hour over a period of 3 (three) days.

Keywords: Leachate, Wetlands, Final Processing Site, Pollutant, IoT

Copyright © 2025 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Meskipun berbagai upaya telah dilakukan dalam mengolah air lindi, baik melalui proses fisika, kimia, atau biologi, sebagian besar Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) di Indonesia masih belum dapat memenuhi

standar mutu buangan yang ditetapkan. Untuk mengatasi masalah ini, dapat dilakukan beberapa tindakan, seperti menghindari perembesan air ke dalam tumpukan sampah dengan mengisolasi tumpukan tersebut menggunakan lapisan tanah penutup, memilih lahan dasar yang tidak mudah meresap air, mengalirkan air lindi yang terkumpul di dasar lahan ke bangunan pengolahan melalui saluran sekunder, serta mengurangi kandungan zat pencemar di dalamnya sehingga air lindi dapat dibuang ke saluran pembuangan air terdekat sesuai dengan standar yang berlaku. Penelitian yang dilakukan oleh Adam menyatakan bahwa faktor paling signifikan yang memengaruhi kualitas air lindi adalah variasi dalam komposisi sampah. Variabilitas ini lebih cenderung terjadi pada limbah padat domestik daripada pada limbah padat industri. Secara keseluruhan, ahli dalam program magister teknik lingkungan di Universitas Indonesia tersebut menyatakan bahwa kualitas air lindi akan sangat bervariasi ketika sampah yang dominan dalam komposisinya adalah jenis yang mudah terdekomposisi. Selain itu, kualitas gas dan cairan yang terbentuk juga sangat tergantung pada waktu. Kandungan bahan organik dan zat pencemar dalam air lindi yang masih segar akan lebih tinggi dibandingkan dengan air lindi yang telah berada lama di tempat pembuangan sampah [1]. Pada tahap awal, biasanya terdapat senyawa organik dengan berat molekul rendah, seperti Polutan TDS, EC, dan pH dalam cairan tersebut. TPA Pakusari dengan luas Kawasan sebesar 6,8 Ha memiliki catatan pada tahun 2022 menerima 160 – 180 ton sampah perhari dan meningkat menjadi 194 ton pada 2023. Sampah yang disuplai setiap harinya tentunya makin menambah tingginya angka Polutan TDS, EC, dan pH yang terkandung dalam lindi yang dihasilkan.

Saat ini, terdapat dua jenis sistem lahan basah buatan yang sedang dikembangkan, yaitu *Free Water System* (FWS) dan *Sub-surface Flow System* (SSF). FWS adalah sistem yang mengalirkan air di atas permukaan tanah, sedangkan SSF adalah sistem yang mengalirkan air di bawah permukaan tanah. Ketika air limbah mengalir melalui lahan basah buatan, ia melewati tanaman yang ditanam di dalam media berpori. Secara ekonomis, konsep FWS cocok untuk diterapkan pada pemukiman besar dan sistem industri. Di sisi lain, konsep SSF lebih sesuai untuk skala yang lebih kecil, seperti perumahan individu, komunal, taman, sekolah, fasilitas publik, dan area komersial. Keuntungan SSF adalah bahwa dengan mengalirkan air di bawah permukaan tanah, larva dan nyamuk tidak dapat berkembang biak, hal ini menciptakan keunggulan dibandingkan dengan sistem FWS [2]. Metode ini telah terbukti cukup baik digunakan, tidak memerlukan bangunan konstruksi baru, mudah diaplikasikan pada bangunan kolam penampungan pada Kawasan dengan menambahkan tanaman air yang telah diinvetarisir

Pada penelitian Galuh, dkk (2021) yang berjudul *Waste Water Treatment Analysis of Soybean Industry Using Wetlands System* menyatakan bahwa metode *wetlands* dengan sistem FWS dapat menurunkan BOD, COD, and TSS [3]. Namun pada penelitian tersebut belum dilakukan pengamatan terhadap perubahan TDS, EC, dan pH. Selain itu monitoring yang dilakukan masih belum menggunakan sistem IoT sehingga tidak dapat dimonitoring dari jarak jauh.

Berdasarkan latar belakang di atas maka perlu dilakukan penelitian dengan topik “Konstruksi Lahan Basah Buatan (Wetlands) Free Water System (FWS) Dengan Sistem Monitoring Berbasis IoT Pada Pengolahan Air Lindi”. Tujuan penelitian ini diantaranya: (1) Mengetahui angka polutan TDS, EC, dan pH air lindi TPA Pakusari saat ini, (2) Meminimalisir dampak pencemaran air tanah terhadap penyerapan air lindi, dan (3) Mengetahui kinerja dari sistem IoT yang ditambahkan pada konstruksi Wetlands dalam melakukan pembacaan suhu, TDS, EC, dan pH.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Air Lindi

Air lindi merupakan air limbah yang telah terkontaminasi dengan mengandung banyak material terlarut dan terendapkan. Karakteristik dari air limbah tersebut tergantung dari proses yang terjadi dalam landfill di setiap Kawasan TPA. Adapun kandungan air lindi dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya angka curah hujan di kawasan TPA, jenis sampah terdeposit, dan kondisi spesifik kawasan TPA. Berdasarkan penelitian bersama yang telah dilakukan oleh Daryat, cairan ini cenderung memiliki tingkat toksisitas yang tinggi karena mengandung senyawa organik (seperti hidrokarbon dan sulfat), senyawa anorganik (seperti natrium, kalium, kalsium, magnesium, klor, ortofosfat, fenol, dan logam berat beracun), serta mengandung sejumlah bakteri patogen. Di samping itu, cairan ini juga memiliki beberapa jenis bakteri aerob, seperti streptococcus, escherichia, pseudomonas, dan proteus yang dapat tumbuh di dalamnya [4]. Sartohadi dkk yang melakukan penelitian tentang cairan di sekitar TPA Piyungan telah memberikan penjelasan tambahan bahwa air lindi mengandung partikel padat halus, seperti ortofosfat dan seng. Zat-zat kimia ini cenderung berinteraksi dengan air dan menjadi penyebab utama pencemaran sumber air di dalam tanah. Konsentrasi dari komponen-komponen ini dapat mencapai level yang jauh lebih tinggi, yakni 1000 hingga 5000 kali lipat dibandingkan dengan konsentrasi yang ada di dalam air tanah [5]. Rezagama dkk mencatat bahwa faktor utama yang memengaruhi volume air lindi adalah faktor-faktor operasional yang diterapkan, seperti desain lapisan

penutup tanah dan topografi area landfill. Oleh karena itu, volume cairan tersebut bervariasi dan mengalami fluktuasi [6]. Sejalan dengan temuan dalam penelitian yang sama yang dilakukan oleh Rezagama, Adam juga menyatakan bahwa kuantitas air lindi juga dipengaruhi oleh intrusi air tanah, terutama ketika landfill ditempatkan di bawah permukaan tanah.

2.2. Wetlands

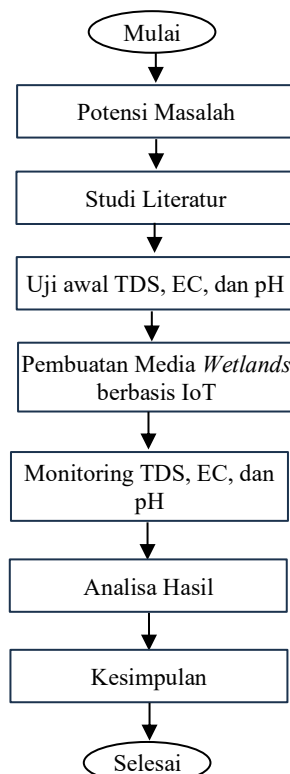
Dimulai dari kesepakatan Konvensi Internasional tentang lahan basah yang ditandatangani pada tanggal 2 Februari 1971 di Ramsar, Iran, yang lebih dikenal sebagai Konvensi Ramsar. Pada tahun 1996, anggota konvensi mengadakan pertemuan dan mencapai kesepakatan untuk menetapkan Hari Lahan Basah Sedunia pada tanggal 2 Februari. Hari tersebut diperingati secara bersama oleh seluruh anggota Konvensi Ramsar setiap tahunnya. Indonesia memiliki luas lahan basah yang terbesar di dunia, dan lahan basah memainkan peran penting sebagai sumber pemurnian air dan penyimpan karbon. Penelitian oleh Maktoof yang berjudul *Use of two plants to remove pollutants in wastewater in constructed wetlands in southern Iraq* membuktikan Kemampuan filter yang diuji dalam pengolahan air limbah dan eliminasi polutan telah menghasilkan penurunan signifikan dalam parameter-parameter seperti TDS, TSS, dan EC. Selain itu, konsentrasi ion positif dan negatif, termasuk Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Na^+ , NO_3^- , Mg^{2+} , dan Ca^{2+} , telah mengalami penurunan drastis, dengan masing-masing memiliki nilai awal 730,00 mg/l, 1,1 $\mu\text{g/l}$, 559 $\mu\text{g/l}$, 319,00 mg/l, 1,19 $\mu\text{g/l}$, 370,71 mg/l, dan 319 mg/l yang menurun [7]. Penelitian Rohim yang berjudul *Aquatic environmental characteristic of Singkil Swamp Wildlife Reserve in Aceh Singkil Regency* menghasilkan Sifat fisika-kimia dari Penutup Suaka Margasatwa Rawa Singkil suhu (25,6-30 $^{\circ}\text{C}$), transparansi air (13-145cm), kedalaman (0,8-5 m), tidak berbau, warna (coklat sampai hitam), arus (0,06-0,24 m/s), pH (3,9-6,5), DO (1-3,9 mg/l), salinitas (0 ppt), TDS (13-44 mg/l), TSS (9-236 mg/l), konduktivitas (26-88 S/m), total fosfat (0,01-2,14 mg/l) dan nitrat (0,5-25,7 mg/l) cocok untuk kehidupan biota perairan [8]. Penelitian yang dilaksanakan oleh Herazo dkk yang berjudul *Constructed Wetlands Planted with Ornamental Species and PET as a Substitute for Filter Media for Municipal Wastewater Treatment: An Experience in a Mexican Rural Community* menyatakan bahwa Sistem vegetasi pada konstruksi lahan basah buatan menunjukkan tingkat penghilangan rata-rata sebesar 60%, dengan nilai yang mencapai hingga 70% pada sistem polikultur [9]. Galuh dalam penelitian yang berjudul "Analisis Pengolahan Limbah Cair Industri Kedelai dengan Menggunakan Sistem konstruksi Lahan Basah" mencatat bahwa penggunaan metode lahan basah dengan sistem FWS berhasil mengurangi konsentrasi polutan BOD dari 1195 mg/L menjadi hanya 31,8 mg/L, serta mengurangi konsentrasi COD dari 2883 mg/L menjadi hanya 64,4 mg/L [10].

2.3. Internet of Things (IoT)

IoT (*Internet of Things*) memiliki arti bahwa internet adalah segalanya. Hal ini mencakup konsep ketika objek dilengkapi dengan teknologi seperti sensor dan perangkat lunak untuk tujuan berkomunikasi, terhubung, dan bertukar data dengan perangkat lain ketika terhubung ke internet. Sistem IoT ini juga dapat diintegrasikan dengan smartphone dan berbagai sensor seperti sensor suhu, sensor kelembapan, sensor pH, sensor gerak, RFID, sensor jarak, sensor gas, sensor TDS, dan sensor EC. Pada penelitian Chuzaini dan Dzulkifli, pemanfaatan IoT dilakukan untuk memonitoring kualitas air dengan menggunakan sensor suhu, pH, dan total dissolved solids (TDS). Aplikasi yang digunakan pada sistem ini yaitu Blynk. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sistem IoT dapat bekerja dengan baik dengan nilai akurasi pengukuran berkisar antara 98,28-100% [3]. Penggunaan sensor pH tanah, suhu, dan kelembaban tanah yang diintegrasikan dengan sistem IoT pernah dilakukan dalam penelitian oleh Vien. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kesulitan yang dialami oleh petani jagung dalam melakukan monitoring kondisi tanah sehingga dirancang suatu alat berbasis IoT yang dapat memonitoring kondisi pH tanah, suhu, dan kelembaban tanah pada tanaman jagung secara otomatis. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa alat tersebut berhasil mengukur pH tanah, suhu, dan kelembaban tanah pada tanaman jagung dengan baik [11]. Sistem IoT dapat dimanfaatkan untuk melakukan sistem kontrol otomatis dan monitoring *electrical conductivity* (EC) untuk pemberian pupuk pada tanaman selada hidroponik seperti yang dilakukan pada penelitian Afandi. Pada penelitian tersebut, pemanfaatan NodeMCU sebagai mikrokontroler dalam sistem IoT memungkinkan pengukuran kondisi lingkungan secara langsung melalui web dan aplikasi Thingview pada perangkat smartphone. Melalui sistem ini, data yang tersimpan pada server dapat diunduh kembali kemudian hari apabila dibutuhkan untuk dianalisis.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Diagram alir digambarkan memuat tahapan secara rinci dijelaskan sebagai berikut:

a. Potensi Masalah

Tahap potensi masalah bertujuan untuk menganalisa kandungan air lindi yang dihasilkan oleh tempat pemrosesan akhir sampah Pakusari. Tahap potensi masalah mencakup dua langkah pokok yaitu hasil analisis laboratorium terhadap air lindi yang diambil dari 1 titik kawasan tempat pemrosesan akhir Pakusari dan berbagai studi literatur terkait air lindi dari kawasan tempat pemrosesan akhir kawasan lainnya.

b. Studi Literatur

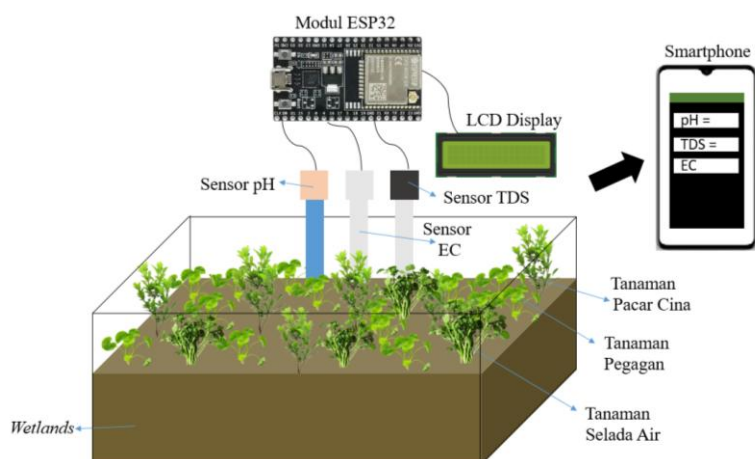
Studi literatur dilaksanakan guna mendapat informasi terkait air lindi yang dihasilkan oleh kawasan tempat pemrosesan akhir. Studi literatur juga dilaksanakan untuk mendapatkan data hasil dari penelitian lainnya mengenai beragam jenis tanaman air yang dapat diaplikasikan pada wetlands.

c. Uji awal TDS, EC, dan pH

Sebelum sistem dikembangkan, dilakukan pengujian awal terhadap parameter kualitas air yaitu TDS (Total Dissolved Solids) yang menunjukkan jumlah zat padat terlarut, EC (Electrical Conductivity) yang menunjukkan tingkat konduktivitas listrik air, dan pH yang menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan air. Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan data awal (*baseline*).

d. Pembuatan Media *Wetlands* berbasis IoT

Tahap ini dimulai dengan merancang bentuk dan model *wetlands* yang akan dioperasikan serta melakukan analisa data hasil laboratorium dan studi literatur yang telah diperoleh, data dan informasi tersebut digunakan sebagai rangkain menyusun desain. Tahapan dalam pembuatan media diantaranya yaitu : (a) menganalisis hasil laboratorium dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. P59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 [12], Baku Mutu Air Lindi bagi Usaha Tempat Pemrosesan Akhir Sampah; (b) melakukan analisis studi literatur terhadap media wetlands dan inventarisasi tanaman air; (c) menentukan posisi terbaik titik dan waktu pengambilan sampel; (d) merancang blueprint desain penelitian berupa gambar desain wetlands yang dilengkapi dengan sistem monitoring pH, EDS, dan EC berbasis IoT (Gambar 2); (e) membuat model purwarupa sebagai miniatur desain.



Gambar 2 Desain konstruksi *wetlands* dengan sistem monitoring berbasis IoT

e. Monitoring TDS, EC, dan pH

Sistem IoT yang telah dibuat kemudian digunakan untuk melakukan pemantauan parameter TDS, EC, dan pH secara berkala. Data hasil monitoring akan tersimpan dan dianalisis. Dalam pengelolaan air lindi di kawasan tempat pemrosesan akhir sampah Kecamatan Pakusari Kabupaten Jember, parameter dari kelayakan desain tersebut mengacu kepada permen LHK No. P59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Air Lindi bagi Usaha Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

f. Analisa Hasil

Data yang diperoleh dari proses monitoring kemudian dianalisis untuk mengetahui efektivitas sistem *wetlands* dalam memperbaiki kualitas air. Analisis dapat dilakukan secara kuantitatif (data numerik) maupun kualitatif (pengamatan perubahan fisik).

g. Kesimpulan

Tahapan ini berisi rangkuman dari hasil penelitian, termasuk kesesuaian hasil dengan tujuan penelitian, keunggulan sistem yang dikembangkan, serta rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

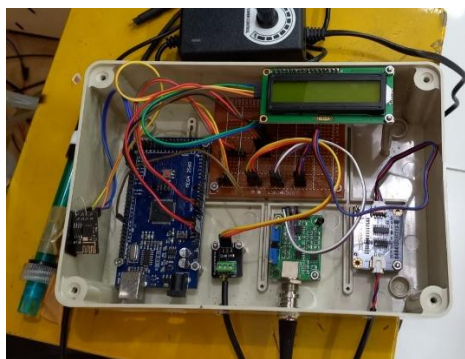
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan

Perancangan Konstruksi Lahan Basah Buatan (*Wetlands*) *Free Water System* (FWS) dengan Sistem Monitoring Berbasis IoT pada Pengolahan Air Lindi merupakan sebuah langkah inovatif dalam pengelolaan limbah cair. Sistem ini menggabungkan prinsip-prinsip konstruksi lahan basah buatan (*wetlands*) dengan teknologi *Free Water System* (FWS) yang memanfaatkan proses alami untuk memperbaiki kualitas air limbah. Penambahan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan pemantauan yang lebih efisien dan real-time terhadap parameter-parameter kualitas air, seperti tingkat keasaman (pH), temperatur, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan *Electrical Conductivity* (EC). Berikut merupakan hasil perancangan produk yang dihasilkan pada penelitian ini:



Gambar 3. Hasil produk penelitian



Gambar 4. Sistem kontrol alat

Konstruksi lahan basah buatan ini dirancang untuk meniru dan meningkatkan proses alami pengolahan air limbah yang terjadi di lingkungan alam. Dengan menggunakan tanaman air, mikroorganisme, dan substrat yang tepat, sistem ini dapat secara efektif menghilangkan zat-zat pencemar dari air limbah, mengurangi tingkat keasaman, serta meningkatkan kandungan oksigen terlarut. Sistem monitoring berbasis IoT kemudian mengintegrasikan sensor-sensor yang terpasang di dalam lahan basah buatan untuk mengukur dan mentransmisikan data secara langsung ke platform online. Hal ini memungkinkan operator untuk memantau kondisi air limbah secara real-time, mengidentifikasi perubahan yang signifikan, dan mengambil tindakan korektif secara cepat dan tepat. Dengan adanya perancangan ini, diharapkan efisiensi dan efektivitas pengolahan air limbah dapat ditingkatkan secara signifikan. Selain itu, integrasi teknologi IoT juga membuka potensi untuk pengembangan sistem otomatisasi yang lebih lanjut, seperti kontrol otomatis pada proses pengolahan atau pengoptimalan penggunaan sumber daya. Melalui perpaduan antara prinsip-prinsip konstruksi alamiah dan teknologi modern, Konstruksi Lahan Basah Buatan (*Wetlands*) *Free Water System* dengan Sistem Monitoring Berbasis IoT pada Pengolahan Air Lindi menjelma sebagai solusi yang inovatif dan berkelanjutan dalam menghadapi tantangan pengelolaan air limbah di masa depan.

4.2 Hasil Pengujian Sensor pH

Tujuan dari pengujian sensor pH adalah untuk mengetahui tingkat akurasi dan keandalan sensor pH dalam mengukur nilai keasaman atau kebasaan suatu larutan dengan cara membandingkannya terhadap hasil pengukuran dari pH meter standar. Pada penelitian ini, pengujian sensor pH dilakukan sebanyak lima kali dengan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Pengujian ke-	Hasil Ukur pH		Selisih	Error (%)
	pH Meter	Sensor pH		
1	8,05	8,15	0,10	1,24
2	7,92	7,99	0,07	0,88
3	8,01	7,78	0,23	2,87
4	7,87	8,16	0,29	3,68
5	7,91	8,13	0,22	2,78
Rata-Rata				2,29

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai pH yang terbaca oleh sensor memiliki perbedaan kecil terhadap pH meter, dengan selisih tertinggi sebesar 0,29 pada pengujian ke-4 dan selisih terendah sebesar 0,07 pada pengujian ke-2. Persentase kesalahan (error) bervariasi antara 0,88% hingga 3,68%, dengan rata-rata error sebesar 2,29%. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sensor pH bekerja dengan tingkat akurasi yang baik, karena rata-rata kesalahan pengukuran masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk sistem monitoring pH berbasis sensor.

4.3 Hasil Pengujian Sensor TDS

Pengujian sensor TDS bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi dan performa sensor TDS dalam mengukur kadar *Total Dissolved Solids* (padatan terlarut total) pada air dengan cara membandingkannya terhadap hasil pengukuran TDS meter standar. Pada penelitian ini, pengujian sensor TDS dilakukan sebanyak lima kali dengan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji sensor TDS

Pengujian ke-	Hasil Pengukuran TDS		Selisih	Error (%)
	TDS Meter	Sensor TDS		
1	236	217,04	18,96	8,03
2	240	237,05	2,95	1,23
3	240	217,88	22,12	9,22
4	239	231,71	7,29	3,05
5	240	232,87	7,13	2,97
Rata-Rata Error (%)				4,90

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai yang terbaca oleh sensor TDS memiliki selisih yang relatif kecil terhadap alat pembanding, dengan persentase kesalahan (*error*) berkisar antara 1,23% hingga 9,22%, dan rata-rata error sebesar 4,90%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor TDS mampu mengukur kadar padatan terlarut (*Total Dissolved Solids*) dengan tingkat akurasi yang cukup baik dan masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk sistem monitoring kualitas air.

4.4 Hasil Pengujian Sensor EC

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat akurasi dan keandalan sensor *Electrical Conductivity* (EC) dalam mengukur nilai konduktivitas listrik suatu larutan dengan cara membandingkannya terhadap hasil pengukuran EC meter standar. Pada penelitian ini, pengujian sensor EC dilakukan sebanyak lima kali dengan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji sensor EC

Pengujian ke-	Hasil Pengukuran EC		Selisih	Error (%)
	EC Meter	Sensor EC		
1	0,472	0,47	0,002	0,42
2	0,48	0,44	0,04	8,33
3	0,49	0,44	0,05	10,20
4	0,478	0,46	0,018	3,77
5	0,48	0,47	0,01	2,08
Rata-Rata Error (%)				4,96

Berdasarkan hasil pengujian, persentase kesalahan (*error*) pengukuran bervariasi antara 0,42% hingga 10,20%, dengan rata-rata error sebesar 4,96%. Nilai rata-rata ini menunjukkan bahwa sensor EC memiliki tingkat akurasi yang baik dalam mendeteksi konduktivitas listrik pada larutan uji, sehingga dapat digunakan dalam sistem pemantauan kualitas air.

4.5 Hasil Pengujian Sensor Suhu

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat akurasi sensor suhu dalam mengukur temperatur air limbah dengan cara membandingkan hasilnya terhadap termometer standar. Pada penelitian ini, pengujian sensor suhu dilakukan sebanyak lima kali dengan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji sensor suhu

Pengujian ke-	Hasil Pengukuran suhu		Selisih	Error (%)
	Termometer	Sensor Suhu		
1	26°C	26°C	0°C	0
2	26°C	25°C	1°C	3,85
3	26°C	26°C	0°C	0
4	25°C	25°C	0°C	0
5	26°C	25°C	1°C	3,85
Rata-Rata Error (%)				1,54%

Berdasarkan hasil pengujian, nilai suhu yang terbaca oleh sensor menunjukkan hasil yang sangat mendekati alat pembanding, dengan selisih maksimum sebesar 1°C pada pengujian ke-2 dan ke-5, sedangkan pada pengujian lainnya tidak terdapat selisih sama sekali (0°C). Persentase kesalahan (*error*) pengukuran berada dalam rentang 0% hingga 3,85%, dengan rata-rata error sebesar 1,54%. Nilai rata-rata error yang rendah ini menunjukkan bahwa sensor suhu memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dan dapat diandalkan untuk mengukur suhu air secara *real-time*.

4.6 Hasil Monitoring Air Lindi

Monitoring kualitas air lindi (*leachate*) dilakukan menggunakan sistem berbasis Internet of Things (IoT) yang telah dirancang untuk memantau parameter *Electrical Conductivity* (EC), *Total Dissolved*

Solids (TDS), dan pH secara real-time. Tujuan dari tahap ini adalah untuk mengetahui efektivitas sistem dalam mendeteksi perubahan kualitas air lindi selama proses pengolahan berlangsung pada media *wetlands* berbasis IoT. Sensor EC, TDS, dan pH dipasang pada titik pengambilan sampel yang telah ditentukan. Data hasil pengukuran dikirim secara otomatis ke platform IoT melalui jaringan internet, sehingga pengguna dapat memantau kondisi air kapan saja tanpa harus melakukan pengukuran manual. Pengambilan data dilakukan selama satu hari untuk memperoleh tren perubahan parameter secara kontinu.

Tabel 5. Hasil monitoring air lindi menggunakan IoT

Tanggal	Jam	Suhu	pH	TDS	EC
01/05/2024	07:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	08:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	09:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	10:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	11:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	12:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	13:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	14:00:00	26° C	6,73	499,5	249
01/05/2024	15:00:00	26° C	7,88	499,5	249
01/05/2024	16:00:00	26° C	7,88	499,5	249
01/05/2024	17:00:00	26° C	7,88	499,5	249

Berdasarkan hasil pengukuran pada tabel di atas, nilai TDS dan EC relatif stabil selama periode pengamatan, yaitu 499,5 ppm dan 249 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi zat padat terlarut dan tingkat konduktivitas listrik air lindi tidak mengalami perubahan signifikan selama proses pemantauan. Nilai pH pada awal pengamatan (pukul 07.00–14.00) menunjukkan kondisi air yang sedikit asam dengan nilai pH 6,73. Namun, mulai pukul 15.00 hingga 17.00, nilai pH meningkat menjadi 7,88, yang menunjukkan bahwa air lindi mengalami proses penetralan. Peningkatan nilai pH ini dapat disebabkan oleh aktivitas biologis atau proses filtrasi pada media *wetlands* yang menurunkan kandungan asam di dalam air. Sementara itu, suhu air terpantau konstan pada 26°C, menandakan bahwa kondisi lingkungan cukup stabil dan tidak memengaruhi kinerja sensor maupun proses pengolahan air.

5. KESIMPULAN

Hasil pemantauan sistem IoT pada tanggal 1 Mei 2024 menunjukkan bahwa kualitas air lindi berada dalam kondisi stabil sepanjang periode pengukuran. Suhu air konstan pada 26°C, menandakan lingkungan perairan tidak terpengaruh signifikan oleh suhu eksternal. Nilai pH meningkat dari 6,73 menjadi 7,88, diduga akibat aktivitas fotosintesis organisme akuatik yang menurunkan kadar CO_2 dan membuat air lebih basa. Parameter TDS (499,5 mg/L) dan EC (249 $\mu\text{S}/\text{cm}$) juga stabil, menunjukkan tidak ada perubahan signifikan pada konsentrasi zat terlarut. Temuan ini membuktikan bahwa lahan basah buatan (FWS) efektif dalam menstabilkan kualitas air melalui proses alami seperti filtrasi, sedimentasi, dan aktivitas mikroba. Integrasi dengan sistem monitoring IoT memungkinkan pengawasan real-time yang efisien, sehingga kombinasi keduanya meningkatkan efektivitas pengolahan air lindi dan mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Untuk penelitian selanjutnya, pengembangan sistem IoT dapat ditingkatkan dengan menambahkan sensor tambahan, seperti DO (*Dissolved Oxygen*) dan suhu lingkungan. Selain itu, dapat juga dilakukan integrasi sistem dengan fitur notifikasi otomatis berbasis ambang batas parameter dapat membantu deteksi dini terhadap perubahan kualitas air secara *real-time*.

REFERENSI

- [1] G. A. M. Adam dan G. S. B. Andari, “Analisis pengaruh sifat fisik kimia sampah terhadap reduksi volume sampah dan karakteristik air lindi pada bioreaktor landfill aerobik dan anaerobik,” Jakarta: Universitas Indonesia, 2015.
- [2] M. Afandi, “Sistem Kontrol Otomatis dan Monitoring EC Berbasis IoT untuk Pemberian Pupuk pada Tanaman Selada Hidroponik,” Jember: Universitas Jember, 2020.
- [3] F. Chuzaini dan Dzulkifli, “IoT Monitoring Kualitas Air dengan Menggunakan Sensor Suhu , pH , dan Total Dissolved Solids (TDS),” *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 11, no. 3, hal. 46–56, 2022.
- [4] F. Daryat *et al.*, “Analisis Kualitas Air Lindi Asal Tempat Embuangan Akhir Sampah Kota Pekanbaru Berdasarkan Parameterbiologi, Fisika Dan Kimia,” *Riau Biol.*, vol. 2, no. 1, hal. 68–80, 2017.

- [5] J. Sartohadi, M. Widyastuti, dan I. S. Lestari, “Penyebaran Airtanah Bebas Tercemar Air Lindi Di Sekitar Tpa Piyungan Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta,” *Forum Geogr.*, vol. 19, no. 1, hal. 16–29, 2005.
- [6] A. Rezagama, M. Hadiwidodo, P. Purwono, N. F. Ramadhani, dan M. Yustika, “Penyisihan Limbah Organik Air Lindi TPA Jatibarang Menggunakan Koagulasi-Flokulasi Kimia,” *Teknik*, vol. 37, no. 2, hal. 78–83, 2016.
- [7] A. A. Maktoof dan M. S. Al-Enazi, “Use of two plants to remove pollutants in wastewater in constructed wetlands in southern Iraq,” *Egypt. J. Aquat. Res.*, vol. 46, no. 3, hal. 227–233, 2020.
- [8] N. Rohim, S. Sulistiono, dan F. Yulianda, “Aquatic environmental characteristic of Singkil Swamp Wildlife Reserve in Aceh Singkil Regency,” *Depik*, vol. 11, no. 1, hal. 7–15, 2022.
- [9] L. C. S. Herazo, J. L. Marín-Muñiz, A. Alvarado-Lassman, F. Zurita, O. Marín-Peña, dan M. Sandoval-Herazo, “Full-Scale Constructed Wetlands Planted with Ornamental Species and PET as a Substitute for Filter Media for Municipal Wastewater Treatment: An Experience in a Mexican Rural Community,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 2280, hal. 1–19, 2023.
- [10] S. D. Galuh, L. Mirzatika, dan R. Sujarwadi, “Waste Water Treatment Analysis of Soybean Industry Using Wetlands System,” *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 2, no. 7, hal. 291–295, 2021.
- [11] B. H. Vien, F. Hadary, dan E. Yurisinthae, “Sistem Monitoring pH Tanah, Suhu dan Kelembaban Tanah pada Tanaman Jagung Berbasis Internet Of Things (IOT),” *J. Tek. elektro*, vol. 11, no. 1, hal. 1–9, 2023.
- [12] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. P59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Air Lindi bagi Usaha Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, 2016.