

Desain dan Kinerja Sistem *Constructed Wetlands* Berbasis Fitoteknologi Akar Wangi untuk Pengolahan Air Limbah Kopi Olah Basah

Senki Desta Galuh¹, Musyarofa², Latifa Mirzatika Al-Rosyid³

¹Fakultas Teknik/Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jember
Jalan Karimata No 49 Jember

²Fakultas Teknik/Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Muhammadiyah Jember
Jalan Karimata No 49 Jember

³Fakultas Teknik/Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Muhammadiyah Jember
Jalan Karimata No 49 Jember

¹E-mail: senki.desta@unmuhjember.ac.id

Abstract — *Wet coffee processing in Jember Regency generates wastewater with very high organic pollutant loads, particularly in terms of BOD, COD, and TSS, which can degrade water quality if released without proper treatment. This study aims to design and evaluate the performance of a constructed wetlands system using vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) as a phytotechnology-based approach to reduce pollutants in wet coffee-processing wastewater. The method consisted of: (1) initial characterization of the wastewater through laboratory testing and literature review; (2) prototype-scale constructed wetlands design using acrylic boxes as flow media equipped with vetiver grass for phytoremediation; and (3) performance testing by monitoring BOD levels on day 0, 3, 5, and 7, and comparing them with the quality standards stated in the Indonesian Ministry of Environment Regulation No. 5 of 2014. The results show that the constructed wetlands system with vetiver grass effectively reduced BOD concentrations. The initial BOD of 162.7 mg/L decreased to 53.3 mg/L (day 3), 40.0 mg/L (day 5), and 33.3 mg/L (day 7). The reduction reached 79.5% within 7 days, and all BOD values after day 3 were far below the regulatory limit of 150 mg/L. These findings indicate that vetiver grass has high effectiveness in the phytoremediation of wet coffee-processing wastewater, and that constructed wetlands offer a simple, low-cost, and sustainable civil engineering—particularly environmental engineering—solution for treating wastewater from small-scale coffee industries.*

Keywords: *wet coffee-processing wastewater; constructed wetlands; phytotechnology; vetiver grass; BOD.*

Abstrak — *Pengolahan kopi secara basah di Kabupaten Jember menghasilkan air limbah dengan beban pencemar organik yang sangat tinggi, terutama pada parameter BOD, COD, dan TSS, yang berpotensi menurunkan kualitas badan air apabila dibuang tanpa pengolahan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji kinerja sistem constructed wetlands berbasis fitoteknologi menggunakan tanaman akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) sebagai upaya reduksi pencemar pada air limbah kopi olah basah. Metode yang digunakan meliputi: (1) analisis awal karakteristik air limbah melalui uji laboratorium dan studi literatur; (2) perancangan constructed wetlands skala purwarupa menggunakan box acrylic sebagai media aliran, dilengkapi tanaman akar wangi sebagai agen fitoremediasi; serta (3) uji kinerja sistem melalui pemantauan parameter BOD pada hari ke-0, ke-3, ke-5, dan ke-7, kemudian membandingkannya dengan baku mutu Permen LHK No. 5 Tahun 2014. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem constructed wetlands dengan media akar wangi mampu menurunkan kadar BOD secara signifikan. Nilai BOD awal sebesar 162,7 mg/L turun menjadi 53,3 mg/L (hari ke-3), 40,0 mg/L (hari ke-5), dan mencapai 33,3 mg/L pada hari ke-7. Persentase penurunan mencapai 79,5% dalam 7 hari, dan seluruh nilai BOD setelah hari ke-3 telah berada jauh di bawah baku mutu 150 mg/L. Temuan ini menunjukkan bahwa akar wangi memiliki efektivitas tinggi dalam proses fitoremediasi air limbah kopi olah basah dan constructed wetlands dapat menjadi solusi teknik sipil—khususnya bidang teknik lingkungan—yang sederhana, murah, dan berkelanjutan untuk pengolahan air limbah industri kopi berskala rakyat.*

Keywords: *air limbah kopi olah basah; constructed wetlands; fitoteknologi; akar wangi; BOD*

I. PENDAHULUAN

Provinsi Jawa Timur merupakan daerah sentra kopi yang ada di Indonesia, dimana dua daerah utama sebagai penghasil kopi adalah Kabupaten Malang dan Kabupaten Jember. Pengusahaan komoditi kopi di Kabupaten Jember adalah jenis Robusta, baik yang diusahakan oleh rakyat

maupun perkebunan besar. Berdasarkan data tahun 2020, Kabupaten Jember memiliki luas area tanaman kopi areal tanaman kopi 4.658 ha dengan produksi 2.369 ton dan produktivitas mencapai 11.859 kg/ hektar. Pada umumnya, pengolahan kopi yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode pengolahan kopi secara basah. Pada

metode ini, pengolahan kopi secara basah dilakukan dengan memasukkan buah kopi ke dalam cilinder putar, kemudian menyemprotkan air bersamaan dengan buah kopi yang akan dikupas. pada proses ini dibutuhkan sekitar 7 - 9 m³ air per tonnya.

Permasalahan yang sering muncul akibat metode pengolahan secara basah ini adalah air limbah yang tidak dikelola dengan baik. adapun dampak air limbah pengolahan kopi jika dialirkan secara langsung ke badan air/perairan terdekat dapat mengurangi kandungan oksigen karena tingginya nilai BOD dan COD, serta terjadinya pengurangan oksigen terlarut yang dapat mengakibatkan kondisi anaerobik perairan karena kebutuhan oksigen untuk menguraikan bahan organik melebihi ketersediaan oksigen (Rezagama dkk, 2016; Novita dkk, 2021). Adapun pada penelitian sebelumnya, diketahui bahwa air limbah pengolahan kopi memiliki nilai kandungan TSS sebesar 127 - 140 mg/l, kekeruhan sebesar 395 - 448 NTU, dan COD sebesar 3360 - 3762 mg/l (Novita dkk, 2019). Penelitian lain juga menyebutkan bahwa kandungan air limbah pengolahan kopi di Desa Sidomulyo Kabupaten Jember memiliki nilai BOD dan COD yang tinggi, yaitu hampir mencapai 20.000 mg/l untuk BOD dan 32.000 mg/l untuk COD (Rosman dkk, 2013). Jika hasil dari kedua penelitian tersebut dibandingkan dengan baku mutu air limbah untuk kegiatan industri pengolahan kopi (Permen LHK Nomor 5 Tahun 2014) maka nilai tersebut sudah jauh diambang batas yang telah ditentukan (kadar paling tinggi untuk parameter TSS, BOD, dan COD secara berurutan adalah 150 mg/l, 90 mg/l, dan 200 mg/l)

Salah satu teknologi untuk mereduksi konsentrasi bahan pencemar dalam air limbah ialah menggunakan metode lahan basah buatan. metode ini merupakan pengolahan air limbah secara biologis dengan bantuan tumbuhan yang dapat dioperasikan dan diterapkan dengan cukup sederhana berupa media lahan basah yang telah ditanami dengan beberapa tanaman yang memiliki sifat mencerna berbagai jenis kandungan air limbah, sehingga metode ini dirasa cukup baik dalam mengelola air limbah.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh peneliti (Galuh, 2016) dalam penelitian pengelolaan air limbah rumah sakit dengan metode wetlands menghasilkan luaran berupa penurunan kadar air limbah BOD sebesar

51,93%, COD sebesar 61,90%, dan TSS sebesar 100%. Penurunan yang cukup signifikan pada air limbah rumah sakit namun belum diketahui keefektifannya untuk air limbah lainnya. Kelebihan dari teknologi metode ini ialah sangat mudah diterapkan dan dioperasikan serta tidak membutuhkan biaya besar, hanya perlu menyiapkan media konstruksi lahan basah dan tanaman air.

II. TINJAUAN PUSTAKA

a. Air limbah kopi olah basah

Air yang digunakan dalam pengolahan kopi meninggalkan unit pengolahan dengan tingkat polusi yang tinggi. Komponen utama pencemaran ini adalah bahan organik yang berasal dari proses penghilangan pulp dan lender. Sebagian besar bahan organik dalam air limbah tersebut sangat tahan terhadap penguraian, dengan nilai COD—jumlah oksigen yang diperlukan untuk menstabilkan bahan organik menggunakan oksidan kuat mencapai 80% dari total beban polusi, dan dapat mencapai nilai setinggi 50 g/L. Sementara itu, BOD jumlah oksigen yang diperlukan untuk proses dekomposisi biologis bahan organik dalam kondisi aerobik pada suhu dan waktu inkubasi standar—dari bahan organik yang dapat terurai secara hayati dapat mencapai hingga 20 g/L (Daryat et al, 2017).

Berdasarkan penelitian bersama yang telah dilakukan oleh Novita (2022), Persentase nilai efisiensi penurunan polutan air limbah pengolahan kopi pada perlakuan panjang akar eceng gondok 30 cm dengan penambahan aerasi yang diindikasikan oleh parameter kekeruhan, BOD, COD, NH₃-N, dan PO₄-P yaitu sebesar 89,19%; 75,80%; 75,69%; 76,73%; dan 64,99%. Pengolahan kopi secara basah menghasilkan air limbah yang menimbulkan masalah lingkungan. Umumnya, air limbah dari pengolahan kopi rakyat tidak diproses terlebih dahulu dan langsung dibuang ke badan air atau diserap ke dalam tanah. Peningkatan pembuangan limbah cair dan padat ke sungai semakin meningkatkan risiko pencemaran lingkungan perairan. Sekitar satu setengah bagian zat padat berubah menjadi zat padat terlarut, seperti kalsium, kalium, dan senyawa organik yang larut (Afandi et al., 2017). Proses pengupasan dan pencucian buah kopi menghasilkan banyak bahan organik dan padatan terlarut. Rasio BOD/COD yang termasuk dalam kategori biodegradable, serta proporsi padatan

yang mudah menguap (VSS), menunjukkan bahwa penanganan secara biologis dengan metode anaerobik adalah pilihan yang tepat. Pengolahan limbah cair dari proses kopi menggunakan digester anaerobik konvensional cukup mudah diterapkan dan juga menghasilkan biogas sebagai sumber energi. Kandungan makronutrien yang masih tinggi dalam efluen dari proses anaerobik memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali (Syarief et al., 2012).

b. Wetlands

Wetlands atau lahan basah adalah ekosistem yang digenangi air secara alami atau buatan, baik secara musiman maupun permanen, yang memiliki peran penting dalam lingkungan. Lahan basah alami meliputi rawa-rawa, padang rumput basah, dataran pasang surut, dataran banjir, dan lahan basah di sepanjang saluran sungai (Rito, 2017; Dewi 2019). Constructed Wetlands digunakan untuk mengolah limbah dan memperbaiki kualitas lingkungan menggunakan proses alami dengan melibatkan vegetasi tanaman, berupa media tanam dan mikroorganisme (Musarofa dkk, 2018; Maktoof dan Al-Enazi, 2020; Herazo dkk, 2023) dan lahan basah (Wetlands) lebih efektif dalam mengolah air limbah dibandingkan dengan metode fitoremediasi (Galuh dkk, 2024).

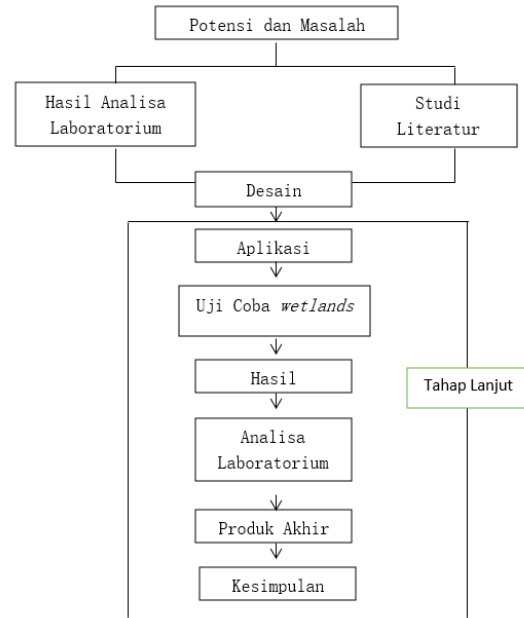
Pada dasarnya hampir seluruh tanaman yang ada mampu menyerap dan menurunkan kadar pencemar pada air limbah. Diantara beberapa jenis tanaman yang mampu menurunkan kadar air limbah dengan baik menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Kusumawardani dan Rony pada tahun 2013 yaitu jenis tanaman air Eceng Gondok, Semanggi, Melati air, Teratai api, Lembang atau rumput rawa, Daun Payung/Papyrus, dan Bambo air/ Paku ekor kuda. Tanaman cyperus papyrus dapat digunakan untuk menurunkan BOD dan COD pada air lindi di TPA Pakusari sebesar 76,09% dan 76,09% (Galuh dan Musarofa, 2024) sedangkan dalam penelitian Musarofa dkk (2018) tanaman Cyperus papyrus mampu menurunkan konsentrasi Konsentrasi TSS, BOD, Eschericia coliform sebesar 87%, 84% dan 63% pada limbah tangki septik dengan metode pengolahan constructed wetland. Pada penelitian lainnya Galuh dkk (2021) melakukan 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.

III. METODE

Prosedur Penelitian

Penelitian pengembangan model 4D terdiri dari empat tahapan. Tahapan yang harus dilaksanakan sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram alir topik penelitian

Diagram alir digambarkan memuat tahapan secara rinci dijelaskan sebagai berikut :

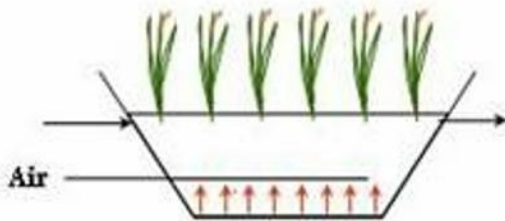
a. Potensi masalah

Tahap potensi masalah bertujuan untuk menganalisa kandungan air limbah kopi olah basah yang dihasilkan oleh tempat industri kopi olah basah. Tahap potensi masalah mencakup dua langkah pokok yaitu hasil analisis laboratorium terhadap air limbah kopi olah basah yang diambil dari 1 titik kawasan industri kopi olah basah Pakusari dan berbagai studi literatur terkait air limbah kopi olah basah dari kawasan industri kopi olah basah kawasan lainnya.

Studi literatur dilaksanakan guna mendapat informasi terkait air limbah kopi olah basah yang dihasilkan oleh kawasan industri kopi olah basah. Selain air limbah kopi olah basah, Studi literatur juga dilaksanakan untuk mendapatkan data hasil dari penelitian lainnya mengenai beragam jenis tanaman air yang dapat diaplikasikan pada wetlands.

b. Tahap desain

Tahap desain mulai merancang bentuk dan model wetlands yang akan dioperasikan. Desain dimulai dari analisa data hasil laboratorium dan studi literatur yang telah diperoleh, data dan informasi tersebut digunakan sebagai rangkain menyusun desain. Tahapan desain diantaranya : (a) menganalisis hasil laboratorium dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Permen LH No.5 2014, Baku Mutu Air limbah kopi olah basah bagi Usaha kopi olah basah; (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 dengan fitoteknologi (Gambar 3.2); (e) membuat model purwarupa sebagai miniatur desain.



Gambar 2. Desain konstruksi wetlands dengan sistem fitoteknologi

c. Tahap lanjut

Tahap lanjut ialah mewujudkan model purwarupa wetlands dengan sistem fitoteknologi. Langkah pada tahap lanjut yaitu mengaplikasikan proses yang akan digunakan sebagai sarana uji coba pengolahan air limbah kopi olah basah kawasan industri kopi olah basah. Setelah proses tersebut selesai diaplikasikan maka selanjutnya memasuki tahap uji coba, yang mana dalam tahap ini sample akan diuji menggunakan wetlands dan dilakukan monitoring dengan uji lab kandungan air limbah kopi. Dalam pengelolaan air limbah kopi olah basah di kawasan industri kopi olah basah sampah, parameter dari kelayakan desain tersebut mengacu kepada permen LHK Permen LH No.5 2014 tentang Baku Mutu Air limbah kopi olah basah bagi Usaha industry pengolahan kopi.

Table 1. Baku mutu air limbah bagi usaha atau kegiatan industry pengolahan kopi

LAMPIRAN XXV
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI PENGOLAHAN KOPI

Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (kg/ton produk)
TSS	150	4,5
BOD	90	2,7
COD	200	6
pH	6 – 9	
Kuantitas air limbah	30 m ³ /ton produk	

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

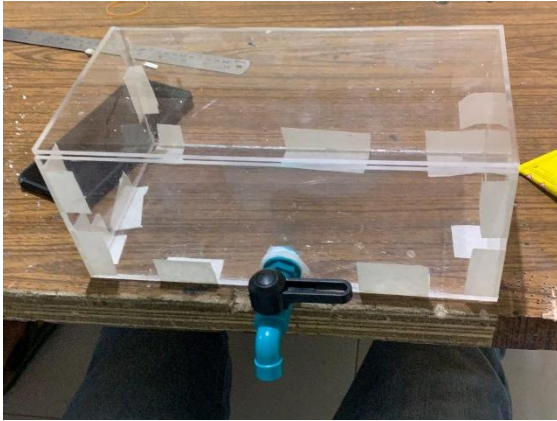
BALHASAR KAMBUAYA

Sumber: Permen LH N0.5 2014

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Fitoteknologi pada lahan basah buatan menggunakan media akar wangi sebagai pengelola polutan air limbah kopi olah basah merupakan sebuah inovasi yang menggabungkan teknologi dengan proses alami dalam pengolahan air limbah. Sistem ini dirancang dengan memanfaatkan kemampuan tanaman untuk menyerap polutan dalam air, menjadikannya alternatif yang efisien dan ramah lingkungan dalam menangani pencemaran yang dihasilkan oleh industri pengolahan kopi. Proyek ini menggunakan media akar wangi, yang dikenal memiliki kemampuan luar biasa dalam menyaring berbagai zat berbahaya, seperti logam berat dan senyawa organik yang terkandung dalam air limbah kopi olah basah. Sistem instalasi pengolahan air limbah ini mengaplikasikan metode konstruksi yang sederhana namun efektif, dengan prototype box acrylic yang berfungsi sebagai wadah aliran air limbah. Box ini dilengkapi dengan input dan output produk yang memungkinkan aliran air limbah untuk mengalir melalui media akar wangi yang terletak di dalamnya. Proses alami yang terjadi dalam sistem ini memungkinkan akar wangi untuk menyerap polutan dan mengubahnya menjadi nutrisi yang mendukung pertumbuhan tanaman itu sendiri. Dengan cara ini, sistem tidak hanya mengelola polutan secara efektif, tetapi juga menghasilkan tanaman yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut, baik untuk keperluan lingkungan maupun ekonomi. Selain itu, teknologi ini memberikan solusi berkelanjutan yang mengurangi dampak negatif limbah cair terhadap lingkungan, serta mendukung praktik ramah lingkungan dalam industri kopi yang terus berkembang. Dengan

integrasi teknologi yang sederhana dan prinsip ekologi alami, fitoteknologi ini menjadi pilihan inovatif dalam mengatasi masalah pencemaran air di kawasan industri kopi.



Gambar 4.1 Hasil produk penelitian

Tabel 2. Hasil analisis BOD laboratorium sebelum dan setelah fitoremediasi

Keterangan	Sebelum	Hari 3	Hari 5	Hari 7
Parameter	BOD	BOD	BOD	BOD
Metode	SNI 6989.72- 2009	SNI 6989.72- 2009	SNI 6989.72- 2009	SNI 6989.7 2-2009
Unit	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Hasil	162,7	53,3	40,0	33,3
Permen LH N0.5 2014	150	150	150	150

Fitoteknologi adalah cabang ilmu yang memanfaatkan tanaman atau bagian-bagian tanaman, seperti akar, daun, atau batang, untuk mengelola atau mengatasi masalah lingkungan, khususnya dalam pengolahan air limbah, pemulihan tanah tercemar, atau mitigasi polusi udara. Dalam fitoteknologi, tanaman digunakan sebagai agen biologis untuk menyerap, menguraikan, atau mengurangi polutan yang terkandung dalam air atau tanah. Salah satu contoh penerapannya adalah penggunaan tanaman untuk menyaring air limbah, mengurangi kadar bahan kimia berbahaya, atau meningkatkan kualitas tanah yang terkontaminasi. Fitoteknologi memanfaatkan proses alami yang terjadi di alam, seperti penyerapan, akumulasi, atau degradasi polutan, yang dapat berfungsi sebagai solusi ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk masalah

polusi. Salah satu media yang memiliki potensi besar dalam fitoteknologi adalah akar wangi, yang dikenal karena karakteristik akarnya yang panjang dan kuat. Akar panjang tanaman ini, selain memiliki fungsi alami dalam penyerapan air dan nutrisi, juga sering dimanfaatkan untuk mengurangi risiko longsor di daerah-daerah yang rawan bencana tersebut. Dalam konteks fitoteknologi, akar panjang ini diharapkan memiliki kemampuan lebih untuk menyerap polutan yang terkandung dalam air limbah dengan lebih efektif dan cepat. Hal ini disebabkan oleh luasnya permukaan akar yang dapat berinteraksi langsung dengan air, serta kemampuannya untuk menarik dan menyaring berbagai zat berbahaya, seperti logam berat, senyawa organik, dan zat kimia lainnya. Dengan demikian, penggunaan akar wangi dalam sistem pengolahan air limbah ini diyakini dapat meningkatkan efisiensi proses pengolahan, sekaligus memberikan solusi ramah lingkungan yang lebih berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menggali potensi akar wangi dalam fitoteknologi, dengan harapan dapat menawarkan metode baru yang lebih efektif dalam menangani pencemaran air dan mengurangi dampak negatif limbah industri terhadap lingkungan.

Luaran yang dicapai pada Monitoring dan Evaluasi (Monev Kemajuan) Penelitian Hibah Internal 2024 mencakup beberapa produk dan hasil yang signifikan dalam penelitian ini. Pertama, produk hardware berupa prototype box acrylic konstruksi lahan basah buatan yang telah dikembangkan, yang berfungsi sebagai media untuk pengolahan air limbah menggunakan tanaman. Box acrylic ini dirancang dengan struktur sederhana namun efektif, untuk mendukung aliran air limbah melalui media akar wangi, dengan tujuan menyaring polutan dari air limbah tersebut. Selain itu, hasil analisa laboratorium terhadap polutan dalam air limbah sebelum dan sesudah perlakuan pada media akar wangi akan dilaporkan secara rinci, menunjukkan perubahan konsentrasi polutan dan efektivitas sistem dalam mengurangi tingkat pencemaran. Data ini akan memberikan gambaran yang jelas mengenai kemampuan media akar wangi dalam menyerap dan mengolah polutan, yang merupakan inti dari penelitian ini. Selanjutnya, draft artikel penelitian yang berisi temuan-temuan dan analisa dari hasil penelitian ini juga disiapkan, dengan rencana untuk disubmit ke Jurnal Nasional Terakreditasi Sinta 5, yaitu Jurnal

Teknik Sipil Terapan. Artikel ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah yang berarti dalam bidang teknologi pengolahan air limbah berbasis tanaman, serta menjadi referensi bagi penelitian-penelitian serupa di masa depan.

V. KESIMPULAN

Hasil pengujian parameter BOD (Biochemical Oxygen Demand) menunjukkan adanya penurunan konsentrasi yang signifikan dari waktu ke waktu. Pada kondisi awal (sebelum perlakuan), nilai BOD tercatat sebesar 162,7 mg/L, yang melebihi baku mutu sesuai Permen LH No. 5 Tahun 2014 yaitu 150 mg/L. Namun, setelah dilakukan proses selama 3 hari, nilai BOD turun drastis menjadi 53,3 mg/L, kemudian menurun lebih lanjut pada hari ke-5 sebesar 40,0 mg/L, dan mencapai 33,3 mg/L pada hari ke-7. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa sistem yang diterapkan mampu meningkatkan kualitas air dengan efektif. Mulai hari ke-3 hingga hari ke-7, nilai BOD sudah berada jauh di bawah baku mutu yang dipersyaratkan, sehingga dapat disimpulkan bahwa metode ini berhasil menurunkan beban pencemar organik.

Dengan demikian, proses yang dilakukan tidak hanya menurunkan kadar BOD secara signifikan, tetapi juga menjamin kualitas air yang sesuai standar lingkungan dalam waktu relatif singkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Maktoof, A. A., & Al-Enazi, M. S. (2020). Use of two plants to remove pollutants in wastewater in constructed wetlands in southern Iraq. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(3), 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.06.002>
- Rezagama, A., Hadiwidodo, M., Purwono, P., Ramadhani, N. F., & Yustika, M. (2016). Penyisihan limbah organik air limbah kopi olah basah TPA Jatibarang menggunakan koagulasi-flokulasi kimia. *Teknik*, 37(2), 78–83. <https://doi.org/10.14710/teknik.v37i2.12647>
- Vien, B. H., Hadary, F., & Yurisinthae, E. (n.d.). Sistem monitoring pH tanah, suhu dan kelembaban tanah pada tanaman jagung berbasis Internet of Things (IoT). [Jurnal tidak disebutkan].
- Daryat, F., et al. (2017). Analisis kualitas air limbah kopi olah basah asal tempat pembuangan akhir sampah Kota Pekanbaru berdasarkan parameter biologi, fisika dan kimia. *Riau Biologia*, 2(1), 68–80. <https://ejournal.unri.ac.id/index.php/JRB/article/view/6096>
- Chuzaini, F., & Dzulkifli. (2022). IoT monitoring kualitas air dengan menggunakan sensor suhu, pH, dan total dissolved solids (TDS). *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, 11(3), 46–56.
- Adam, G. A. M., & Andari, G. S. B. (2015). Analisis pengaruh sifat fisik kimia sampah terhadap reduksi volume sampah dan karakteristik air limbah kopi olah basah pada bioreaktor landfill aerobik dan anaerobik (Tesis tidak dipublikasikan). Universitas Indonesia, Jakarta.
- Sartohadi, J., Widyastuti, M., & Lestari, I. S. (2005). Penyebaran airtanah bebas tercemar air limbah kopi olah basah di sekitar TPA Piyungan Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Forum Geografi*, 19(1), 16–29. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v19i1.4572>
- Herazo, L. C. S., Marín-Muñiz, J. L., Alvarado-Lassman, A., Zurita, F., Marín-Peña, O., & Sandoval-Herazo, M. (2023). 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*, 15(2280), 1–19. <https://doi.org/10.3390/w15122280>
- Musarofa, M., Radityaningrum, A. D., & Kusuma, M. N. (2018). Penurunan TSS, BOD, *Escherichia coli* pada limbah tangki septik menggunakan tanaman *Cyperus papyrus* pada pengolahan constructed wetland. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, 419–424.
- Dewi, N. R. (2019). Teknologi pengolahan lahan basah buatan untuk mengolah grey water dari rumah tangga. *INA-Rxiv*, 7(1), 1–6.
- Rohim, N., Sulistiono, S., & Yulianda, F. (2022). Aquatic environmental characteristic of Singkil Swamp Wildlife Reserve in Aceh Singkil Regency. *Depik*, 11(1), 7–15. <https://doi.org/10.13170/depik.11.1.22863>
- Galuh, S. D., Mirzatika, L., & Sujarwadi, R. (2021). Waste water treatment analysis of soybean industry using wetlands system. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2(7), 291–295.
- Galuh, S. D., & Musarofa. (2024). Fitoremediasi lindi TPA Pakusari Jember dengan tanaman *Cyperus papyrus* sebagai pengurai BOD dan COD. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 6(2), 13–20.
- Galuh, S. D., Kuryanto, T. D., Ahmad, H. H., & Fitriana, F. (2024). Comparison of wetlands and phytoremediation methods as treatment media for hospital wastewater. In *Proceedings of the 1st ICESDM 2023* (pp. 1–12). <https://doi.org/10.4108/eai.2-11-2023.2348008>