

PENGARUH WAKTU RETENSI TERHADAP SISTEM *CONSTRUCTED WETLAND* DALAM PENGOLAHAN AIR LINDI TPK SARIMUKTI

EFFECT OF RETENTION TIME ON CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM IN LEACHATE TREATMENT OF TPK SARIMUKTI

Muhammad Ilham Febrina Lontaan*, Sulistijorini, Lasya Fauzia Ahmad
Program Studi Teknik dan Manajemen Lingkungan, Sekolah Vokasi, IPB University

*febriantlontaan08@gmail.com, sulistijorini@gmail.com, lasyaufauziamd@gmail.com

INFO ARTIKEL

Diterima: 1 November 2025

Direvisi: 21 November 2025

Disetujui: 28 Januari 2026

ABSTRAK

Air lindi, cairan yang timbul dari penguraian sampah yang bercampur air hujan, mengandung berbagai senyawa berbahaya seperti organik, anorganik, dan logam berat beracun. Saat ini, konsentrasi BOD (*Biochemical oxygen demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), dan nitrogen total pada lindi dari TPA Sarimukti telah melampaui ambang batas standar kualitas, sehingga memerlukan penanganan lanjutan. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik air lindi, merancang sistem *constructed wetland*, serta membandingkan pengaruh variasi waktu retensi dan jenis tanaman rumput vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) dan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) terhadap penurunan BOD, COD, TSS, nitrogen total, kadmium, serta penetralan pH. Metode yang digunakan bersifat eksperimental dengan tiga perlakuan dan dua kali pengulangan (duplo). Hasil menunjukkan bahwa rumput vetiver paling efektif dalam menurunkan konsentrasi BOD, COD, TSS, nitrogen total, serta menstabilkan pH, terutama pada waktu retensi 6 dan 10 hari. Dengan demikian, sistem *constructed wetland* dapat menjadi alternatif pengolahan lanjutan untuk meningkatkan efektivitas pengolahan air lindi di TPK Sarimukti.

Kata Kunci:

Air lindi, *constructed wetland*, waktu retensi

ABSTRACT

Leachate, a liquid that arises from the decomposition of waste mixed with rainwater, contains various hazardous compounds such as organic, inorganic, and toxic heavy metals. Currently, the concentration of BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), and total nitrogen in leachate from the Sarimukti Landfill has exceeded the quality standard threshold, requiring further treatment. This study aims to identify the characteristics of leachate, design a *constructed wetland* system, and compare the effect of variations in retention time and plant types of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on reducing BOD, COD, TSS, total nitrogen, cadmium, and pH neutralization. The method used is experimental with three treatments and two repetitions (duplo). The results show that vetiver grass is most effective in reducing the concentration of BOD, COD, TSS, total nitrogen, and stabilizing pH, especially at retention times of 6 and 10 days. Thus, the *constructed wetland* system can be an alternative for further processing to increase the effectiveness of leachate processing at the Sarimukti TPK.

Keywords:

Constructed wetland, leachate, retention time

*Corresponding author: febriantlontaan08@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Perkembangan kota metropolitan meningkatkan volume sampah yang berakhir pada produksi air yang mencemari lingkungan jika tidak terkelola dengan baik. Kota Bandung memiliki TPK Sarimukti yang dilengkapi dengan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), namun beberapa parameter pencemar seperti BOD, COD, dan nitrogen total masih melebihi baku mutu lingkungan (Permen LHK No. 59/2016). *Constructed wetland* adalah teknologi pengolahan air limbah berbasis proses alami yang ramah lingkungan, murah, dan mudah dioperasikan, memadukan mekanisme fisik, kimia, dan biologi termasuk fitoremediasi dan bioremediasi [1]. Kajian terdahulu

mengindikasikan potensi tanaman air seperti *Typha angustifolia* untuk mengurangi polutan, sementara penelitian ini menggunakan tanaman rumput vetiver dan eceng gondok serta bakteri eksogen *Pseudomonas* sp., yang memiliki kemampuan fitoremediasi unggul [2]. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik air lindi TPK Sarimukti serta menganalisis pengaruh variasi waktu retensi dan jenis tanaman rumput vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) dan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) pada sistem *constructed wetland* terhadap penurunan parameter BOD, COD, TSS, nitrogen total, kadmium, dan penetralan pH.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini disusun untuk menjelaskan tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis, mulai dari penentuan lokasi dan periode penelitian, perancangan dan pengoperasian unit percobaan, hingga pengujian laboratorium dan analisis data. Uraian metode disajikan untuk memastikan penelitian dapat direplikasi serta kejelasan prosedur yang digunakan

A. Lokasi dan Periode Penelitian

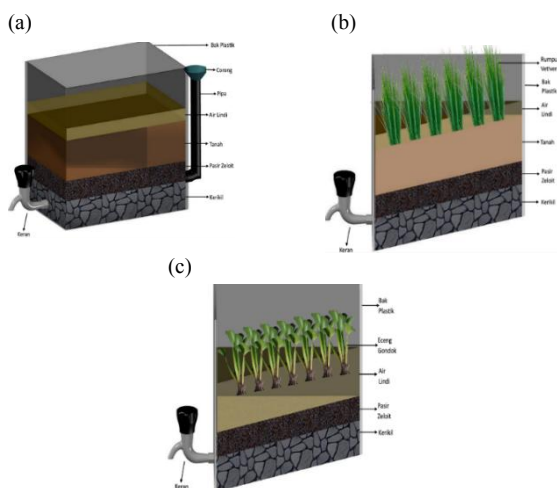
Penelitian ini dilaksanakan di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) TPK Sarimukti yang berlokasi di Desa Sarimukti, Kecamatan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat. Pengambilan sampel air lindi serta pelaksanaan percobaan dilakukan pada periode Oktober hingga Desember 2024.

B. Desain Percobaan dan Reaktor

Penelitian ini bersifat eksperimental dengan menggunakan reaktor *constructed wetland* skala prototipe. Reaktor dibuat dari *container* plastik dengan volume efektif sekitar 75 L. Media penyusun reaktor terdiri atas lapisan kerikil setebal 7 cm, pasir zeolit setebal 5 cm, dan tanah subur setebal 10 cm pada perlakuan yang menggunakan tanaman. Terdapat tiga perlakuan utama, yaitu:

- a. *constructed wetland* dengan tanaman vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) dan inokulasi *Pseudomonas* sp.
- b. *constructed wetland* dengan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan inokulasi *Pseudomonas* sp.
- c. kontrol berupa media tanpa tanaman dan tanpa bakteri.

Setiap perlakuan dilakukan sebanyak dua kali ulangan (duplo). Debit aliran dan volume reaktor diatur untuk memperoleh variasi waktu retensi hidraulik (*hydraulic retention time*, HRT) selama 1 hari, 6 hari, dan 10 hari. Desain prototipe reaktor dan variasi perlakuan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Fitoremediasi dengan sistem *constructed wetland* (a) desain *full prototype constructed wetland* (b) perlakuan rumput vetiver (c) perlakuan eceng gondok

C. Bahan dan Peralatan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi air lindi sebanyak 90 L yang diambil menggunakan metode *grab sampling* pada outlet IPAL TPK Sarimukti pada tanggal 17 Oktober 2024 pukul 10.08 WIB. Tanaman yang digunakan adalah rumput vetiver dan eceng gondok. Mikroorganisme yang digunakan berupa kultur cair *Pseudomonas* sp. yang diperoleh dari BRIN Cisitau.

Peralatan utama yang digunakan meliputi reaktor *constructed wetland*, media kerikil, pasir zeolit, tanah subur, aerator, serta botol sampel berkapasitas 500 mL.

D. Perhitungan Waktu Retensi Hidraulik

Waktu retensi hidraulik (*hydraulic retention time*, HRT) dihitung menggunakan persamaan menurut Tazkiaturrizki *et al* [3] sebagai berikut:

$$t = \frac{V}{Q} \tag{1}$$

dengan:

t = waktu retensi (hari)

V = volume reaktor (m³)

Q = debit aliran (m³/hari)

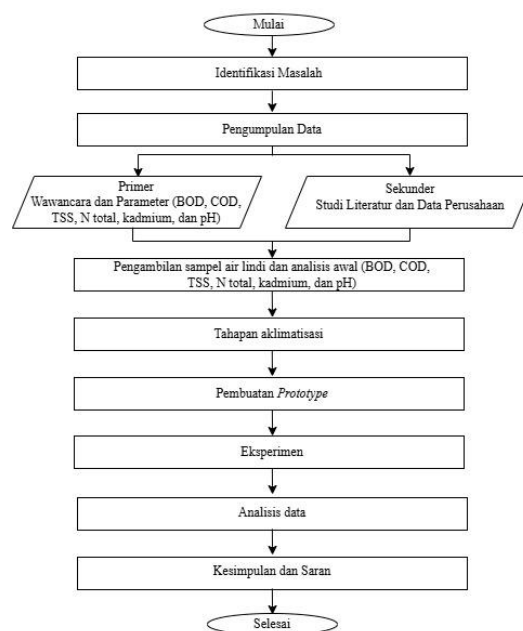
Sebagai contoh perhitungan, untuk volume reaktor sebesar 0,102 m³ dan debit aliran sebesar 0,110736 m³/hari, diperoleh nilai HRT sebagai berikut:

$$t = \frac{0,102}{0,110736} = 0,92 \text{ hari} \tag{2}$$

Nilai tersebut kemudian dibulatkan menjadi 1 hari.

E. Prosedur Kerja

Tahapan penelitian secara lengkap pengolahan air lindi menggunakan tanaman rumput vetiver dan eceng gondok yang diinokulasikan bakteri *Pseudomonas* sp dengan sistem *constructed wetland* disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Bagan alir penelitian

F. Pengujian Laboratorium dan Analisis Data

Parameter kualitas air yang dianalisis meliputi pH, *biochemical oxygen demand* (BOD), *chemical oxygen demand* (COD), *total suspended solids* (TSS), total nitrogen, dan logam berat kadmium (Cd). Analisis data dilakukan secara statistik deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata dan deviasi standar. Efektivitas penurunan masing-masing parameter dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Efektivitas} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, C_0 merupakan konsentrasi awal dan C_t merupakan konsentrasi akhir parameter. Kriteria efektivitas penurunan mengacu pada Soeparman dan Suparmin, yaitu: sangat efektif (>80%), efektif (60–80%), cukup efektif (40–60%), kurang efektif (20–40%), dan tidak efektif ($\leq 20\%$).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Awal Air Lindi (*Inlet dan Outlet* IPAL)

Hasil uji kualitas air lindi pada inlet dan outlet TPK Sarimukti menunjukkan bahwa parameter pH, TSS, dan kadmium telah memenuhi baku mutu. Sebaliknya, meskipun terjadi penurunan, konsentrasi BOD, COD, dan nitrogen total pada *outlet* masih melampaui ambang batas, masing-masing sebesar 200 mg/L, 1068 mg/L, dan 1190 mg/L (Tabel I).

Tabel I
EFEKTIVITAS PENGOLAHAN AIR LINDI IPAL TPK SARIMUKTI

Parameter	Satuan	Baku mutu	Inlet	Outlet	Efektivitas IPAL (%)
pH	-	6-9	8.2	7.4	-
BOD	mg/L	≤ 150	*320	*200	37.50
COD	mg/L	≤ 300	*3251	*1068	67.15
TSS	mg/L	≤ 100	75	36	52
N total	mg/L	≤ 60	*2030	*1190	41.38
Kadmium	mg/L	≤ 0.1	0.01	0.02	-50

Keterangan: Tanda * Melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 mengenai Standar Kualitas Lindi untuk Kegiatan dan/atau Usaha Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah.

Hasil pengujian kualitas air lindi pada kolam *inlet* dan *outlet* IPAL TPK Sarimukti menunjukkan bahwa parameter pH, TSS, dan kadmium telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri LHK RI No. 59 Tahun 2016. Nilai pH pada *inlet* dan *outlet* berada pada kisaran aman, menunjukkan kondisi yang relatif stabil terhadap pelepasan ke badan air penerima (Tabel I).

Sebaliknya, parameter BOD, COD, dan nitrogen total masih melebihi baku mutu meskipun terjadi penurunan konsentrasi pada *outlet*. Nilai BOD menurun dari 320 mg/L menjadi 200 mg/L dengan efektivitas pengolahan sebesar 37,50% yang tergolong kurang efektif. Nilai COD

mengalami penurunan signifikan dari 3251 mg/L menjadi 1068 mg/L dengan efektivitas sebesar 67,15% dan dikategorikan efektif, namun masih melampaui ambang batas yang ditetapkan. Sementara itu, konsentrasi nitrogen total menurun dari 2030 mg/L menjadi 1190 mg/L dengan efektivitas sebesar 41,38% yang tergolong cukup efektif. Tingginya konsentrasi BOD, COD, dan nitrogen total dipengaruhi oleh kandungan bahan organik yang tinggi serta proses degradasi limbah organik pada area TPA [4].

Parameter TSS menunjukkan penurunan dari 75 mg/L pada *inlet* menjadi 36 mg/L pada *outlet* dengan efektivitas sebesar 52% dan dikategorikan cukup efektif. Namun demikian, terjadi peningkatan konsentrasi kadmium dari 0,01 mg/L menjadi 0,02 mg/L dengan efektivitas negatif sebesar -50%, yang mengindikasikan kegagalan pengolahan untuk parameter tersebut. Peningkatan kandungan kadmium diduga dipengaruhi oleh kondisi pH air lindi yang memengaruhi kelarutan logam berat. Berdasarkan hasil tersebut, diperlukan optimalisasi proses pengolahan IPAL TPK Sarimukti agar seluruh parameter memenuhi baku mutu yang berlaku [5].

B. Pengolahan dengan *Constructed Wetland*

Dibawah ini merupakan hasil pengujian masing-masing parameter air lindi setelah dilakukan pengolahan menggunakan *constructed wetland* dengan variasi waktu retensi.

1. Pengolahan dengan Waktu Retensi 1 Hari

Hasil pengujian terhadap masing-masing parameter kualitas air lindi setelah dilakukan proses pengolahan menunjukkan adanya penurunan konsentrasi beberapa polutan utama. Pengolahan ini bertujuan untuk menetralkan pH dan menurunkan kandungan BOD, COD, TSS, nitrogen total, dan kadmium, sehingga air lindi yang dihasilkan memenuhi baku mutu lingkungan yang berlaku. Data tersebut menggambarkan efektivitas sistem *constructed wetland* dalam mengurangi konsentrasi polutan serta memperlihatkan perubahan nilai parameter sebelum dan sesudah proses pengolahan (Tabel II).

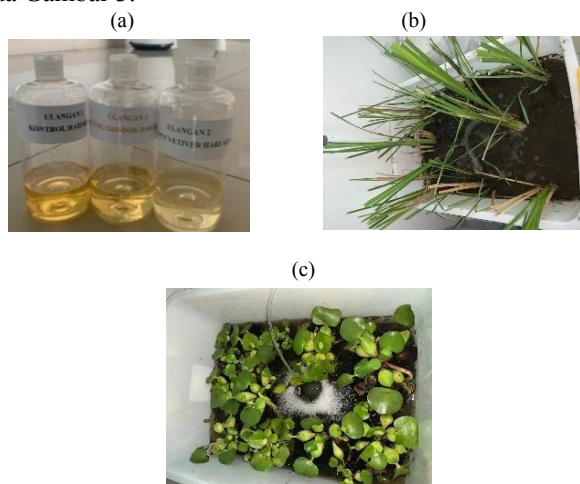
Tabel II
HASIL PENGOLAHAN AIR LINDI DENGAN WAKTU RETENSI 1 HARI

Parameter	Vetiver	Eceng gondok	Kontrol
pH	7.4±0.14	7.75±0.35	7.45±0.21
BOD (mg/L)	54.05±63.57	80.5±95.46	*152±118.79
COD (mg/L)	*555.5±350.02	*679±340.83	*879±555.79
TSS (mg/L)	49±50.91	9.15±0.21	9.35±0.92
N total (mg/L)	*1678.5±118.09	*2171.5±289.21	*2539±490.73
Kadmium (mg/L)	0.007±0	0.007±0	0.007±0

Keterangan: Tanda * Melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 mengenai

Standar Kualitas Lindi untuk Kegiatan dan/atau Usaha Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah. Nilai pada kolom hasil pengolahan *constructed wetland* disajikan dalam format rata-rata \pm standar deviasi.

Hasil pengolahan air lindi dengan sistem *constructed wetland* dengan waktu tinggal (retensi) 1 hari disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Hasil pengolahan *constructed wetland* dengan waktu retensi 1 hari (a) sampel air lindi (b) rumput vetiver pada reaktor *constructed wetland* (c) eceng gondok pada reaktor *constructed wetland*

Berdasarkan Tabel II hasil pengolahan menggunakan *constructed wetland*, nilai pH yang dihasilkan pada perlakuan rumput vetiver, eceng gondok, dan kontrol menunjukkan bahwa nilai pH tetap stabil di kisaran 7,4 hingga 7,75. Hal tersebut disebabkan karena tumbuhan dapat meningkatkan atau menjaga pH air tetap stabil dengan menyerap senyawa kimia organik dan anorganik melalui proses kimiawi lingkungan. Hal tersebut juga sejalan dengan riset [6], penurunan nilai pH juga disebabkan oleh media pada *constructed wetland* yaitu pasir zeolit dan kerikil.

Pada parameter BOD, rumput vetiver berhasil menurunkan nilai BOD dari 200 mg/l hingga 54,05 mg/l yang merupakan penurunan tertinggi untuk parameter BOD pada waktu retensi 1 hari. Eceng gondok menunjukkan penurunan BOD menjadi 80,5 mg/l, sedangkan kontrol hanya mengalami penurunan menjadi 152 mg/l. Penurunan kadar BOD di perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok diakibatkan karena kedua tanaman tersebut memiliki potensi menyerap zat hara, zat organik dan kimia lain dari air lindi dengan konsentrasi yang tinggi [7]. Selain dari kemampuan kedua tanaman tersebut dalam menyerap kadar polutan dalam air lindi, penambahan bakteri *Pseudomonas sp.* dan aerator sebagai penyuplai oksigen terlarut (DO) ke dalam reaktor agar terjadinya proses pendegradasian senyawa organik dan anorganik dalam air lindi juga berpengaruh terhadap penurunan nilai BOD [8].

Pada parameter COD, perlakuan dengan rumput vetiver menunjukkan hasil paling signifikan, yaitu penurunan dari 1068 mg/l hingga 555,5 mg/l. Selanjutnya, eceng gondok menghasilkan penurunan hingga 679 mg/l,

sedangkan perlakuan kontrol hanya menurun hingga 879 mg/l. Penurunan kadar COD pada perlakuan dengan tanaman vetiver dan eceng gondok disebabkan oleh peran akar tanaman yang mampu menyerap zat pencemar serta mendukung aktivitas bakteri pengurai. Kehadiran bakteri *Pseudomonas sp.* dan mikroorganisme yang hidup di sekitar perakaran tanaman berkontribusi dalam menurunkan beban pencemar dalam air limbah [9]. Selain itu, proses sedimentasi dan penangkapan bahan organik di celah-celah antara pasir zeolit dan kerikil juga turut membantu penurunan nilai COD [10].

Pada parameter TSS eceng gondok menunjukkan hasil terbaik. Eceng gondok berhasil menurunkan nilai TSS dari 36 mg/l hingga 9,15 mg/l, sedangkan kontrol juga cukup baik karena menunjukkan penurunan nilai TSS menjadi 9,35 mg/l. Sebaliknya, TSS pada rumput vetiver justru mengalami peningkatan nilai menjadi 49 mg/l. Penurunan nilai TSS pada eceng gondok dan kontrol diakibatkan karena adanya penyaringan oleh pasir zeolit dan kerikil. Pasir zeolit memiliki kemampuan untuk memfilter padatan yang berukuran kecil dan kerikil untuk memfilter padatan yang berukuran besar dan padatan sisa yang terlarut didalam air lindi [11]. Selain proses penyaringan oleh pasir zeolit dan kerikil, tanaman juga berperan dalam penurunan nilai TSS pada pengolahan *constructed wetland*.

Selain itu, proses sedimentasi juga membutuhkan waktu retensi yang cukup agar partikel-partikel yang mengandung bahan organik dapat mengalami penurunan [12] (Pramesti dan Mirwan 2023). Pada perlakuan rumput vetiver, terdapat media tambahan berupa tanah. Karena pada dasarnya rumput vetiver bukan merupakan tanaman air, sehingga agar tetap hidup hanya akar rumput vetiver saja yang terendam oleh air, sementara bagian atasnya tetap berada di udara. Ketika air lindi dialirkan pada reaktor, air lindi akan bercampur dengan tanah. Tercampurnya air lindi dengan tanah dapat menyebabkan partikel-partikel tanah yang halus seperti lumpur, pasir halus, atau bahan organik lepas ke dalam air. Partikel tersebut akan meningkatkan nilai TSS karena kandungan suspensi dalam air menjadi lebih tinggi.

Hasil uji parameter N total, semua perlakuan mengalami peningkatan. Kontrol menunjukkan kenaikan nilai N total terburuk dari 1190 mg/l menjadi 2539 mg/l, diikuti eceng gondok yang menunjukkan peningkatan nilai N total menjadi 2171,5 mg/l dan rumput vetiver mengalami peningkatan nilai N total menjadi 1678,5 mg/l. Peningkatan nilai N total pada perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok disebabkan oleh penambahan bakteri *Pseudomonas sp.* dengan kultur cair. Media yang digunakan untuk menumbuhkan bakteri *Pseudomonas sp.* adalah MHB (*Mueller Hinton Broth*) yang mengandung *beef extract* yang kaya akan nitrogen sehingga saat kultur cair ditambahkan ke reaktor, nitrogen dari media turut meningkatkan N total, terutama pada hari pertama.

Pada hari pertama, sistem *constructed wetland* belum optimal dalam menurunkan nilai N total, karena belum sepenuhnya beradaptasi dengan keberadaan bakteri

tambahan yaitu *Pseudomonas sp.* Proses-proses penghilangan nitrogen seperti penyerapan oleh tanaman atau nitrifikasi belum bekerja secara maksimal, sehingga nitrogen yang dihasilkan oleh aktivitas bakteri terakumulasi dalam air [13]. Selain dari penambahan bakteri *Pseudomonas sp.*, peningkatan nilai nitrogen dapat terjadi akibat adanya pelepasan nitrogen dari limbah organik, karena air lindi TPK Sarimukti mengandung limbah organik dengan kandungan nitrogen yang tinggi, seperti sisa makanan, kotoran hewan, atau limbah organik lainnya. Degradasi limbah ini terjadi melalui proses biokimiawi dan menghasilkan senyawa nitrogen yang larut dalam air.

Kadmium pada ketiga perlakuan memiliki nilai yang sama, yaitu berhasil menurunkan nilai kadmium dari 0,02 mg/l menjadi 0,007 mg/l. Mekanisme penyerapan kadmium oleh rumput vetiver dipengaruhi oleh proses evapotranspirasi. Kadmium akan terserap pada jaringan akar bersamaan dengan masuknya air yang kemudian di translokasikan ke bagian tajuk melalui jaringan xilem dan akhirnya di akumulasi pada jaringan daun [14].

Eceng gondok memiliki kemampuan luar biasa untuk mengikat kadmium berkat sistem akar serabutnya yang lebat. Proses penyerapan kadmium oleh eceng gondok melibatkan beberapa tahapan. Pertama, akar eceng gondok yang menyerupai bulu halus berbentuk labirin bertindak sebagai saringan alami, menjebak dan mengumpulkan bahan organik serta partikel yang menempel. Selanjutnya, mikroorganisme yang hidup di permukaan akar berperan penting dalam mendekomposisi bahan organik dan partikel yang telah terkumpul tersebut. Selain itu, mikroorganisme ini juga mampu melakukan proses reduksi logam berat, mengubahnya menjadi kompleks ion logam berat yang tidak lagi bersifat toksik [15]. Parameter pada perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok dengan waktu retensi 1 hari yang melebihi batas baku mutu yaitu COD dan N total, sedangkan pada perlakuan kontrol parameter yang melebihi batas baku mutu yaitu BOD, COD, dan N total.

2. Pengolahan dengan Waktu Retensi 6 Hari

Hasil pengujian terhadap masing-masing parameter kualitas air lindi setelah dilakukan proses pengolahan menunjukkan adanya penurunan konsentrasi beberapa polutan utama (Tabel III). Pengolahan ini bertujuan untuk menetralkan pH dan menurunkan kandungan BOD, COD, TSS, nitrogen total, dan kadmium, sehingga air lindi yang dihasilkan memenuhi baku mutu lingkungan yang berlaku.

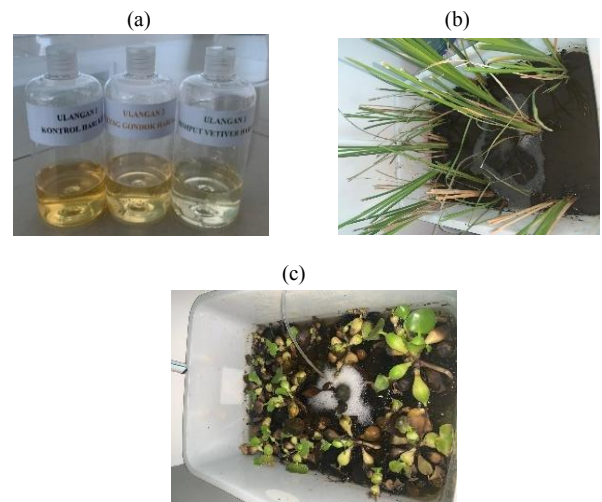
Tabel III
HASIL PENGOLAHAN AIR LINDI DENGAN WAKTU RETENSI 6 HARI

Parameter	Vetiver	Eceng gondok	Kontrol
pH	7.6±0	7.8±0.14	7.5±0.14
BOD (mg/L)	127.5±119.50	*212±152.74	*259.5±173.24
COD (mg/L)	*415±357.80	*763±388.91	*926±557.20
TSS (mg/L)	2.5±0.71	3±1.41	4.5±2.12

N total (mg/L)	*204.5±241.12	*412.5±202.94	*482±271.53
Kadmium (mg/L)	0.012±0.01	0.017±0.01	0.017±0.01

Keterangan: Tanda * Melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 mengenai Standar Kualitas Lindi untuk Kegiatan dan/atau Usaha Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah. Nilai pada kolom hasil pengolahan *constructed wetland* disajikan dalam format rata-rata ± standar deviasi.

Hasil pengolahan air lindi dengan sistem *constructed wetland* dengan waktu tinggal (retensi) 6 hari disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Hasil pengolahan *constructed wetland* dengan waktu retensi 6 hari (a) sampel air lindi (b) rumput vetiver pada reaktor *constructed wetland* (c) eceng gondok pada reaktor *constructed wetland*

Berdasarkan Tabel III hasil pengolahan menggunakan *constructed wetland*, nilai pH yang dihasilkan pada perlakuan rumput vetiver, eceng gondok, dan kontrol masih tetap stabil, yaitu berada di kisaran 7,5 hingga 7,8. Nilai pH tetap stabil karena tanaman sudah memiliki cukup waktu untuk beradaptasi dan menyerap polutan yang ada pada air lindi. Durasi paparan tanaman terhadap air limbah yang lebih lama mendorong perluasan akar, yang meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap zat kimia dan menormalkan pH air [16].

Pada parameter BOD rumput vetiver berhasil menurunkan nilai dari 200 mg/l hingga 127,5 mg/l yang merupakan penurunan terbesar untuk parameter BOD pada waktu retensi 6 hari, sedangkan pada eceng gondok justru mengalami kenaikan nilai BOD menjadi 212 mg/l, dan kontrol mengalami kenaikan nilai BOD lebih tinggi lagi sebesar 259,5 mg/l. Ketiga perlakuan mempunyai kadar BOD yang lebih besar bila dibandingkan pada perlakuan waktu retensi 1 hari. Kurang efektifnya dalam menurunkan nilai BOD dan peningkatan nilai BOD yang terjadi dapat disebabkan ketika bahan organik yang mudah terurai contohnya seperti gula sederhana dan karbohidrat sudah terurai habis oleh bakteri *Pseudomonas sp.*, selanjutnya

senyawa kompleks seperti karbohidrat kompleks akan mulai terdegradasi secara perlahan. Proses ini menghasilkan senyawa perantara yang meningkatkan kebutuhan oksigen, sehingga nilai BOD meningkat [17].

Pada pengujian parameter COD, rumput vetiver menunjukkan kinerja terbaik dengan penurunan signifikan dari 1068 mg/l hingga 415 mg/l. Sementara itu, eceng gondok juga efektif, menurunkan kadar COD menjadi 763 mg/l. Sebagai perbandingan, kelompok kontrol hanya mengalami penurunan hingga 926 mg/l. Penurunan nilai COD yang terlihat pada perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok disebabkan oleh penyerapan polutan oleh akar tanaman serta bantuan penguraian yang dilakukan oleh bakteri. Bakteri yang berkoloni di akar tanaman ini berperan penting dalam mengurangi konsentrasi bahan pencemar di air limbah, sehingga berkontribusi pada penurunan kadar COD yang lebih besar [9].

Penurunan kadar bahan organik terjadi karena air lindi telah teroksidasi, terdegradasi, dan terserap oleh rumput vetiver, eceng gondok, dan bakteri *Pseudomonas sp.* yang ditambahkan pada 2 perlakuan tersebut [10]. Sedangkan pada perlakuan kontrol tidak memakai tumbuhan dan tidak ditambahkan bakteri *Pseudomonas sp.*, hanya pasir zeolit dan kerikil. Sehingga dalam penurunan nilai COD tidak seefektif perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok.

Pada parameter TSS, rumput vetiver juga menunjukkan hasil terbaik dengan penurunan dari 36 mg/l hingga 2,5 mg/l, diikuti dengan eceng gondok yang berhasil menurunkan nilai TSS tidak jauh berbeda dengan rumput vetiver sebesar 3 mg/l. Kontrol juga mampu menurunkan nilai TSS dengan baik menjadi 4,5 mg/l. Penurunan TSS dalam air lindi berbanding lurus dengan waktu retensi. Ini karena proses sedimentasi membutuhkan waktu yang cukup agar semua material yang mengandung bahan organik dapat mengendap dan berkurang. Dengan kata lain, semakin lama air lindi berinteraksi dengan tanaman, kadar TSS akan semakin menurun [18]. Hal tersebut sesuai dengan perlakuan rumput vetiver, eceng gondok, dan kontrol dengan waktu retensi 6 hari yang memiliki nilai TSS lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok dengan waktu retensi 1 hari.

Rumput vetiver kembali menunjukkan hasil terbaik pada parameter N total dengan penurunan dari 1190 mg/l menjadi 204,5 mg/l, sedangkan eceng gondok berhasil menurunkan nilai N total menjadi 412,5 mg/l dan nilai N total perlakuan kontrol turun menjadi 482 mg/l. Penurunan nilai N total pada perlakuan menggunakan rumput vetiver dan eceng gondok terjadi berkat kolaborasi antara tanaman dan mikroorganisme yang berada di dalam reaktor. Saat tanaman menyerap air, mikroorganisme turut berperan dalam proses penyerapan ini. Mikroorganisme mengubah partikel N total menjadi sumber energi atau karbon, yang kemudian dimanfaatkan untuk produksi biomassa oleh mikroorganisme. Selain itu, proses ini juga menghasilkan oksigen yang membantu mengurangi kadar nitrogen dalam air lindi [12]. Pada perlakuan kontrol penurunan nilai N total terjadi karena adanya proses sedimentasi dan

penangkapan kadar bahan organik pada ruang yang terbentuk di antara pasir zeolit dan kerikil [10]. Pasir zeolit dan kerikil dapat membantu mengurangi nilai N total, namun lebih baik bila dikombinasikan dengan sistem pengolahan lainnya seperti menggunakan tanaman atau bakteri.

Pada parameter kadmium, efektivitas tertinggi juga terjadi pada rumput vetiver dengan penurunan nilai 0,02 mg/l hingga 0,012 mg/l, sedangkan pada eceng gondok dan kontrol hanya 0,017 mg/l. Penurunan nilai kadmium di rumput vetiver dan eceng gondok disebabkan adanya mekanisme penyerapan kadmium oleh tanaman dipengaruhi oleh proses evapotranspirasi. Kadmium akan terserap pada jaringan akar bersamaan dengan masuknya air yang kemudian di translokasikan ke bagian tajuk melalui jaringan xilem dan akhirnya di akumulasi pada jaringan daun [14].

Tanaman yang digunakan dalam fitoremediasi dapat mengalami toksisitas. Gejala seperti daun yang keriput atau berparut mengindikasikan gangguan pada proses fisiologis tanaman, yang pada gilirannya menurunkan kemampuannya dalam menyerap logam berat secara signifikan [19]. Merujuk pada pengujian dengan waktu retensi 6 hari, parameter BOD, COD, dan nitrogen total pada perlakuan eceng gondok dan kontrol masih melampaui batas baku mutu. Sementara itu, pada perlakuan rumput vetiver, hanya parameter COD dan Nitrogen total yang melebihi standar kualitas yang ditetapkan.

3. Pengolahan dengan Waktu Retensi 10 Hari

Hasil pengujian terhadap masing-masing parameter air lindi setelah proses pengolahan menunjukkan adanya penurunan konsentrasi beberapa polutan utama. Pengolahan ini bertujuan untuk menetralkan pH dan menurunkan kandungan BOD, COD, TSS, nitrogen total, dan kadmium, sehingga air lindi yang dihasilkan memenuhi baku mutu lingkungan yang berlaku. Data tersebut menggambarkan efektivitas sistem constructed wetland dalam mengurangi konsentrasi polutan serta memperlihatkan perubahan nilai parameter sebelum dan sesudah proses pengolahan (Tabel IV).

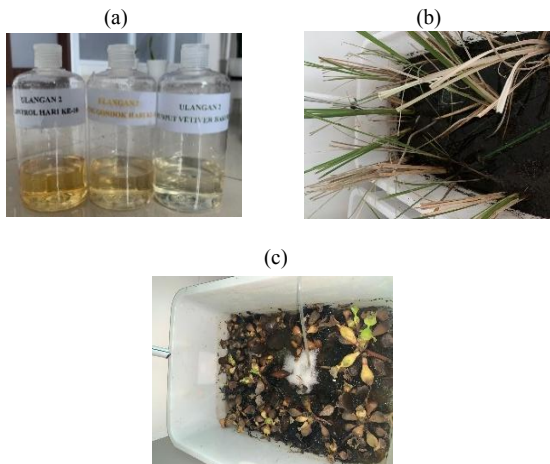
Tabel IV
HASIL PENGOLAHAN AIR LINDI DENGAN WAKTU RETENSI 10 HARI

Parameter	Vetiver	Eceng gondok	Kontrol
pH	7.55±0.35	7.25±0.21	7.35±0.21
BOD (mg/L)	54.65±38.68	135.5±0.71	*155±16.97
COD (mg/L)	288.75±291.68	*500.35±385.59	*731.5±461.74
TSS (mg/L)	6.3±4.10	16±14.14	6.9±4.95
N total (mg/L)	*272.25±367.34	*775±705.69	*873.4±1045.95
Kadmium (mg/L)	0.03±0.03	0.029±0.03	0.029±0.03

Keterangan: Tanda * Melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor

P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 mengenai Standar Kualitas Lindi untuk Kegiatan dan/atau Usaha Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Sampah. Nilai pada kolom hasil pengolahan *constructed wetland* disajikan dalam format rata-rata \pm standar deviasi.

Hasil pengolahan air lindi dengan sistem *constructed wetland* dengan waktu tinggal (retensi) 10 hari disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5 Hasil pengolahan *constructed wetland* dengan waktu retensi 10 hari (a) sampel air lindi (b) rumput vetiver pada reaktor *constructed wetland* (c) eceng gondok pada reaktor *constructed wetland*

Berdasarkan Tabel IV hasil pengolahan menggunakan *constructed wetland*, nilai pH yang dihasilkan pada perlakuan rumput vetiver, eceng gondok, dan kontrol tetap stabil, yaitu berada di kisaran 7,25 hingga 7,55. Sama seperti pengolahan dengan waktu retensi 1 hari dan 6 hari, nilai pH tetap pada kondisi netral karena tanaman sudah memiliki cukup waktu untuk beradaptasi dan menyerap polutan yang ada pada air lindi. Selain itu proses hidrolisis zeolit telah diamati dalam penelitian terdahulu, ketika peningkatan secara mendadak dalam nilai pH, hal tersebut sering terjadi pada tahap awal proses hidrolisis. Diiikuti dengan penstabilan nilai pH saat sistem zeolit air mencapai kesetimbangan [16]. Berdasarkan hasil pengolahan dan penelitian terdahulu, nilai pH akan menjadi netral apabila tanaman dan media sudah memiliki cukup waktu untuk beradaptasi dan mencapai titik kesetimbangan.

Pada parameter BOD, rumput vetiver menunjukkan penurunan tertinggi dari 200 mg/l menjadi 54,65 mg/l, diikuti eceng gondok 135,5 mg/l dan kontrol 155 mg/l. Setelah terjadi kenaikan nilai BOD yang terjadi pada pengolahan dengan waktu retensi 6 hari yang disebabkan oleh mulai terdegradasi secara perlahan senyawa kompleks oleh mikroorganisme menghasilkan senyawa perantara. Pada pengolahan dengan waktu retensi 10 hari pada perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok terdapat kemungkinan senyawa perantara yang terbentuk sebelumnya mulai terdegradasi lebih lanjut oleh mikroorganisme yang telah beradaptasi, menyebabkan nilai BOD kembali menurun.

Akar tanaman tidak hanya berfungsi sebagai penopang, tetapi juga meningkatkan proses dekomposisi

bahan organik, yang pada gilirannya menurunkan nilai COD dan BOD dalam air lindi. Selain memanfaatkan tanaman, penambahan bakteri juga terbukti efektif dalam mengurangi kadar bahan organik. Sebagai contoh, studi menunjukkan bahwa penambahan bakteri seperti *Pseudomonas sp.* berperan penting dalam proses ini. Bahan organik yang melekat pada akar tanaman akan diuraikan oleh bakteri yang ada di sana. Penurunan kadar bahan organik ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk keberadaan mikroba di akar tanaman. Mikroba ini memanfaatkan bahan organik sebagai sumber nutrisi untuk aktivitas dan pertumbuhannya, serta sebagai sumber karbon dan energi [9].

Parameter COD menurun drastis pada rumput vetiver dari 1068 mg/l menjadi 288,75 mg/l, diikuti eceng gondok yang berhasil menurunkan nilai COD menjadi 500,35 mg/l dan kontrol yang mampu menurunkan nilai COD menjadi 731,5 mg/l. Efisiensi penurunan konsentrasi COD berkorelasi erat dengan lamanya waktu retensi. Dalam studi ini, pengolahan air lindi dilakukan selama 10 hari tanpa penambahan air lindi baru, dan hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi seiring bertambahnya durasi pengolahan [9]. Sesuai dengan penjelesan tersebut, penurunan nilai konsentrasi pada hari ke-10 merupakan penurunan yang paling signifikan, bila dibandingkan dengan waktu retensi 1 hari dan 6 hari.

Fluktuasi nilai COD dapat dipicu oleh eksudat tanaman yang menambah bahan organik mudah terurai dalam air. Eksudat akar juga merangsang aktivitas mikroorganisme di zona perakaran dengan menyediakan nutrisi, yang turut memengaruhi kadar COD. Eksudat memiliki komponen yang terdiri dari asam amino, asam organik, polisakarida dan substansi organik lainnya. Eksudat dapat dihasilkan dari tumbuhan dan mikroorganisme. Eksudat dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai tempat pelekatan [20].

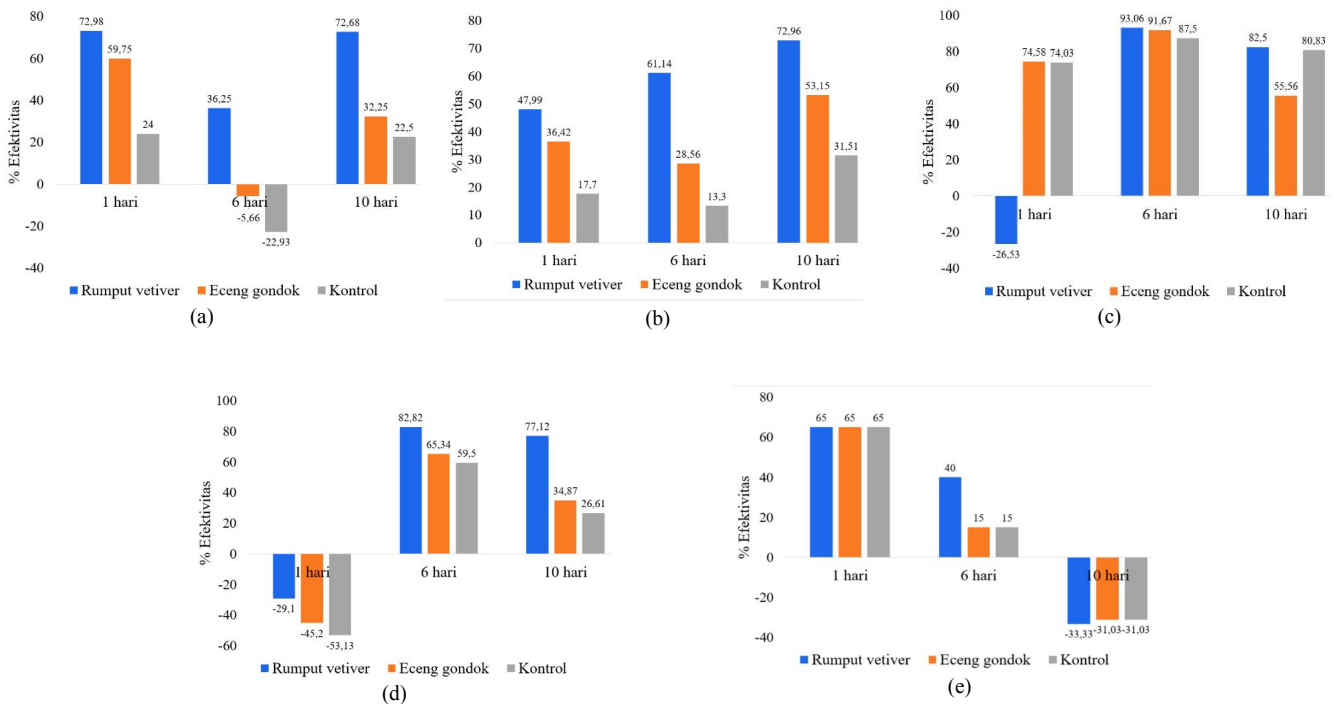
Pada parameter TSS, rumput vetiver menunjukkan hasil terbaik dengan penyisihan nilai dari 36 mg/l hingga 6,3 mg/l, nilai TSS pada kontrol turun menjadi 6,9 mg/l, dan nilai TSS pada eceng gondok turun menjadi 16 mg/l. Ketiga perlakuan memiliki nilai TSS yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan perlakuan waktu retensi 6 hari. Terjadinya peningkatan nilai pada perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok pada hari ke-10, dikarenakan rumput vetiver dan eceng gondok yang sudah layu dan mati, menyebabkan fungsi akar pada rumput vetiver dan eceng gondok menjadi tidak optimal.

Peningkatan konsentrasi TSS pada perlakuan yang menggunakan rumput vetiver dan eceng gondok dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Utama di antaranya adalah penambahan zat padat tersuspensi dalam air lindi, yang dipengaruhi oleh proses dekomposisi akar tanaman itu sendiri. Selain itu, debu dari udara ke dalam air lindi, serta masuknya serangga yang tidak teramati, juga berkontribusi pada peningkatan padatan tersuspensi [10]. Maka dari itu sesuai dengan penjelasan sebelumnya, jaringan rumput vetiver dan eceng gondok yang mati akan mulai terdekomposisi dan melepaskan komponen organik

pada air lindi. Proses ini dapat meningkatkan nilai TSS pada air lindi.

Rumput vetiver kembali menunjukkan hasil terbaik

toksik pada tanaman, ditunjukkan oleh kemunculan klorosis dan nekrosis pada daun. Perbedaan tingkat keparahan gejala ini terlihat jelas pada rumput vetiver dan



Gambar 6 Efektivitas pengolahan air lindi menggunakan *constructed wetland* (a) BOD (b) COD (c) TSS (d) N total (e) kadmium

pada parameter N total dengan penurunan dari 1190 mg/l hingga 272,25 mg/l, diikuti eceng gondok 775 mg/l dan kontrol 873,4 mg/l. Ketiga perlakuan memiliki nilai N total yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan perlakuan waktu retensi 6 hari. Peningkatan nilai N total pada perlakuan dengan rumput vetiver dan eceng gondok terjadi karena kondisi tanaman yang sudah tidak optimal. Ketika tanaman berada dalam kondisi tersebut, kemampuannya untuk menyerap kandungan N total berkurang secara drastis. Akibatnya, nitrogen yang terkandung dalam biomassa rumput vetiver dan eceng gondok yang mati tersebut ikut tercampur kembali dengan nitrogen yang sudah ada dalam air lindi, menyebabkan kenaikan konsentrasi N total keseluruhan [21].

Pada parameter kadmium, semua perlakuan justru mengalami peningkatan. Rumput vetiver menunjukkan kenaikan nilai kadmium terburuk yaitu 0,02 mg/l menjadi 0,03 mg/l, diikuti eceng gondok dan kontrol yang menunjukkan peningkatan nilai kadmium menjadi 0,029 mg/l. Pada perlakuan rumput vetiver dan eceng gondok mengalami fluktuasi. Situasi ini menunjukkan adanya efek

parameter pencemar pada air lindi. Hasil pengolahan divisualisasikan dalam diagram batang guna memberikan gambaran yang lebih jelas disajikan pada gambar 6.

Secara keseluruhan penggunaan sistem *constructed wetland* dalam menangani air lindi di TPK Sarimukti pada dasarnya menunjukkan hasil yang cukup optimal. Pengolahan dengan waktu retensi yang lebih lama membuktikan efektivitas penurunan kandungan polutan

eceng gondok [19]. Parameter pada perlakuan rumput vetiver dengan waktu retensi 10 hari yang melebihi batas baku mutu hanya N total. Kemudian pada perlakuan eceng gondok parameter yang melampaui ambang baku mutu adalah COD dan N total, dan pada perlakuan kontrol parameter yang melampaui ambang baku mutu adalah BOD, COD, dan N total.

Nilai efektivitas digunakan untuk mengukur kinerja sistem *constructed wetland* dalam mereduksi konsentrasi eceng gondok yang masih hidup, sedangkan pada waktu retensi 10 hari semua tanaman sudah mati. Parameter dengan efektivitas pengolahan paling tinggi secara keseluruhan adalah TSS pada retensi 6 hari menggunakan rumput vetiver, dengan persentase penurunan mencapai 93,06%. Sebaliknya, parameter dengan efektivitas terendah adalah N total pada retensi 1 hari di perlakuan kontrol, dengan persentase kenaikan sebesar -53,13%. Semakin lama waktu retensi terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas hasil pengolahan air lindi, hal ini disebabkan oleh meningkatnya durasi interaksi antara air lindi, tanaman, dan mikroorganisme, yang berdampak pada semakin tingginya efisiensi degradasi polutan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa air lindi TPK Sarimukti memiliki karakteristik pH basah lemah, kandungan bahan organik dan nitrogen yang

tinggi, berwarna cokelat muda, serta menghasilkan aroma gas yang kuat akibat tingginya senyawa organik dan amoniak. Konsentrasi awal pencemar utama tergolong tinggi, dengan nilai COD mencapai 3251 mg/L, BOD 320 mg/L, dan nitrogen total 2030 mg/L, sehingga diperlukan sistem pengolahan yang efektif sebelum air lindi dibuang ke lingkungan. Penerapan sistem *constructed wetland* skala prototipe dengan media kerikil, pasir zeolit, serta penambahan bakteri *Pseudomonas* sp. terbukti mampu menstabilkan pH dan menurunkan konsentrasi BOD, COD, TSS, nitrogen total, dan kadmium.

Jenis tanaman memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja pengolahan, di mana rumput vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) pada hampir seluruh parameter pencemar. Efektivitas penurunan tertinggi dicapai pada parameter TSS sebesar 93,06% dan nitrogen total sebesar 82,82% pada waktu retensi 6 hari, serta COD sebesar 72,96% pada waktu retensi 10 hari. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, antara lain pengujian laboratorium yang dilakukan pada fasilitas berbeda serta penempatan reaktor di ruang tertutup yang membatasi intensitas cahaya dan berpotensi memengaruhi proses fotosintesis tanaman. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan laboratorium pengujian yang sama serta mengkaji pengaruh kondisi lingkungan terbuka dan variasi waktu retensi yang lebih luas guna memperoleh kinerja *constructed wetland* yang lebih optimal dan representatif terhadap kondisi lapangan.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] S. Qomariyah, Sobriyah, Koosdaryani, dan A. Y. Muttaqien, "Lahan basah buatan sebagai pengolah limbah cair dan penyedia air non-konsumsi," *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [2] J. Ramadhani, R. R. D. Asrifah, dan I. W. Widiarti, "Pengolahan air lindi menggunakan metode constructed wetland di TPA Sampah Tanjungrejo, Desa Tanjungrejo, Kecamatan Jekulo, Kabupaten Kudus," *Jurnal Ilmiah Lingkungan Kebumihan*, vol. 1, no. 2, pp. 1–8, 2019.
- [3] T. Tazkiaturrizki, R. Ratnaningsih, dan S. Aphirta, "Design evaluation of biological unit as a basic consideration to determine the design criteria of domestic wastewater treatment plant at 1st zone, Jakarta," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 434, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/434/1/012238.
- [4] P. R. Aji, "Komposisi sampah dan kualitas air lindi Tempat Pemrosesan Akhir Winongo," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 9467–9472, 2024.
- [5] F. Laili, "Analisa kualitas air lindi dan potensi penyebarannya ke lingkungan sekitar TPA Gunung Tugel Kabupaten Banyumas," Skripsi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2021.
- [6] P. M. Siska, "Kinerja pengolahan limbah effluent biogas dari limbah cair industri tapioka dengan kolam eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) di PD Semangat Jaya–Lampung Selatan," Skripsi, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, 2018.
- [7] S. O. Ningrum, "Analisis kualitas badan air dan kualitas air sumur di sekitar Pabrik Gula Rejo Agung Baru Kota Madiun," *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2018.
- [8] A. Januar, "Efektivitas bakteri *Arthrobacter chlorophenolicus* sebagai agen bioremediasi logam berat kromium heksavalen (Cr-VI) pada air lindi di TPA Piyungan," Tesis, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2024.
- [9] D. Rinaldi, "Unjuk kerja reaktor continuous wetland menggunakan tanaman vetiver (*Vetiveria zizanioides*) dan bakteri untuk mendegradasi kandungan amonia, BOD (biochemical oxygen demand), dan COD (chemical oxygen demand) dari limbah di industri X Yogyakarta," Tesis, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2019.
- [10] R. N. Aini, "Efektivitas metode fitoremediasi menggunakan tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan aerasi dalam mengolah limbah cair industri pupuk di Aceh," Tesis, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, Banda Aceh, 2023.
- [11] A. A. Sulianto, A. D. S. Aji, dan M. F. Alkahi, "Rancang bangun unit filtrasi air tanah untuk menurunkan kekeruhan dan kadar mangan dengan aliran upflow," *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, vol. 7, no. 2, pp. 72–80, 2020, doi: 10.21776/ub.jsal.2020.007.02.4.
- [12] T. A. Pramesti dan M. Mirwan, "Penurunan TSS, COD, dan total nitrogen pada air lindi dengan metode constructed wetland tanaman *Typha angustifolia*," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 2, no. 4, pp. 745–753, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i4.2309.
- [13] D. W. Wijayanti, W. B. Sediawan, dan A. Prasetya, "Plant growth and total nitrogen absorption rate in leachate with water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)," *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, vol. 3, no. 2, pp. 117–126, 2019, doi: 10.22515/sustinere.jes.v3i2.84.
- [14] N. S. Gurnita dan R. Budiasih, "Pengaruh pengindus ammonium sulfat terhadap pertumbuhan dan kandungan logam berat timbal (Pb) pada rumput akar wangi (*Vetiveria zizanioides* L.) yang ditanam pada tailing tambang emas," *BIOSFER: Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi*, vol. 2, no. 1, pp. 26–35, 2017.
- [15] D. Zumani, M. Suryaman, dan S. M. Dewi, "Pemanfaatan eceng gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) untuk fitoremediasi kadmium (Cd) pada air tercemar," *Jurnal Siliwangi Seri Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [16] T. Syahkumala, "Pemodelan kinetika fitoremediasi asam sulfat (H_2SO_4) di dalam air hujan dengan tumbuhan *Typha latifolia* (studi kasus pengolahan air hujan asam di sekitar industri batu bata di Kajhu, Aceh Besar)," Tesis, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry, Banda Aceh, 2021.

- [17] A. Siregar, R. Rasyidah, dan R. Nasution, "Pengujian kadar BOD, COD dan isolasi bakteri hasil remediasi air limbah lindi dengan menggunakan ekoenzim kulit buah pepaya (*Carica papaya L.*)," *Jurnal Biogenerasi*, vol. 9, no. 1, pp. 1014–1021, Mar, 2024 doi: 10.30605/biogenerasi.v9i1.3673
- [18] E. K. Sari dan L. Lucyana, "Evaluasi instalasi pengolahan air lindi di Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Simpang Kandis Kabupaten Ogan Komering Ulu," *Jurnal Deformasi*, vol. 6, no. 1, pp. 33–41, 2021.
- [19] A. Patandung, H. S. Syamsidar, dan A. Aisyah, "Fitoremediasi tanaman akar wangi (*Vetiver zizanioides*) terhadap tanah tercemar logam kadmium (Cd) pada lahan TPA Tamangapa Antang Makassar," *Al-Kimia*, vol. 4, no. 2, pp. 107–120, 2016.
- [20] A. Widiyanti, L. Oktavia, dan A. Setiawan, "Fitoteknologi pengolahan limbah cair depo pemasaran ikan (DPI) Kabupaten Sidoarjo menggunakan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan kangkung air (*Ipomoea aquatica*)," *Journal of Research and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 227–236, 2020
- [21] F. R. Dani, "Analisis kadmium dan nitrogen total air lindi menggunakan tanaman kangkung air (*Ipomoea aquatica* Forsk) dengan metode constructed wetland sistem sirkulasi (studi kasus: TPA controlled landfill nonaktif)," Tesis, Universitas Batanghari, Jambi, 2023.
- [22] Alshazna, P., dan M. Verawaty, "Efisiensi penurunan *Escherichia coli* pada sistem constructed wetland pada waktu retensi berbeda menggunakan *Typha angustifolia*," Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Sriwijaya, 2020.