

# Pengaruh Variasi HRT dan Kerapatan Tanaman *Pistia stratiotes* Terhadap Efisiensi Penyisihan BOD dalam Sistem Kombinasi Biofilter dan Fitoremediasi Air Lindi

Chandra Nabila Rahmawati, Firra Rosariawari, Syadzadhiya Qothrunada Zakiyayasin Nisa

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: firra.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 4 Agustus 2025

Disetujui: 07 Agustus 2025

## Abstract

Leachate from municipal solid waste landfills contains high concentrations of organic and inorganic pollutants that pose environmental risks if left untreated. One environmentally friendly alternative for leachate treatment is phytoremediation using aquatic plants. This study aims to evaluate the effect of varying hydraulic retention time and plant densities of *Pistia stratiotes* on the removal efficiency of Biochemical Oxygen Demand (BOD) from landfill leachate. Experiments were conducted in a laboratory-scale system combining a biofilter filled with honeycomb media and phytoremediation tanks. Plant densities tested were 4, 6, 8, 10, and 12 plants per unit, while HRT was varied at 2, 4, 6, 8, and 10 days. BOD<sub>5</sub> parameters were analyzed following standard methods and statistically evaluated using two-way ANOVA. Results showed that higher plant density led to an increasing trend in removal efficiency, with BOD removal reaching up to 96%. The statistical analysis showed that HRT variations significantly influenced BOD removal ( $p < 0.05$ ), while the effect of plant density variation was not statistically significant ( $p > 0.05$ ). Despite the lack of statistical significance, the practical contribution of increased plant biomass in enhancing phytoremediation through expanded root zones and uptake surfaces was evident. This study suggests that while plant density is not a dominant factor, it plays a supportive role in optimizing leachate phytoremediation performance.

**Keywords:** *landfill leachate, phytoremediation, hydraulic retention time plant density, biochemical oxygen demand*

## Abstrak

Air lindi dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah mengandung polutan organik dan anorganik yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Salah satu alternatif pengolahan yang ramah lingkungan adalah sistem fitoremediasi menggunakan tanaman air. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi HRT dan kerapatan tanaman *Pistia stratiotes* terhadap efektivitas penyisihan Biochemical Oxygen Demand (BOD) dalam air lindi. Percobaan dilakukan pada sistem reaktor skala laboratorium yang dikombinasikan dengan media biofilter *honeycomb*. Variasi jumlah tanaman terdiri atas 4, 6, 8, 10, dan 12 tanaman, sedangkan HRT divariasikan menjadi 2, 4, 6, 8, dan 10 hari. Parameter BOD<sub>5</sub> diukur sesuai metode standar dan dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA *one way*. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan tanaman memberikan tren peningkatan efisiensi penyisihan BOD (hingga 96%). Secara statistik, variasi HRT berpengaruh signifikan dilihat dari ( $p$ -value  $< 0,05$ ), namun variasi kerapatan tanaman terhadap penyisihan parameter BOD tidak signifikan ( $p$ -value  $> 0,05$ ). Meskipun demikian, secara praktis, peningkatan jumlah tanaman dapat mendukung proses fitoremediasi melalui peningkatan luas permukaan serapan dan zona akar. Penelitian ini menunjukkan bahwa kerapatan tanaman merupakan faktor pendukung yang dapat meningkatkan kinerja fitoremediasi, meskipun bukan faktor utama yang menentukan keberhasilan penyisihan polutan.

**Kata Kunci:** *air lindi, fitoremediasi, HRT, kerapatan tanaman, BOD*

## 1. Pendahuluan

Air lindi yang dihasilkan dari tempat pemrosesan akhir (TPA) sampah mengandung konsentrasi tinggi bahan pencemar organik dan anorganik, seperti *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), amonia, logam berat, serta nutrisi. Jika tidak diolah dengan baik, air lindi dapat mencemari tanah, air permukaan, dan air tanah, serta membahayakan ekosistem sekitarnya [1]. Salah satu TPA yang menghadapi tantangan dalam pengelolaan air lindi adalah TPA Selopuro di Kabupaten Ngawi. Meskipun telah menggunakan sistem *controlled landfill*, TPA ini belum memiliki instalasi pengolahan air lindi yang memadai. Limbah cair

hanya ditampung dalam kolam tanpa proses pengolahan lanjutan, sehingga berpotensi mencemari lingkungan [2].

Teknologi pengolahan air lindi di Indonesia umumnya masih bergantung pada kolam stabilisasi seperti kolam anaerob, aerob, dan lahan basah. Sistem ini memang sederhana dan berbiaya rendah, namun membutuhkan lahan luas dan waktu tinggal yang panjang, serta sering kali tidak mampu memenuhi baku mutu yang ditetapkan oleh peraturan [3]. Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif teknologi yang efisien, hemat lahan, dan ramah lingkungan. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah kombinasi biofilter dan fitoremediasi, yaitu metode pengolahan air limbah menggunakan media *honeycomb* dan tanaman air. Tanaman *Pistia stratiotes* (kayu apu) dikenal sebagai salah satu spesies fitoremediator yang efektif karena pertumbuhannya cepat, menghasilkan biomassa tinggi, serta mampu menyerap nutrisi, logam berat, dan bahan organik terlarut [4], [5].

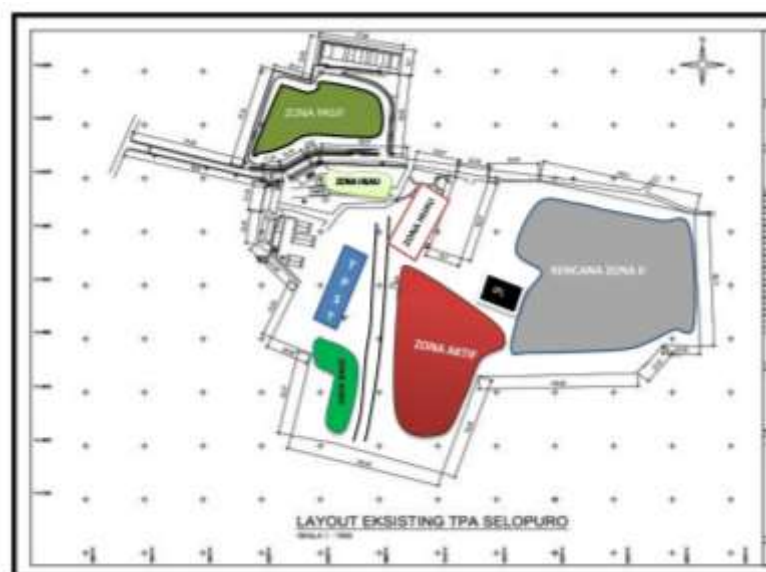
Efisiensi sistem biofilter sangat dipengaruhi oleh parameter desain hidraulik, salah satunya adalah waktu tinggal hidraulik atau *Hydraulic Retention Time* (HRT). HRT menentukan lama waktu air limbah berada dalam sistem, yang secara langsung berpengaruh terhadap kontak antara senyawa pencemar dan mikroorganisme. HRT yang terlalu singkat dapat menyebabkan proses dekomposisi tidak optimal, sedangkan HRT yang terlalu lama dapat menurunkan efisiensi sistem secara teknis dan ekonomis [6].

Pada sistem fitoremediasi, akar tanaman memainkan peran penting dalam menyerap zat pencemar dan menyediakan lingkungan mikroaerobik yang mendukung aktivitas mikroorganisme pengurai [7]. Salah satu faktor desain yang memengaruhi efektivitas fitoremediasi adalah kerapatan tanaman. Peningkatan kerapatan tanaman dapat memperluas permukaan akar dan mempercepat proses penyerapan polutan. Namun, kerapatan yang terlalu tinggi justru dapat menyebabkan persaingan ruang dan cahaya antar tanaman, serta menurunkan efektivitas proses karena terbatasnya sirkulasi oksigen dan sinar matahari [8]. Penelitian mengenai pengaruh variasi kerapatan tanaman terhadap kinerja fitoremediasi, khususnya dalam pengolahan air lindi, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi HRT dan kerapatan tanaman terhadap efisiensi penyisihan BOD dalam sistem kombinasi biofilter–fitoremediasi. Penelitian ini diharapkan mampu menyumbangkan informasi ilmiah yang bermanfaat sebagai dasar pengembangan desain sistem kombinasi biofilter dan fitoremediasi pada air lindi untuk skala kecil hingga menengah.

## 2. Metode Penelitian

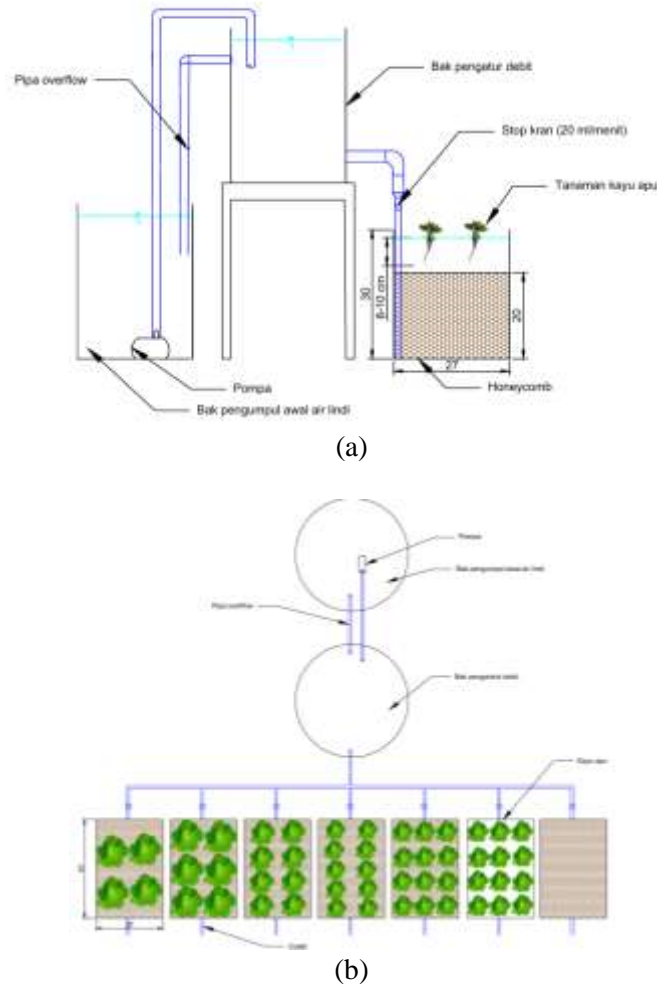
### 2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri di kediaman peneliti yang berlokasi di Desa Pacing, Kecamatan Padas, Kabupaten Ngawi, Provinsi Jawa Timur. Air lindi yang digunakan sebagai sampel diperoleh dari kolam penampungan TPA Selopuro, yang terletak di Kecamatan Pitu, Kabupaten Ngawi, Jawa Timur. TPA Selopuro merupakan TPA regional yang melayani 12 kecamatan dengan sistem *controlled landfill*. Titik Pengambilan air lindi disajikan pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Peta Layout Pengambilan Air Lindi di TPA Selopuro

Pelaksanaan penelitian berlangsung selama bulan Mei hingga Juni Maret 2025, yang mencakup tahap pengambilan sampel, pembuatan reaktor, proses adaptasi tanaman dan biofilm, pengoperasian sistem, serta pengujian laboratorium untuk parameter *Biochemical Oxygen Demand* (BOD). Pengujian parameter BOD dilakukan di Laboratorium Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.



**Gambar 2.** Reaktor (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas

Sistem pengolahan dirancang menggunakan reaktor skala laboratorium berbentuk kolam dari bahan plastik, berdiameter ( $P \times L \times T$ )  $0,4 \text{ m} \times 0,27 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$  dengan mempertimbangkan ketinggian media  $0,2 \text{ m}$  dan volume  $30 \text{ L}$ . Reaktor terdiri dari dua komponen utama: zona biofilter berisi media *honeycomb* sebagai tempat tumbuh biofilm dan zona fitoremediasi yang diisi dengan tanaman *Pistia stratiotes* pada permukaan air. Sistem dirancang dengan aliran *upflow* untuk memastikan kontak antara polutan, mikroorganisme, dan akar tanaman. Variasi jumlah tanaman digunakan untuk mengkaji pengaruh kerapatan terhadap efisiensi penyisihan BOD.

## 2.2 Prosedur Analisis Data

Berdasarkan hasil data yang telah diperoleh, uji *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dilakukan melalui pengukuran di laboratorium. Selanjutnya, perhitungan nilai uji kualitas dilakukan dengan menggunakan uji statistik sebagai berikut:

Analisis ANOVA satu arah (One-Way ANOVA) digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata beberapa kelompok perlakuan. Hasil pengujian menunjukkan nilai signifikansi ( $p$ -value) lebih kecil dari batas  $\alpha = 0,05$ , yang berarti setidaknya terdapat satu kelompok dengan rata-rata yang secara statistik berbeda dari kelompok lainnya. Dengan demikian, hipotesis nol ( $H_0$ ) ditolak dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ) diterima, menandakan bahwa perlakuan yang diberikan memberikan dampak nyata terhadap parameter yang diamati.

Perbedaan rata-rata ini kemungkinan dipengaruhi oleh pengaruh perlakuan terhadap kondisi lingkungan fisik, kimia, atau biologis pada sistem yang diuji. Temuan ini sejalan dengan pernyataan dalam [9], bahwa ANOVA merupakan metode statistik yang tepat dalam menganalisis pengaruh satu faktor terhadap variabel respon. Selanjutnya, [10] menyatakan bahwa uji ini cocok diterapkan pada data dengan distribusi normal dan varians yang homogen, terutama untuk membandingkan rata-rata antar kelompok.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Air lindi yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari kolam penampungan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Selopuro, Kabupaten Ngawi. Kolam ini merupakan bagian dari sistem pengelolaan limbah cair hasil pelapukan sampah organik dan anorganik. Sebelum dilakukan perlakuan, sampel air lindi dianalisis untuk mengetahui kandungan awal pencemaran, khususnya terhadap parameter *Biochemical Oxygen Demand* (BOD). Hasil uji karakteristik air lindi dapat dilihat pada **Tabel 1**.

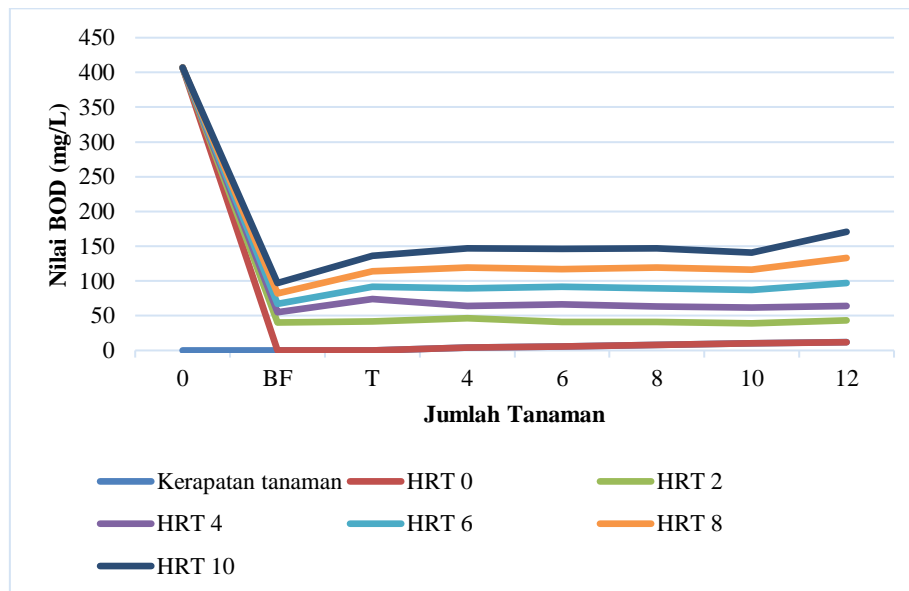
**Tabel 1.** Hasil Uji Karakteristik Air Lindi

No	Parameter	Satuan	Hasil Analisis	Baku Mutu
1	BOD <sub>5</sub>	mg/L	895,9	150

Berdasarkan hasil analisis awal didapatkan nilai BOD sebesar 895,9 mg/L. Nilai BOD tersebut masih melebihi baku mutu air lindi menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor. 59 Tahun 2016 Tentang Baku Mutu Air Lindi [11].

#### 3.1 Analisis Pengaruh HRT dan Kerapatan Tanaman

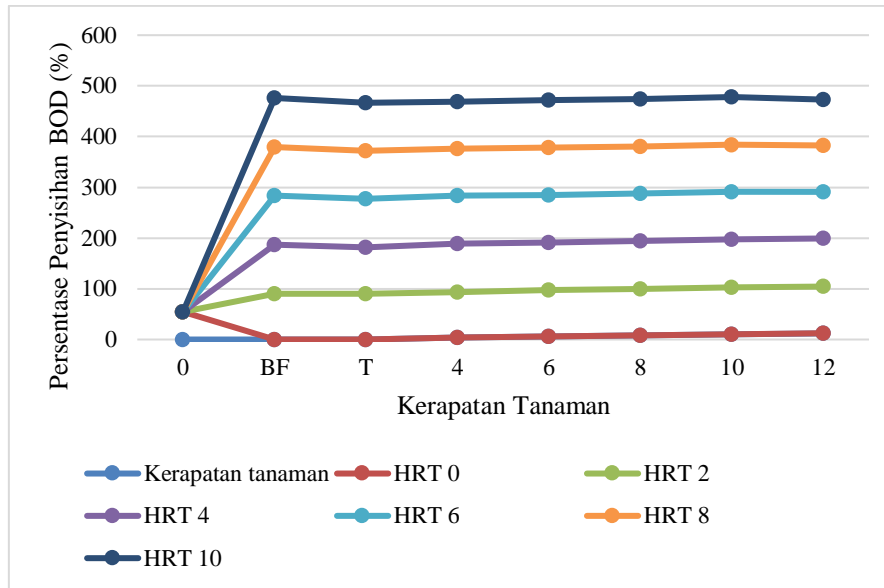
*Biochemical Oxygen Demand* (BOD) merupakan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan senyawa organik yang bersifat biodegradable dalam air lindi secara biologi. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan tingkat pencemaran organik dalam limbah cair TPA. Senyawa organik yang terukur melalui BOD umumnya berasal dari limbah cair yang dapat diuraikan secara alami oleh bakteri. Pengujian BOD dilakukan menggunakan metode inkubasi selama lima hari sesuai dengan prosedur dalam SNI 6989.72:2009. Nilai BOD yang diamati pada HRT ke-0, 2, 4, 6, 8, dan 10 dan kerapatan tanaman 4, 6, 8, 10, dan 12 tanaman ditampilkan dalam **Gambar 2**.



**Gambar 3.** Hubungan HRT dan Kerapatan Tanaman Terhadap Penyisihan BOD

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, nilai kandungan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dari hari ke-0 sampai dengan ke-10 menunjukkan kandungan BOD hari ke-0 sebesar 407 mg/L menuju nilai yang lebih rendah setelah perlakuan biofilter dan fitoremediasi dengan berbagai variasi kerapatan tanaman dan waktu tinggal hidraulik (HRT). Grafik menunjukkan bahwa bertambahnya kerapatan tanaman secara umum berkontribusi terhadap penurunan nilai BOD, terutama pada variasi HRT yang lebih tinggi. Pada HRT 2 hingga HRT 10, pola penurunan BOD cenderung stabil dan lebih efektif seiring meningkatnya HRT. Pada HRT 2 memiliki penurunan BOD yang relatif konsisten namun tidak seefektif HRT 6 hingga 10. Pada HRT 10, terlihat nilai BOD terendah terjadi ketika jumlah tanaman

mencapai 6 tanaman (26 mg/L), sebelum mengalami sedikit kenaikan pada jumlah tanaman 12 (36 mg/L), yang kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan ruang dan menurunnya efisiensi fitoremediasi akibat kepadatan tanaman. Hasil analisis persentase penyisihan BOD dapat dilihat pada **Gambar 3**.



**Gambar 4.** Persentase Hubungan HRT dan Kerapatan Tanaman Terhadap Penyisihan BOD

Grafik **Gambar 4** tersebut menunjukkan tren penyisihan BOD (%) pada sistem kombinasi biofilter dan fitoremediasi dengan variasi waktu tinggal hidraulik (HRT) ke-0, 2, 4, 6, 8, dan 10 hari, kerapatan tanaman 4 hingga 12 tanaman. Secara umum, grafik memperlihatkan bahwa baik peningkatan HRT maupun kerapatan tanaman memberikan pengaruh positif terhadap efisiensi penyisihan BOD. Pada HRT 0 hari, penyisihan BOD sangat rendah dengan nilai 55%. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanpa waktu tinggal yang memadai, proses penguraian senyawa organik tidak berlangsung secara efektif, karena waktu kontak antara polutan dan mikroorganisme terlalu singkat. Ketika HRT ditingkatkan menjadi 2 hari, terjadi peningkatan efisiensi penyisihan BOD, dengan nilai mencapai sekitar 93% pada kerapatan 10 tanaman. Pada HRT 4, 6, 8, dan 10 persentase penyisihan paling tinggi pada rentang 96-97% pada reaktor kontrol dengan biofilter *honeycomb* dan kerapatan 4 tanaman.

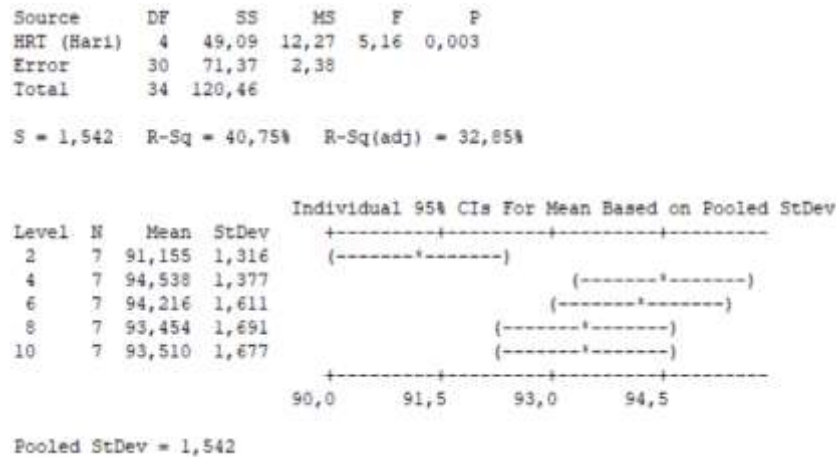
Penggunaan tanaman dalam sistem biofilter umumnya mampu meningkatkan efisiensi penyisihan polutan BOD. Hal ini disebabkan oleh adanya zona rhizosfer yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme pengurai, serta kemampuan tanaman dalam menyerap dan menstabilkan senyawa pencemar. Selain itu, tanaman memiliki kontribusi langsung dalam menyerap zat pencemar dan menghasilkan oksigen melalui fotosintesis, yang mendukung proses dekomposisi oleh mikroba aerobik [12]; [13]. Keberadaan tanaman air dalam sistem biofilter juga dapat memperkaya komunitas mikroba yang berperan dalam proses biotransformasi senyawa organik dan nitrogen, sehingga mempercepat proses pemulihan kualitas air [14]. Namun, dalam penelitian ini, justru ditemukan bahwa keberadaan tanaman menyebabkan penurunan efisiensi penyisihan BOD.

Kondisi ini diduga terjadi akibat pertumbuhan akar tanaman yang berlebih, sehingga mengganggu distribusi aliran dalam media biofilter. Akar yang menyumbat media dapat menciptakan kondisi anaerob lokal yang tidak menguntungkan bagi aktivitas mikroorganisme aerob. Selain itu, terjadi pula kemungkinan kompetisi oksigen antara akar tanaman dan mikroorganisme, yang mengurangi efektivitas proses biodegradasi [15]. Oleh karena itu, meskipun integrasi tanaman dalam sistem biofilter secara umum memberikan manfaat ekologis, faktor-faktor seperti desain sistem, kepadatan tanaman, dan jenis media harus diperhitungkan secara cermat agar tidak menghambat efisiensi pengolahan air limbah.

### 3.2 Uji Statistik

#### A. Pengaruh HRT (hari) Terhadap Penyisihan BOD

Berdasarkan hasil uji ANOVA *one way*, dilakukan analisis terhadap pengaruh (faktor) terhadap (variabel respon). Pada penelitian ini, variabel faktor adalah variasi waktu tinggal (HRT), yang terdiri atas perlakuan 2 hari, 4 hari, dan 6 hari, 8 hari, dan 10 hari. Sedangkan variabel respon yang diamati adalah nilai persen penyisihan BOD air lindi setelah proses pengolahan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai p-value = 0,003, yang lebih kecil dari taraf signifikansi ( $\alpha = 0,05$ ). Dengan demikian,  $H_0$  ditolak, berarti terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik terhadap rata-rata nilai BOD akhir antar kelompok HRT.



**Gambar 5.** Pengaruh HRT (hari) Terhadap Penyisihan BOD

Hal ini menunjukkan bahwa lama waktu tinggal berpengaruh nyata terhadap efektivitas penyisihan BOD dalam sistem biofilter-fitoremediasi yang digunakan. Hal ini dapat disebabkan oleh meningkatnya waktu kontak antara air limbah dan mikroorganisme dalam sistem, yang memungkinkan proses dekomposisi bahan organik berlangsung lebih efektif. Dapat dilihat mean dari HRT (hari) 2, 4, 6, 8, dan 10 hari, diperoleh mean HRT (hari) 4 hari adalah yang terbesar. Hasilnya HRT 4 hari adalah sebagai HRT yang terbaik dalam penyisihan BOD.

#### Grouping Information Using Tukey Method

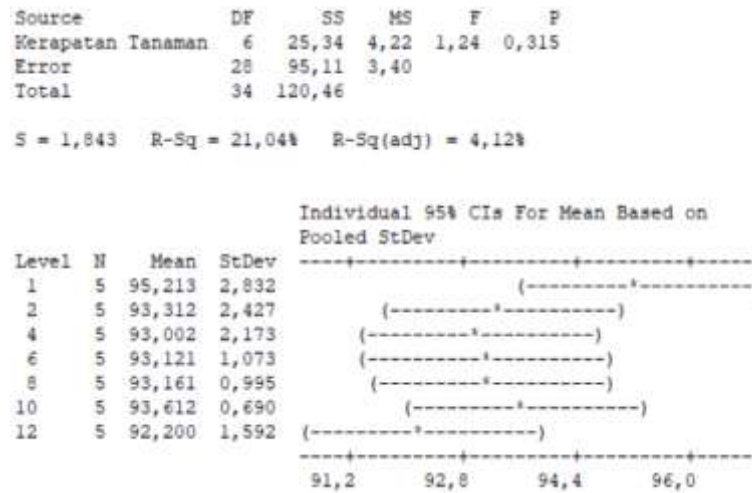
HRT (Hari)	N	Mean	Grouping
4	7	94,538	A
6	7	94,216	A
10	7	93,510	A B
8	7	93,454	A B
2	7	91,155	B

**Gambar 6.** Uji Tukey HRT (hari) Terhadap Penyisihan BOD

Setelah diketahui bahwa variasi Hydraulic Retention Time (HRT) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan konsentrasi BOD, dilakukan uji lanjut Tukey untuk mengetahui pasangan kelompok mana yang memiliki perbedaan signifikan. Berdasarkan hasil uji Tukey, perlakuan HRT 4 dan 6 hari berada pada grup A, sedangkan HRT 2 hari berada pada grup B. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan HRT 4 dan 6 hari secara statistik berbeda signifikan dibandingkan HRT 2 hari, yang artinya peningkatan HRT menjadi 4 dan 6 hari secara statistik memberikan efek signifikan terhadap efisiensi penyisihan BOD dibandingkan HRT 2 hari. Pada HRT 2 hari menunjukkan bahwa waktu tinggal yang terlalu singkat mengurangi efektivitas sistem dalam menurunkan konsentrasi BOD. Sementara itu, perlakuan HRT 10 dan 8 hari termasuk dalam grup AB, yang berarti tidak berbeda signifikan baik terhadap HRT 4 dan 6 hari maupun HRT 2 hari. Dengan demikian, HRT 10 dan 8 hari merupakan perlakuan yang tidak menunjukkan perbedaan signifikan dengan dua perlakuan lainnya.

### B. Pengaruh Kerapatan Tanaman Terhadap Penyisihan BOD

Berdasarkan hasil uji ANOVA *one way* diatas, variabel faktor adalah variasi kerapatan tanaman, yang terdiri atas perlakuan 4, 6, 8, 10, dan 12 tanaman. Sedangkan variabel respon yang diamati adalah nilai persen penyisihan BOD air lindi setelah proses pengolahan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai  $p\text{-value} = 0,315$ , yang lebih besar dari taraf signifikansi ( $\alpha = 0,05$ ). Dengan demikian,  $H_0$  gagal ditolak, berarti tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik terhadap rata-rata nilai BOD akhir antar kelompok kerapatan tanaman.



Gambar 7. Pengaruh Kerapatan Tanaman Terhadap Penyisihan BOD

Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan tanaman tidak memberikan pengaruh nyata terhadap efektivitas penyisihan BOD dalam sistem biofilter-fitoremediasi yang digunakan. Dapat dilihat mean dari kerapatan tanaman 4, 6, 8, 10, 12, kontrol biofilter, dan kontrol tanaman diperoleh mean 1 (kontrol biofilter) adalah yang terbesar. Hasilnya kontrol biofilter adalah yang terbaik dalam penyisihan BOD.

Grouping Information Using Tukey Method

Kerapatan Tanaman	N	Mean	Grouping
1	5	95,213	A
10	5	93,612	A
2	5	93,312	A
8	5	93,161	A
6	5	93,121	A
4	5	93,002	A
12	5	92,200	A

Gambar 8. Uji Tukey Kerapatan Tanaman Terhadap Penyisihan BOD

Berdasarkan hasil uji Tukey, perlakuan kerapatan tanaman 4, 6, 8, 10, 12 hari, kontrol biofilter, dan kontrol tanaman berada pada grup A. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar perlakuan terhadap efisiensi penyisihan BOD. Seluruh tingkat kerapatan tanaman yang diuji cenderung memberikan hasil yang serupa dalam menurunkan kadar BOD. Temuan ini sejalan dengan hasil uji ANOVA yang menunjukkan nilai  $p\text{-value} > 0,05$ , yang berarti tidak ada pengaruh nyata dari variasi kerapatan tanaman terhadap variabel respon pada taraf signifikansi 5%.

### 4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisis, variasi kerapatan tanaman memberikan pengaruh terhadap efektivitas penyisihan BOD dalam sistem kombinasi biofilter dan fitoremediasi. Hal ini dapat dibuktikan pada penyisihan BOD yaitu hingga 96%. Namun, pada hasil uji statistik menunjukkan bahwa pengaruh tersebut tidak signifikan terhadap penyisihan BOD yaitu  $p\text{-value} > 0,05$ . Artinya, meskipun secara praktis terdapat perbedaan rata-rata penyisihan antar kerapatan tanaman, perbedaan tersebut belum cukup kuat untuk disimpulkan sebagai pengaruh yang nyata secara statistik. Variasi HRT pada sistem biofilter dan fitoremediasi menunjukkan adanya peningkatan efektivitas penyisihan BOD. Hal ini dapat dibuktikan pada penyisihan BOD yaitu hingga 97%. Hasil uji statistik juga menunjukkan bahwa pada variasi HRT

mempunyai  $p$ -value  $<5\%$ , sehingga menunjukkan bahwa HRT berpengaruh nyata terhadap efektivitas penyisihan BOD.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi kombinasi antara HRT dan kerapatan tanaman secara lebih luas, serta mempertimbangkan parameter lingkungan lain seperti suhu, pH, dan intensitas cahaya yang dapat memengaruhi efisiensi proses fitoremediasi. Analisis terhadap jenis dan aktivitas mikroorganisme dalam media biofilter dapat memberikan pemahaman lebih dalam mengenai peran komunitas mikroba dalam degradasi BOD, terutama dalam fase adaptasi dan pertumbuhan biofilm. Selain *Pistia stratiotes*, disarankan untuk menguji efektivitas spesies tanaman air lokal lainnya yang memiliki kemampuan fitoremediasi tinggi dan daya adaptasi yang baik terhadap air lindi.

## 5. Singkatan

BOD	Biochemical Oxygen Demand
HRT	Hydraulic Retention Time
%	Persentase

## 6. Referensi

- [1] A. Sarwono, M. Azis, and D. Larasati, "Studi karakteristik air lindi dan dampak lingkungan," *Jurnal Ilmu dan Teknologi Lingkungan*, vol. 9, no. 1, pp. 65–72, 2017.
- [2] R. Prisilla, S. P. Setiadi, and T. Yuliani, "Karakteristik air lindi TPA dan dampaknya terhadap kualitas lingkungan," *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan*, vol. 12, no. 1, pp. 23–31, 2024.
- [3] N. I. Said and R. W. Hartaja, "Pengolahan air lindi dengan kombinasi biofilter dan proses denitrifikasi," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 24, no. 2, pp. 80–88, 2018.
- [4] A. Munawwaroh and R. Pangestuti, "Efektivitas *Pistia stratiotes* dalam menurunkan beban pencemar limbah domestik," *Jurnal Biologi Tropis*, vol. 16, no. 2, pp. 88–94, 2018.
- [5] M. T. Damuk and M. Dwiratna, "Fitoremediasi air limbah menggunakan kayu apu (*Pistia stratiotes*)," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 18, no. 3, pp. 211–219, 2022.
- [6] M. A. Musa, S. Idrus, N. Zaini, and M. F. Khamis, "Effect of hydraulic retention time on performance of hybrid vertical flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, p. 101644, 2020, doi: [10.1016/j.jwpe.2020.101644](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101644)
- [7] S. Tiwari, S. Dixit, and N. Verma, "Mekanisme fitoremediasi: Tinjauan literatur," *International Journal of Environmental Research and Development*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2019.
- [8] A. Hakim, T. A. Rachmanto, and M. Arifin, "Pengaruh kerapatan tanaman air terhadap efisiensi fitoremediasi," *Jurnal Rekayasa Hijau*, vol. 13, no. 1, pp. 61–69, 2024.
- [9] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- [10] I. Ghozali, *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program IBM SPSS 23*, Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2016.
- [11] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, *Peraturan Menteri LHK No. 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Lindi*, Jakarta, 2016.
- [12] R. H. K. Al-Isawi, S. Ismail, and A. Ahmad, "Phytoremediation of wastewater using aquatic plants: Mechanisms and efficiency," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 26, p. 102334, 2022, doi: [10.1016/j.eti.2022.102334](https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102334).
- [13] X. Wu, Y. Lin, Y. Wang, S. Wu, and C. Yang, "Volatile organic compound removal via biofiltration: Influences, challenges, and strategies," *Chemical Engineering Journal*, vol. 471, p. 144420, 2023, doi: [10.1016/j.cej.2023.144420](https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144420).
- [14] Y. Zhao, D. Zeng, and X. Xu, "Effects of macrophyte species on microbial communities and pollutant removal in constructed wetlands," *Ecological Engineering*, vol. 143, p. 105659, 2020, doi: [10.1016/j.ecoleng.2019.105659](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105659).
- [15] Y. Yang, R. Wang, L. Li, and J. Chen, "Effects of plant root characteristics on hydraulic performance and clogging in constructed wetlands," *Water Research*, vol. 190, p. 116701, 2021, doi: [10.1016/j.watres.2020.116701](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116701).