

Efektivitas *Hydrocharis laevigata* sebagai fitoremediasi air lindi TPA Banyuroto Kabupaten Kulon Progo

Sindy Syah Putri dan Suhartini

Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia
Jl. Colombo No.1, Daerah Istimewa Yogyakarta
Email: sindysyah.2020@student.uny.ac.id

Abstrak: Penelitian bertujuan untuk mengetahui efektivitas fitoremediasi tanaman *amazon frogbit* (*Hydrocharis laevigata*) pada variasi konsentrasi air lindi TPA Banyuroto terhadap penurunan kadar BOD, COD, TSS, pH, N total, dan kadmium, serta mengetahui performa tanaman *amazon frogbit* pada variasi konsentrasi air lindi TPA Banyuroto ditinjau dari jumlah daun dan berat basah tanaman. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan variasi konsentrasi air lindi serta rancangan acak lengkap (RAL). Penelitian ini meneliti pengaruh fitoremediasi pada tingkat konsentrasi air lindi (10, 20, dan 30%) terhadap kualitasnya selama 14 hari. Air lindi diambil dari inlet dan outlet bak pengelolaan air lindi. Kualitas air diuji sebelum dan sesudah perlakuan untuk seluruh parameter. Efektivitas fitoremediasi dihitung dengan rumus efektivitas dan performa tanaman yang meliputi jumlah daun dan berat tanaman *amazon frogbit* dianalisis statistik menggunakan uji One Way ANOVA untuk melihat perbedaan kualitas air sebelum dan sesudah perlakuan. Tanaman *amazon frogbit* menunjukkan potensi yang menjanjikan untuk fitoremediasi air lindi TPA, yang secara efektif mengurangi polutan pada konsentrasi lindi 10%. Kemampuan adaptasi tanaman terhadap lindi, terbukti dengan tidak adanya perubahan signifikan pada jumlah atau berat daun, membuatnya menjadi kandidat yang cocok untuk aplikasi pengelolaan lindi.

Kata kunci: air lindi, *amazon frogbit*, fitoremediasi, makrofit

Effectiveness *Hydrocharis laevigata* for phytoremediation of Banyuroto Landfill Leachate Kabupaten Kulon Progo

Abstract: This research aimed to determine the effectiveness of *amazon frogbit* (*Hydrocharis laevigata*) in reducing BOD, COD, TSS, pH, total N, and cadmium levels at various concentrations of Banyuroto landfill leachate water; and assess the performance of *amazon frogbit* in terms of leaf number and wet weight at different leachate concentrations. This research used an experimental method with variations in leachate concentration and a completely randomized design. The study examined the effect of phytoremediation at leachate concentration levels (10, 20, and 30%) over 14 days. Leachate water was collected from the inlet and outlet of the leachate management basin. Water quality was tested before and after treatment for all parameters. Phytoremediation effectiveness was calculated, and plant performance, including the number of leaves and weight, was analyzed using the One Way ANOVA test to see differences in water quality before and after treatment. The *amazon frogbit* showed promising potential for phytoremediation of landfill leachate water, effectively reducing pollutants at 10% leachate concentration. The plant's adaptability to leachate, evident in the absence of significant changes in leaf number or weight, makes it suitable for leachate management applications.

Keywords: *amazon frogbit*, effectiveness, leachate, macrophytes, phytoremediation

PENDAHULUAN

Beroperasinya bandara baru, hotel, restoran, dan perkantoran di Kulon Progo menyebabkan peningkatan masalah sampah. Volume sampah yang masuk ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Banyuroto meningkat secara signifikan, khususnya dengan beroperasinya *Yogyakarta International Airport* (YIA). Sebelumnya, volume sampah harian di TPA Banyuroto sekitar 70-90 ton, tetapi dengan adanya YIA, volume tersebut meningkat menjadi sekitar 120 ton per hari (Lestari, 2021).

Penanganan TPA terutama limbah domestik di Indonesia biasanya dilakukan dengan cara pembuangan terbuka. Limbah ditumpuk di area terbuka yang mudah diakses oleh siapa pun tanpa penutup. Akibatnya saat hujan TPA menghasilkan air lindi (Ngatimin & Syatrawati, 2019). Lindi (*leachate*) adalah limbah cair yang timbul karena air dari luar yang masuk ke dalam tumpukan sampah kemudian larut dan membilas materi yang terlarut termasuk bahan organik dari proses dekomposisi biologis (Sari & Afdal, 2017).

TPA memiliki aturan ketat terkait batas kontaminasi unsur pencemar dalam air lindi yang dibuang ke lingkungan atau badan air. Standar kualitas air limbah ini ditetapkan untuk memastikan kemampuan lingkungan dalam menyerap pencemaran. Jika evaluasi menunjukkan bahwa air lindi masih melebihi batas aman, maka tindakan pengolahan perlu dilakukan untuk menghilangkan pencemar sebelum dibuang (Ulhaq, 2023). Baku mutu lindi diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

Masalah lindi menjadi salah satu tantangan di TPA. Mayoritas TPA di Indonesia yang menggunakan metode *open dumping*, sampah diangkut ke TPA kemudian dikumpulkan dan ditumpuk di area yang telah disediakan. Seiring dengan pertumbuhan populasi, jumlah sampah terus bertambah setiap hari. Akumulasi sampah yang terus meningkat dan terpapar air menyebabkan timbulnya lindi, yang berpotensi mencemari lingkungan (Sarwono, Azis, & Widarti, 2017). Tanpa penanganan khusus, lindi dangkal dapat mencemari air tanah dangkal, sungai dan sumur. Pada umumnya lindi tidak hanya mengandung senyawa organik dan anorganik, tetapi juga unsur logam berat yang banyak terdapat dalam lindi: arsenik, besi, kadmium, kromium, merkuri, nikel, seng, tembaga dan timbal (Ambia, 2022). Oleh karena itu diperlukan kajian tentang fitoremediasi lindi dengan komprehensif.

Phyto, berasal dari bahasa Yunani *phyton* yang mengacu pada tanaman, sementara remediasi berasal dari bahasa Latin *remediare* yang merujuk pada upaya perbaikan, penyembuhan, atau pembersihan sesuatu. Fitoremediasi (*phytoremediation*) merupakan sistem di mana tanaman bekerja sama dengan mikroorganisme dalam berbagai media seperti tanah, air, atau koral untuk mengubah kontaminan menjadi bentuk yang kurang atau tidak berbahaya, bahkan memiliki nilai ekonomi (Irhamni, Pandia, Purba, & Hasan, 2017). Fitoremediasi dianggap sebagai alternatif yang efisien dan ramah lingkungan yang memanfaatkan berbagai jenis tanaman hiperakumulator yang dikenal sebagai makrofit untuk menghilangkan polutan logam berat dari air melalui mekanisme berbeda termasuk fitoekstraksi, rizofiltrasi, fitovolatilisasi, dan fitostabilisasi (Tan, Pang, Lim, & Chong, 2023). Fitoremediasi lindi di daerah TPA Banyuroto Kulonprogo belum pernah dilakukan menggunakan *H. laevigata*.

Makrofit mempunyai kapasitas yang signifikan untuk menyerap nutrisi dan zat lain dari media pertumbuhannya sehingga dapat menurunkan konsentrasi polutan dari badan air. Makrofit dapat menghilangkan dan mendegradasi polutan menggunakan mekanisme utama rizofiltrasi/fitofiltrasi, fitoekstraksi, fitovolatilisasi, dan fitodegradasi. Makrofit yang muncul

dan mengambang terutama mengambil nutrisi dan kontaminan lainnya baik dari substrat atau kolom air melalui akarnya, sedangkan jaringan batang juga penting jalur pembuangan dari kolom air bagi makrofit yang terendam (Fletcher, Willby, Oliver, & Quilliam, 2020). Salah satu spesies makrofit yang dapat digunakan sebagai tanaman fitoremediator adalah amazon frogbit (*Hydrocharis laevigata*). Di Indonesia, *Hydrocharis laevigata* saat ini hanya dimanfaatkan sebagai tanaman hias. Namun, jenis tanaman ini memiliki potensi yang dapat dikembangkan sebagai fitoremediator dalam mengatasi pencemaran logam berat di perairan, seperti Cr, Ni, Pb, dan Zn (Arán, Harguinteguy, Fernandez-Cirelli, & Pignata, 2017). Spesies ini memiliki nama sinonim *Limnobium laevigatum* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Heine, 1968 (sumber *gbif.org*).

H. laevigata merupakan tumbuhan stoloniferous akuatik yang batangnya mengapung atau tersuspensi di dalam air. Tumbuhan ini memiliki roset daun yang mengambang atau muncul di permukaan. Daunnya terapung memiliki jaringan spons tebal di permukaan bawah. Bunganya lebarnya sekitar 15 mm, berkelamin tunggal, bertangkai, dan tertutup spathe. Bunga putik bersifat soliter; memiliki sepal dan kelopak yang belum sempurna, meskipun kelopak dan kelopaknya mungkin kurang; dan memiliki ovarium unilokular dengan enam karpe, serta stigma linier terbagi yang lebih panjang dari segmen perianth. Selain itu, bunga betina terkadang menunjukkan staminode. Buah spesies ini terdiri dari kapsul mirip buah beri berbentuk bulat atau ellipsoid (panjang ~1,5 cm dan lebar 0,4-3,5 mm) yang berisi sebanyak 100 biji ellipsoid berukuran panjang sekitar 10 mm (Garcia-Murillo, 2023).

Dari pemaparan di atas maka fokus penelitian ini adalah menentukan efektifitas fitoremediasi air lindi di TPA Banyuroto. Fitoremediasi air lindi akan dilakukan menggunakan tanaman amazon frogbit (*Hydrocharis laevigata*). Performa tanaman amazon frogbit pada variasi konsentrasi air lindi TPA Banyuroto ditinjau dari jumlah daun dan berat basah tanaman.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Greenhouse Kebun Biologi FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta dengan waktu penelitian dimulai dari bulan Maret sampai bulan April. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah; ember berukuran 7L, jeriken/botol sampel, alat tulis, timbangan digital, alat dokumentasi, galon plastik, dan gelas ukur. Bahan yang digunakan meliputi; sampel air lindi, air bersih, dan tanaman amazon frogbit.

Sampel air lindi yang digunakan merupakan air lindi komposit dari bak *inlet*, tengah, dan *outlet* tempat pengelolaan air lindi TPA Banyuroto. Fitoremediasi diawali dengan tahap aklimatisasi pada tanaman amazon frogbit selama 7 hari di air bersih yang setelah itu kemudian diletakkan pada tiap ember-ember perlakuan variasi konsentrasi air lindi (0, 10, 20, dan 30%) sebanyak 80gr tiap ember. Pengamatan jumlah daun dan berat basah tanaman dilakukan setiap satu minggu sekali dari awal peletakkan tanaman hingga hari ke-14. Sedangkan data parameter diambil sebelum dan sesudah dilakukannya fitoremediasi.

Tahap analisis data dilakukan dengan perhitungan menggunakan rumus efektivitas guna membandingkan hasil data sebelum dan setelah fitoremediasi. Data yang dianalisis meliputi kadar parameter berdasarkan baku mutu air lindi (BOD, COD, TSS, pH, N total, dan Cd). Menurut Rachman, Setiawati, dan Sumiyati (2023), rumus efektivitas/efisiensi adalah sebagai berikut:

$$Ef(\%) = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

Ef : Efisiensi (%)

Co : Konsentrasi awal sampel

Ct : Konsentrasi akhir sampel

Untuk data performa tanaman yang berupa hasil penghitungan jumlah daun dan berat basah tanaman yang telah dikumpulkan dari hasil penelitian dianalisis menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) pada tingkat signifikansi 95% untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata tiap variabel tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian fitoremediasi, konsentrasi awal BOD dan COD menentukan tingkat kemampuan zat dan bahan organik untuk terurai menjadi zat yang lebih sederhana melalui aksi enzim dari mikroorganisme (biodegradabilitas) air lindi. Menurut Fajariyah dan Mangkoedihardjo (2017), tanaman berkontribusi terhadap ketersediaan oksigen dalam media, yang dapat memfasilitasi pertumbuhan mikroba dan meningkatkan porositas media melalui pengaruh akar tumbuhan. Selain itu, kehadiran tanaman juga dapat meningkatkan biodegradabilitas air lindi. Hasil uji karakteristik air lindi TPA Banyuroto disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1

Hasil uji karakteristik air lindi TPA Banyuroto

| Parameter | Satuan | Hasil Uji Awal | Hasil Uji Setelah Fitoremediasi | | | Baku Mutu |
|-----------|--------|----------------|---------------------------------|---------|---------|-----------|
| | | | 10% | 20% | 30% | |
| BOD | mg/L | 616.0* | 69.65 | 163.5* | 161.5* | 150 |
| COD | mg/L | 1625.0* | 140.0 | 405.0* | 382.5* | 300 |
| TSS | mg/L | 30 | 8 | 20 | 27 | 100 |
| pH | - | 8.2 | 8.5 | 8.8 | 8.9 | 6 – 9 |
| N Total | mg/L | 411.4* | 9.1 | 17.6 | 13.2 | 60 |
| Cd | mg/L | 0.0030 | <0.0018 | <0.0018 | <0.0018 | 0,1 |

Keterangan : * belum memenuhi baku mutu

Sumber: Hasil analisis laboratorium BBTKLPP Yogyakarta, 2024

Ruzzi, Irawan, dan Lisha (2023) mengungkapkan bahwa efektivitas fitoremediasi diukur dengan menghitung nilai efektivitasnya, yang menunjukkan tingkat keberhasilan proses dalam menurunkan kadar pencemar air limbah. Nilai efektivitas ini merupakan perbandingan antara *input* (kadar pencemar sebelum fitoremediasi) dan *output* (kadar pencemar setelah fitoremediasi). Dengan kata lain, efektivitas menunjukkan seberapa besar tanaman berhasil dalam mengurangi pencemaran air limbah.

Tabel 2 merupakan hasil perhitungan efektivitas penurunan kadar beberapa parameter (BOD, COD, TSS, pH, N Total, dan kadmium) setelah fitoremediasi dengan menggunakan taraf yang berbeda di mana masing-masing perlakuan merupakan pemaparan air lindi dengan konsentrasi yang berbeda (10, 20, dan 30%).

Tabel 2.

Hasil perhitungan efektivitas fitoremediasi penurunan kadar tiap parameter

| Parameter | Nilai Efektivitas (%) | | |
|--------------|-----------------------|----------|----------|
| | P1 (10%) | P2 (20%) | P3 (30%) |
| BOD | 88.69 | 73.46 | 73.78 |
| COD | 91.38 | 75.08 | 76.46 |
| TSS | 73.33 | 33.33 | 10 |
| N Total | 97.79 | 95.72 | 96.79 |
| Kadmium (Cd) | >40 | >40 | >40 |

Sumber : Hasil analisis laboratorium BBTCLPP Yogyakarta, 2024

Pasca dilakukannya fitoremediasi, nilai efektivitas penurunan kadar BOD cenderung menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi air lindi yang dipaparkan. Nilai efektivitas penurunan kadar BOD pada P1 (10%) adalah 88,69%, kemudian 73,46% pada P2 (20%), dan tetap relatif stabil pada P3 (30%) dengan nilai 73,78%. Nilai efektivitas tertinggi terlihat pada konsentrasi lindi 10% karena pada konsentrasi yang lebih rendah, kontaminan dalam air lindi mungkin lebih mudah diuraikan oleh mikroorganisme dan lebih sedikitnya zat-zat yang menghambat aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan zat organik.

Pada pengujian BOD setelah pelaksanaan fitoremediasi didapatkan nilai kadar BOD pada P2 (20%) lebih tinggi 2 mg/L jika dibandingkan P3 (30%), yang seharusnya lebih rendah. Hal ini dikarenakan pada konsentrasi air lindi 20% menunjukkan pertumbuhan daun baru tercepat di hari ke-7 hingga hari ke-14, namun berat basahnya tidak meningkat secara signifikan karena terjadi kematian pada daun tua dan digantikan dengan daun muda yang lebih kecil serta akar baru yang pendek. Sejalan dengan hal tersebut, menurut Marendra, Widiatmono, dan Sari, (2024), tingkat penurunan BOD yang lebih rendah dapat terjadi dikarenakan luas permukaan daun dan panjang akar mempengaruhi transpirasi yang kemudian berhubungan dengan besarnya penyerapan yang mempengaruhi nilai BOD-nya.

Pengujian COD setelah fitoremediasi selama 14 hari didapatkan nilai efektivitas penurunan kadar COD tiap konsentrasi air lindi P1 (10%) yaitu sebesar 91.38%, P2 (20%) sebesar 75.08%, dan P3 (30%) sebesar 76.46%. Sejalan dengan penelitian Martino, Fernández San Juan, dan Angelo (2023), spesies *Limnobium laevigatum* yang digunakan sebagai fitoremediasi sedimen dasar yang terkontaminasi menunjukkan efisiensinya yang tinggi (sekitar 80%) dalam pengurangan kebutuhan oksigen kimiawi (COD).

Pada pengujian COD setelah pelaksanaan fitoremediasi didapatkan nilai kadar COD pada P2 (20%) lebih tinggi 22,5 mg/L jika dibandingkan P3 (30%), yang seharusnya lebih rendah. Hal ini disebabkan karena peningkatan dan penurunan parameter COD biasanya mengikuti pola yang serupa dengan peningkatan dan penurunan BOD yang sudah dijelaskan sebelumnya. Selain itu, proses fitoremediasi melibatkan interaksi kompleks antara tanaman, mikroorganisme, dan komposisi pada air lindi.

Penurunan COD memiliki mekanisme yang sama seperti BOD, yaitu rhizofiltrasi, fitovolatilisasi, dan fitodegradasi. Menurut Rismawati, Thohari, dan Rochmalia (2020), penurunan tingkat COD terjadi melalui proses fitovolatilisasi, di mana kontaminan yang diserap oleh tanaman kemudian dilepaskan ke udara. Setiap jenis tanaman memiliki tekanan uap yang berbeda, yang menentukan seberapa banyak kontaminan yang dilepaskan melalui fitovolatilisasi.

Kehadiran tanaman dalam kelompok perlakuan dapat mengakibatkan pengurangan tingkat COD karena mikroorganisme, terutama bakteri aerobik, menguraikan bahan organik yang terdapat dalam air limbah. Bahan organik ini kemudian diubah menjadi senyawa yang lebih sederhana yang dapat dimanfaatkan sebagai nutrisi oleh tanaman.

Persentase penurunan kadar *Total Suspended Solid* (TSS) paling tinggi didapatkan oleh perlakuan air lindi dengan konsentrasi 10% hal ini dikarenakan seiring dengan peningkatan konsentrasi, jumlah TSS yang terakumulasi dalam ember meningkat. Di sisi lain, berat tanaman dan waktu kontak dalam setiap konsentrasi sama. Semakin lama waktu penyerapan, semakin banyak polutan yang dapat diserap oleh tanaman air. Namun, hal ini hanya berlaku jika tanaman air belum jenuh. Jika tanaman air telah jenuh, polutan yang diserap tidak akan optimal meskipun waktu kontaknya lebih lama. Pengertian dari titik jenuh itu sendiri yaitu batas waktu maksimal yang bisa diterima oleh tanaman untuk menyerap polutan (Alya & Haryanto, 2022).

Akar tanaman memiliki struktur dan mekanisme yang memungkinkan untuk menangkap partikel-partikel padat yang terlarut dalam air melalui mekanisme rhizofiltrasi. Rahadian, Sutrisno, dan Sumiyati (2017) menjelaskan bahwa dalam proses penyisihan TSS oleh tanaman, proses terutama terjadi di bagian akar. Oleh karena itu, akar dan berat tanaman memainkan peran penting dalam menentukan seberapa efisien penyisihan TSS tersebut. Semakin besar akar dan berat tanaman, semakin besar juga kemungkinan untuk mengurangi TSS dalam air limbah karena kapasitas penyerapan yang lebih besar.

Hasil pengujian pH setelah fitoremediasi selama 14 hari mengalami peningkatan menuju basa. Pada konsentrasi 10, 20, dan 30% menunjukkan peningkatan kadar pH berturut-turut yaitu 8,5; 8,8; dan 8,9 dari yang awalnya sebesar 8,2. Peningkatan pH yang terjadi seiring dengan meningkatnya konsentrasi air lindi ini dapat terjadi karena proses penyerapan nutrisi oleh tanaman berlangsung secara berkelanjutan, yang mengakibatkan perubahan pada nilai pH larutan tempat tanaman hidup. Ketika jumlah ion positif yang diserap oleh tanaman lebih besar dari jumlah ion negatif, pH larutan akan cenderung meningkat. Sebaliknya, jika jumlah ion positif yang diserap lebih sedikit dari jumlah ion negatif, pH larutan akan cenderung menurun. Peningkatan pH larutan biasanya disebabkan oleh proses fotosintesis yang dilakukan oleh tanaman. Dalam proses fotosintesis akan menghasilkan CO_2 lalu melepas ion OH^- ke dalam air dan juga mengambil ion H^+ yang terdapat pada air (As'ari, Syafiuddin, Andriansyah, & Setianto, 2022).

Peningkatan pH juga dapat terjadi karena disebabkan oleh umur TPA Banyuroto yang sudah melebihi umur teknisnya. Umur teknis TPA Banyuroto zona satu habis pada tahun 2022 dihitung dari tahun mulai beroperasinya yaitu pada tahun 2009. Terhitung dari tahun 2023, TPA ini sudah beroperasi selama 14 tahun. Menurut Ibrahim dan Saufan (2023), semakin lama usia TPA (≥ 10 tahun), semakin tinggi pula pH air lindinya. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor yaitu; sampah yang terpendam di TPA semakin lama semakin terurai dan menghasilkan senyawa basa yang meningkatkan pH air lindi, seiring waktu proses degradasi organik pada sampah di TPA melambat yang menyebabkan berkurangnya produksi asam yang dapat membantu menjaga pH air lindi, TPA yang sudah tua menghasilkan lebih banyak gas seperti metana dan karbon dioksida yang dapat meningkatkan pH air lindi.

Nitrogen total mengacu pada total jumlah keseluruhan nitrogen yang terkandung dalam limbah, sampel air sungai atau badan air yang mengandung nitrat, amonia, dan nitrit (Pramesti & Mirwan, 2023). Secara keseluruhan, kadar N total mengalami penurunan di tiap konsentrasi air lindi. Namun, pada kadar N total konsentrasi air lindi 20% lebih tinggi 4.4 mg/L dari konsentrasi

air lindi 30%. Hal ini dapat terjadi karena pada konsentrasi 20% mengalami pertumbuhan daun baru tercepat dan menggantikan daun tua yang mengalami klorosis serta nekrosis. Daun baru yang tumbuh ini otomatis akarnya lebih pendek, yang mengakibatkan kurangnya penyerapan N total pada air lindi. Selain itu, faktor lain yang tidak teridentifikasi seperti intensitas cahaya, suhu air dan pH pada setiap ember selama proses fitoremediasi mungkin juga berperan dalam hubungan konsentrasi N total ini.

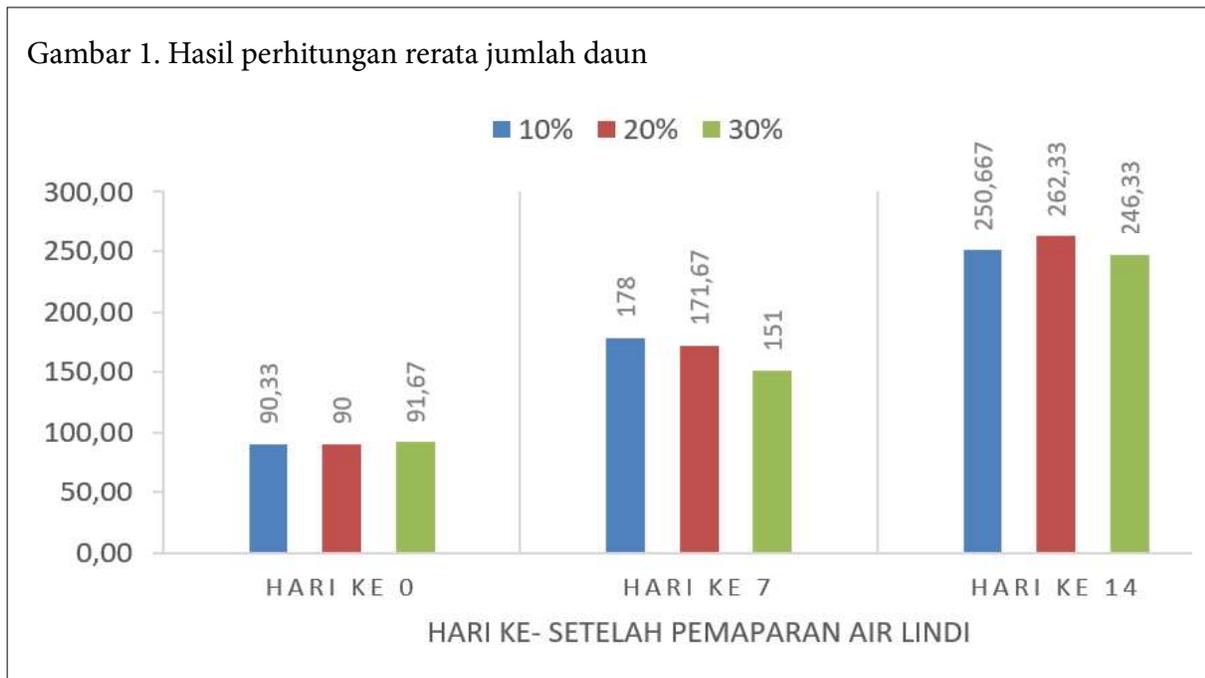
Pengurangan konsentrasi nitrogen dalam pengolahan air limbah secara menyeluruh melibatkan dua tahap mekanisme reaksi, yaitu nitrifikasi dan denitrifikasi. Dalam tahap nitrifikasi, terjadi reaksi aerobik di mana akar tanaman (*rhizome*) berperan dalam mengalirkan oksigen ke dalam air limbah di dasar reaktor. Mikroorganisme juga berperan penting dalam mengurangi total nitrogen yang terdapat dalam air limbah selama proses ini (Pramesti & Mirwan, 2023). Bakteri yang berasosiasi dengan akar memainkan peran penting dalam penurunan total nitrogen (N total) selama proses fitoremediasi dengan tanaman air. Bakteri yang terlibat dalam penurunan nitrogen total bertugas dalam oksidasi nitrit. Proses ini melibatkan baik dalam kondisi aerobik maupun anaerobik. Bakteri aerobik menguraikan zat organik menggunakan oksigen dan menghasilkan air, sedangkan bakteri anaerobik menggunakan ion sulfat dan ion nitrat untuk menguraikan zat organik dan menghasilkan energi serta karbon dioksida. Akar tanaman berfungsi sebagai tempat melekatnya bakteri. Terdapat hubungan simbiosis mutualisme dalam proses penurunan nitrogen total ini, dimana karbondioksida dan air yang dihasilkan dari respirasi mikroba dibutuhkan oleh tanaman untuk melakukan fotosintesis. Sebaliknya, karbohidrat dan oksigen yang dihasilkan dari fotosintesis dibutuhkan oleh mikroba untuk menguraikan zat organik.

Hasil uji awal pada sampel air lindi yang dilakukan secara komposit didapatkan kadar kadmium sebesar 0,0030 mg/L, nilai tersebut sudah memenuhi standar baku mutu air lindi yaitu 0.1 mg/L. Setelah dilakukan fitoremediasi dengan tanaman *amazon frogbit* dengan variasi konsentrasi air lindi, didapatkan kadar kadmium pada seluruh konsentrasi sebesar <0,0018. Angka tersebut mengalami penurunan dari pengujian awal sebelum dilakukan fitoremediasi. Kadar kadmium yang tidak terdeteksi atau <0,0018 tersebut menunjukkan bahwa kandungan logam kadmium masih jauh di bawah baku mutu yang telah ditetapkan. Menurut Sugiarti, Haeruddin, dan Anggoro (2019), tidak terdeteksinya kandungan logam berat kadmium dapat disebabkan oleh beberapa faktor salah satunya adalah logam kadmium yang terkandung dalam air sangat kecil sehingga alat atau metode pengujian yang dilakukan tidak dapat mendeteksinya.

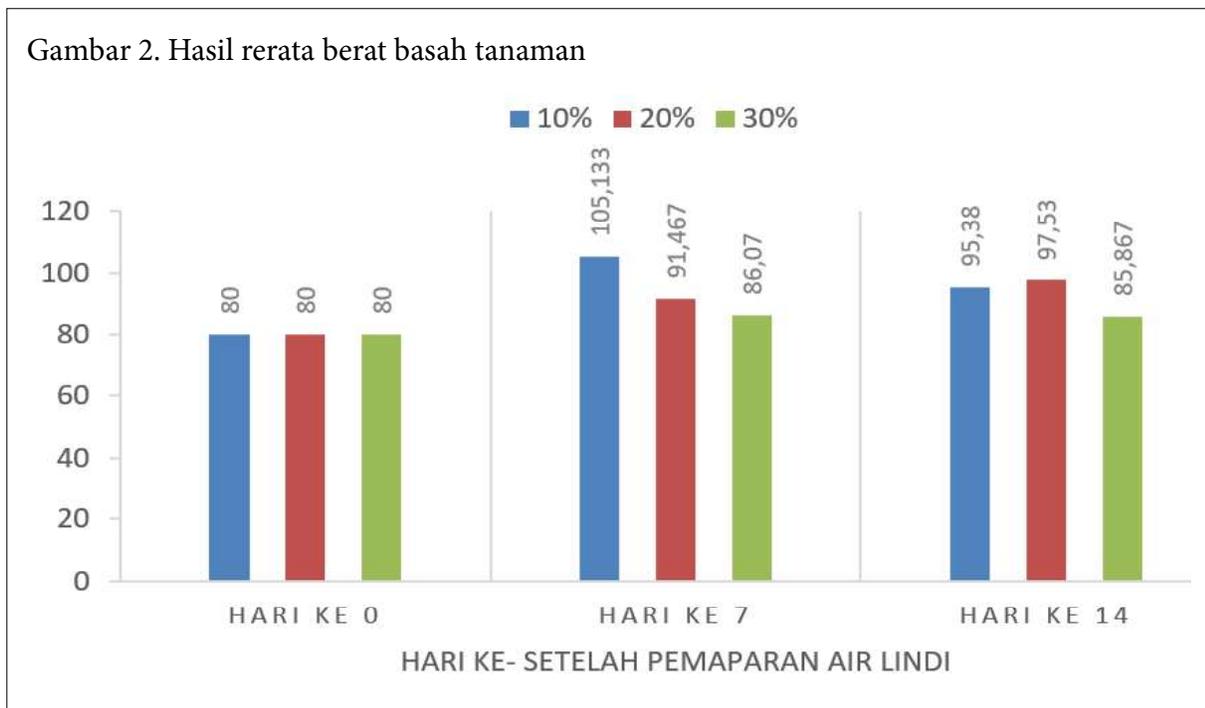
Rendahnya kadar kadmium pada sampel air lindi TPA Banyuroto sejalan dengan penelitian Afifah, Shabrina, Sobirin, dan Pratiwi (2023), yaitu sampah yang memiliki komposisi terbesar di TPA Banyuroto adalah sampah organik. Sampah didominasi oleh bahan organik yang mencapai 45.8% dari total komposisi sampah, diikuti oleh plastik, kertas, kayu, kain, kaca, dan karet. Sedangkan persentase sampah logam pada TPA Banyuroto hanya 0.9%. Menurut Fadhila dan Purwanti (2022), kadmium sering kali mencemari lingkungan sebagai hasil dari beberapa sumber, termasuk limbah dari peralatan elektronik, baterai, korosi pipa air, dan air yang meresap dari tanah pertanian yang telah terpapar oleh pupuk fosfat yang mengandung kadmium.

Pengamatan performa tanaman pada penelitian ini bertujuan untuk melihat kondisi fisik serta pertumbuhan yang terjadi pada tanaman selama masa pemaparan air lindi dengan beberapa konsentrasi. Performa tanaman *amazon frogbit* (*Hydrocharis laevigata*) yang diamati berupa jumlah daun, dan berat basah tanaman. Pengamatan performa *Amazon frogbit* pada hari ke-0, 7, dan 14 dapat dilihat berdasarkan (Gambar 1 & 2).

Gambar 1. Hasil perhitungan rerata jumlah daun



Gambar 2. Hasil rerata berat basah tanaman



Pemantauan jumlah daun merupakan hal yang sangat penting sebagai salah satu indikator pertumbuhan tanaman untuk membantu menjelaskan proses pembentukan biomassa tanaman. Pengamatan terhadap daun dapat dilakukan berdasarkan fungsinya sebagai penangkap cahaya dan perannya dalam proses fotosintesis (Argita & Mangkoedihardjo, 2016). Pada Gambar 1, terlihat bahwa jumlah daun setelah pemaparan air lindi semakin lama semakin bertambah. Ini

disebabkan tanaman *amazon frogbit* mengalami pertumbuhan yang ditandai dengan munculnya daun-daun baru. Berdasarkan hal tersebut, dapat dikatakan bahwa tanaman *amazon frogbit* tidak mengalami penurunan kinerja saat terpapar oleh air lindi. Kondisi tanaman pada saat pemaparan air lindi tumbuh dengan baik. Artinya, tanaman dapat beradaptasi pada perlakuan air lindi yang diberikan.

Menurut Marendra *et al.* (2024) berat basah digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi biomassa tanaman atau perkembangan tanaman. Pengukuran berat basah dilakukan dengan tujuan mendapatkan gambaran keseluruhan tentang pertumbuhan tanaman. Gambar 8 menunjukkan berat tanaman *amazon frogbit* selama pemaparan mengalami peningkatan pada hari ke-7 dan penurunan pada hari ke 14. Hal ini dapat terjadi karena pada daun tua mengalami klorosis (kekurangan klorofil) kemudian berkembang menjadi nekrosis (kerusakan/kematian sel-sel, jaringan, atau organ tumbuhan) dan digantikan dengan daun muda yang kecil sehingga berat tanaman menurun namun jumlah daun bertambah hingga hari ke-14. Menurut Ulfah, Asmaranty, dan Nurwahyunani (2021), gejala klorosis dan nekrosis terjadi akibat penyerapan bahan organik berlebih sehingga dapat menghambat kerja enzim yang mengkatalisis sintesis klorofil. Bahan organik berlebih tersebut dapat berasal dari limbah industri atau limbah domestik yang terlarut dan masuk ke dalam air lindi.

Pada pengamatan hari ke-14 tanaman ini juga mengalami kerontokan pada akar, hal ini dapat mengurangi berat basah tanaman. Menurut Siregar dan Lestari (2024), tingginya kadar bahan pencemar seperti COD yang tinggi dalam limbah dapat menyebabkan kerontokan akar pada tanaman. COD yang tinggi ini mengakibatkan turunnya oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh akar untuk respirasi sel. Oleh karena itu, hal ini dapat menghambat respirasi sel dan menyebabkan kerusakan pada akar tanaman. Berdasarkan (Gambar 1 dan 2) menunjukkan bahwa air lindi dengan konsentrasi 10, 20, dan 30%, tidak menghambat pertumbuhan tanaman karena tanaman mengalami peningkatan jumlah daun dan berat basah tanaman jika dibandingkan dengan hari ke-0. Hal ini didukung oleh pernyataan (Martino *et al.*, 2023), tanaman air *Hydrocharis laevigata* merupakan tanaman yang baik untuk fitoremediasi air limbah karena laju pertumbuhan populasi yang cepat dan penanganannya yang mudah. Menurut Garcia-Murillo (2023), *H. laevigata* berkembang biak secara vegetatif melalui fragmentasi segmen stolon yang menghubungkan roset daun. Dengan cara perkembangbiakannya tersebut tanaman ini dapat dengan cepat dan efisien mengkolonisasi habitat baru yang sesuai sehingga mengalami peningkatan pada berat basah tanaman.

Hasil nilai signifikansi dari uji ANOVA yang menunjukkan tidak ada pengaruh yang signifikan ($\text{sig.} > 0.05$) pada variabel performa tanaman yang meliputi jumlah daun dan berat basah. Dengan demikian, dapat diartikan bahwa perlakuan variasi konsentrasi air lindi TPA Banyuroto tidak berpengaruh secara signifikan terhadap performa tanaman *amazon frogbit*. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman tersebut mampu beradaptasi dengan baik terhadap air lindi yang mengandung senyawa-senyawa kimia hasil dekomposisi sampah dan air yang terperangkap dalam tumpukan sampah.

Tanaman *amazon frogbit* yang berfungsi sebagai tanaman fitoremediator dalam penelitian ini mampu tetap hidup, tumbuh, dan berkembang pada pemaparan air lindi. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman ini dapat mentolerir kontaminan pada air lindi TPA Banyuroto yang didominasi oleh bahan organik dan menggunakan senyawa tersebut sebagai nutrisi untuk berkembang. Sejalan dengan pernyataan ini, pemilihan spesies tanaman yang ideal untuk tujuan fitoremediasi harus bersifat kuat, menghasilkan biomassa tinggi, toleran terhadap efek racun logam dan

kontaminan, mudah dibudidayakan, dan memiliki kapasitas penyerapan tinggi (Kafle *et al.*, 2022). Spesies fitoremediasi yang paling sesuai tidak hanya perlu toleran dan menyerap logam berat secara efektif namun juga harus tumbuh cepat dengan produksi biomassa tinggi dan memberikan manfaat ekonomi (Bian, Zhong, Zhang, Yang, & Gai, 2020).

Respon positif dari tanaman *amazon frogbit* terhadap pemaparan air lindi menunjukkan potensi untuk memanfaatkan tanaman sebagai agen fitoremediasi dalam mengatasi kontaminasi pada suatu perairan. Dengan kemampuannya untuk bertahan dan tumbuh dengan baik dalam lingkungan yang terkontaminasi, tanaman *amazon frogbit* dapat menjadi solusi yang berkelanjutan dalam membersihkan air yang tercemar.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian fitoremediasi air lindi TPA Banyuroto dengan berbagai konsentrasi menggunakan tanaman *amazon frogbit* (*Hydrocharis laevigata*), dapat disimpulkan bahwa pada fitoremediasi air lindi TPA Banyuroto menggunakan tanaman *amazon frogbit* efektif pada konsentrasi air lindi 10% karena tiap parameter yang diujikan nilainya masih di bawah baku mutu yang sesuai dengan P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016. Tanaman dapat bertahan hidup di konsentrasi air lindi 10, 20, dan 30%. Performa tanaman dilihat dari jumlah daun dan berat basah tanaman mengalami peningkatan yang menunjukkan tanaman ini berpotensi sebagai fitoremediator air lindi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, N. A., Shabrina, H. M., Sobirin, A., & Pratiwi, D. (2023). Potensi sampah TPA Banyuroto Kabupaten Kulon Progo sebagai refuse derived fuel (RDF). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 08(03), 147-156. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.3.147-156>.
- Alya, F. (2022). Pengaruh waktu kontak dan bobot biomassa kangkung air (*Ipomoea aquatica*) terhadap penurunan kadar total suspended solid (TSS) air limbah rumah sakit dengan metode fitoremediasi. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 4(2), 1-8. <https://doi.org/10.35970/jppl.v4i2.1469>
- Ambia, D. (2022). *Pemanfaatan fly ash batubara sebagai adsorben pada penyerapan polutan di pengolahan air lindi TPA Blang Bintang* (Skripsi tidak diterbitkan). UIN Ar-Raniry. <https://repository.ar-raniry.ac.id/id/eprint/23124/>
- Arán, D. S., Harguinteguy, C. A., Fernandez-Cirelli, A., & Pignata, M. L. (2017). Phytoextraction of Pb, Cr, Ni, and Zn using the aquatic plant *Limnobium laevigatum* and its potential use in the treatment of wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(22), 18295-18308. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9464-9>.
- Argita, D., & Mangkoedihardjo, S. (2016). Fitoremediasi tanah inceptisols tercemar limbah laundry dengan tanaman kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). *Jurnal Purifikasi*, 16(1), 33-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.33772/jpw.v8i1.333>.
- As'ari, R. M., Syafiuddin, A., Andriansyah, A. A., & Setianto, B. (2022). Fitoremediasi air limbah tempe menggunakan tumbuhan kayu apu (*Pistia stratiotes*). *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 10(5), 564-569.
- Bian, F., Zhong, Z., Zhang, X., Yang, C., & Gai, X. (2020). Bamboo – An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 246, 125750. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125750>.

- Fadhila, D., & Purwanti, F. (2022). Kajian fikoremediasi pada air tanah tercemar timbal dan kadmium di sekitar TPA Wukirsari. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2), D34-D40. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i2.85265>.
- Fajariyah, C., & Mangkoedihardjo, S. (2017). Kajian literatur pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir sampah dengan teknik lahan basah menggunakan tumbuhan air. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), D190-D195. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25366>.
- Fletcher, J., Willby, N., Oliver, D. M., & Quilliam, R. S. (2020). Phytoremediation using aquatic plants. Dalam B. Shmaefsky (Eds), *Phytoremediation. Concepts and Strategies in Plant Sciences* (pp. 205-260). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00099-8_7.
- Garcia-Murillo, P. (2023). *Hydrocharis laevigata* in Europe. *Plants*, 12(4), 701. <https://doi.org/10.3390/plants12040701>.
- Ibrahim, M., Saufan, L. O., & Bende, L. O. S. (2023). Analisis Persebaran Lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Puuwatu. *Jurnal Perencanaan Wilayah*, 8(1), 69–79. <https://doi.org/10.33772/jpw.v8i1.333>
- Irhamni, I., Pandia, S., Purba, E., & Hasan, W. (2017). Kajian akumulator beberapa tumbuhan air dalam menyerap logam berat secara fitoremediasi. *Jurnal Serambi Engineering*, 1(2), 75-84. <https://doi.org/10.32672/jse.v1i2.498>.
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Lestari, D. P. (2021). *Estimasi nilai ekonomi penurunan kualitas lingkungan akibat adanya tempat pengolahan akhir sampah (TPAS) Banyuroto, Kabupaten Kulon Progo*. (Skripsi tidak diterbitkan). Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Marendra, S. M. P., Widiatmono, B. R., & Sari, E. (2024). Perbandingan efektivitas fitoremediasi dalam mereduksi BOD dan COD (Studi kasus: Industri Batik Alam, Pasuruan). *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 11(1), 20-29. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2024.011.01.3>.
- Rachman, R.M., Setiawati, S., & Tamburaka, R. S. E. (2023). Pemanfaatan tanaman air untuk menurunkan parameter pencemar pada Kali Kadia Kota Kendari menggunakan metode fitoremediasi. *Indonesia. AJIE (Asian Journal of Innovation and Entrepreneurship)*, 100-117. <https://doi.org/10.20885/ajie.vol7.iss3.art4>
- Martino, L. J., Fernández San Juan, M. R., & Angelo, C. D. (2023). Potential phytoremediation system using macrophyte *Limnium laevigatum* to remove in situ Cr from contaminated bottom sediments. *Environmental Technology*, 44(18), 2770-2780. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2044916>.
- Ngatimin, S. N. A., & Syatrawati. (2019). *Teknik menanggulangi pencemaran tanah pertanian di kota dan desa*. LeutikaPrio.
- Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Pramessti, T. A., & Mirwan, M. (2023). Penurunan TSS , COD , dan total-nitrogen pada air lindi dengan metode constructed wetland tanaman *Typha Angustifolia*. *Insologi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(4), 745-753. <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i4.2309>.
- Rahadian, R., Sutrisno, E., & Sumiyati, S. (2017). Efisiensi penurunan COD dan TSS dengan fitoremediasi menggunakan tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes* L). Studi kasus: Limbah laundry. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(3), 1-8.

- Rismawati, D., Thohari, I., & Rochmalia, F. (2020). Efektivitas tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes* L.) dalam menurunkan kadar BOD5 dan COD limbah cair industri tahu. *Jurnal Penelitian Kesehatan Suara Forikes*, 11(2), 186-190. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33846/sf11219>.
- Ruzzi, F., Irawan, A., & Lisha, S. Y. (2023). Uji Efektivitas Tanaman *Salvinia molesta* dan *Eichhornia crassipes* dalam Menurunkan Kadar BOD, COD, dan TSS pada Limbah Cair Tahu. *CIVED*, 10(1), 311–329.
- Sari, R. N., & Afdal. (2017).. Karakteristik air lindi di TPA Sampah Air Dingin Kota Padang. *Jurnal Fisika Unand*, 6(1), 93-99.
- Sarwono, E., Azis, W. A., & Widarti, B. N. (2017). Pengaruh variasi waktu tinggal terhadap kadar BOD, COD, dan TSS pada pengolahan lindi TPA Bukit Pinang Samarinda menggunakan sistem aerasi bertingkat dan sedimentasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 1(2), 20-26. <http://dx.doi.org/10.30872/jtlunmul.v1i2.1564>.
- Siregar, L. P. A., & Lestari, W. (2024). Kemampuan tanaman air sebagai fitoremediator limbah cair pabrik pengolahan kelapa sawit. *Jurnal Bios Logos*. 14(1), 45-54. <https://doi.org/10.35799/jbl.v14i1.52032>.
- Sugiarti, E., Haeruddin, H., & Anggoro, S. (2020). Konsentrasi logam kadmium (Cd) dalam jaringan lunak kerang simping (*Amusium pleuronectes*) dan sedimen di perairan Teluk Semarang dan hubungannya dengan tingkat kerja osmotik. *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 9(1), 57-64. <https://doi.org/10.14710/marj.v9i1.27760>
- Tan, H. W., Pang, Y. L., Lim, S., & Chong, W. C. (2023). A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*, 30(103043), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103043>.
- Ulfah, M., Asmaranty, D., & Nurwahyunani, A. (2021). The Phytoremediation potential of lotus: Degradation BOD and COD liquid coffee waste. *Bioedukasi*, 19(2), 105-109.
- Ulhaq, R. Z. (2023). *Identifikasi logam berat dan fitoremediasi menggunakan tanaman ekor kucing (Typha latifolia) pada air lindi (Studi kasus di tempat pembuangan akhir (TPA) Blang Bintang, Aceh Besar)* (Skripsi tidak diterbitkan). UIN Ar-Raniry Banda Aceh. <https://repository.ar-raniry.ac.id/id/eprint/29422/>
- Afifah, N. A., Shabrina, H. M., Sobirin, A., & Pratiwi, D. (2023). Potensi sampah TPA Banyuroto Kabupaten Kulon Progo sebagai refuse derived fuel (RDF). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 08(03), 147-156. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.3.147-156>.
- Alya, F. (2022). Pengaruh waktu kontak dan bobot biomassa kangkung air (*Ipomoea aquatica*) terhadap penurunan kadar total suspended solid (TSS) air limbah rumah sakit dengan metode fitoremediasi. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 4(2), 1-8. <https://doi.org/10.35970/jppl.v4i2.1469>
- Ambia, D. (2022). *Pemanfaatan fly ash batubara sebagai adsorben pada penyerapan polutan di pengolahan air lindi TPA Blang Bintang* (Skripsi tidak diterbitkan). UIN Ar-Raniry. <https://repository.ar-raniry.ac.id/id/eprint/23124/>
- Arán, D. S., Harguinteguy, C. A., Fernandez-Cirelli, A., & Pignata, M. L. (2017). Phytoextraction of Pb, Cr, Ni, and Zn using the aquatic plant *Limnobium laevigatum* and its potential use in the treatment of wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(22), 18295-18308. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9464-9>.

- Argita, D., & Mangkoedihardjo, S. (2016). Fitoremediasi tanah inceptisols tercemar limbah laundry dengan tanaman kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). *Jurnal Purifikasi*, 16(1), 33-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.33772/jpw.v8i1.333>.
- As'ari, R. M., Syafiuddin, A., Andriansyah, A. A., & Setianto, B. (2022). Fitoremediasi air limbah tempe menggunakan tumbuhan kayu apu (*Pistia stratiotes*). *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 10(5), 564-569.
- Bian, F., Zhong, Z., Zhang, X., Yang, C., & Gai, X. (2020). Bamboo – An untapped plant resource for the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chemosphere*, 246, 125750. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125750>.
- Fadhila, D., & Purwanti, F. (2022). Kajian fikoremediasi pada air tanah tercemar timbal dan kadmium di sekitar TPA Wukirsari. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2), D34-D40. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i2.85265>.
- Fajariyah, C., & Mangkoedihardjo, S. (2017). Kajian literatur pengolahan lindi tempat pemrosesan akhir sampah dengan teknik lahan basah menggunakan tumbuhan air. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2), D190-D195. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25366>.
- Fletcher, J., Willby, N., Oliver, D. M., & Quilliam, R. S. (2020). Phytoremediation using aquatic plants. Dalam B. Shmaefsky (Eds), *Phytoremediation. Concepts and Strategies in Plant Sciences* (pp. 205-260). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00099-8_7.
- Garcia-Murillo, P. (2023). *Hydrocharis laevigata* in Europe. *Plants*, 12(4), 701. <https://doi.org/10.3390/plants12040701>.
- Ibrahim, M., Saufan, L. O., & Bende, L. O. S. (2023). Analisis Persebaran Lindi Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Puuwatu. *Jurnal Perencanaan Wilayah*, 8(1), 69–79. <https://doi.org/10.33772/jpw.v8i1.333>
- Irhamni, I., Pandia, S., Purba, E., & Hasan, W. (2017). Kajian akumulator beberapa tumbuhan air dalam menyerap logam berat secara fitoremediasi. *Jurnal Serambi Engineering*, 1(2), 75-84. <https://doi.org/10.32672/jse.v1i2.498>.
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Lestari, D. P. (2021). *Estimasi nilai ekonomi penurunan kualitas lingkungan akibat adanya tempat pengolahan akhir sampah (TPAS) Banyuroto, Kabupaten Kulon Progo*. (Skripsi tidak diterbitkan). Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Marendra, S. M. P., Widiatmono, B. R., & Sari, E. (2024). Perbandingan efektivitas fitoremediasi dalam mereduksi BOD dan COD (Studi kasus: Industri Batik Alam, Pasuruan). *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 11(1), 20-29. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2024.011.01.3>.
- Martino, L. J., Fernández San Juan, M. R., & Angelo, C. D. (2023). Potential phytoremediation system using macrophyte *Limnium laevigatum* to remove in situ Cr from contaminated bottom sediments. *Environmental Technology*, 44(18), 2770-2780. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2044916>.
- Ngatimin, S. N. A., & Syatrawati. (2019). *Teknik menanggulangi pencemaran tanah pertanian di kota dan desa*. LeutikaPrio.
- Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

- Pramesti, T. A., & Mirwan, M. (2023). Penurunan TSS , COD , dan total-nitrogen pada air lindi dengan metode constructed wetland tanaman *Typha Angustifolia*. *Insologi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(4), 745-753. <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i4.2309>.
- Rachman, R.M., Setiawati, S., & Tamburaka, R. S. E. (2023). Pemanfaatan tanaman air untuk menurunkan parameter pencemar pada Kali Kadia Kota Kendari menggunakan metode fitoremediasi. *Indonesia. AJIE (Asian Journal of Innovation and Entrepreneurship)*, 100-117. <https://doi.org/10.20885/ajie.vol7.iss3.art4>
- Rahadian, R., Sutrisno, E., & Sumiyati, S. (2017). Efisiensi penurunan COD dan TSS dengan fitoremediasi menggunakan tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes* L). Studi kasus: Limbah laundry. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(3), 1-8.
- Rismawati, D., Thohari, I., & Rochmalia, F. (2020). Efektivitas tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes* L.) dalam menurunkan kadar BOD5 dan COD limbah cair industri tahu. *Jurnal Penelitian Kesehatan Suara Forikes*, 11(2), 186-190. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33846/sf11219>.
- Ruzzi, F., Irawan, A., & Lisha, S. Y. (2023). Uji Efektivitas Tanaman *Salvinia molesta* dan *Eichhornia crassipes* dalam Menurunkan Kadar BOD, COD, dan TSS pada Limbah Cair Tahu. *CIVED*, 10(1), 311–329.
- Sari, R. N., & Afdal. (2017).. Karakteristik air lindi di TPA Sampah Air Dingin Kota Padang. *Jurnal Fisika Unand*, 6(1), 93-99.
- Sarwono, E., Azis, W. A., & Widarti, B. N. (2017). Pengaruh variasi waktu tinggal terhadap kadar BOD, COD, dan TSS pada pengolahan lindi TPA Bukit Pinang Samarinda menggunakan sistem aerasi bertingkat dan sedimentasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 1(2), 20-26. <http://dx.doi.org/10.30872/jtlunmul.v1i2.1564>.
- Siregar, L. P. A., & Lestari, W. (2024). Kemampuan tanaman air sebagai fitoremediator limbah cair pabrik pengolahan kelapa sawit. *Jurnal Bios Logos*. 14(1), 45-54. <https://doi.org/10.35799/jbl.v14i1.52032>.
- Sugiarti, E., Haeruddin, H., & Anggoro, S. (2020). Konsentrasi logam kadmium (Cd) dalam jaringan lunak kerang simping (*Amusium pleuronectes*) dan sedimen di perairan Teluk Semarang dan hubungannya dengan tingkat kerja osmotik. *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 9(1), 57-64. <https://doi.org/10.14710/marj.v9i1.27760>
- Tan, H. W., Pang, Y. L., Lim, S., & Chong, W. C. (2023). A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*, 30(103043), 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103043>.
- Ulfah, M., Asmaranty, D., & Nurwahyunani, A. (2021). The Phytoremediation potential of lotus: Degradation BOD and COD liquid coffee waste. *Bioedukasi*, 19(2), 105-109.
- Ulhaq, R. Z. (2023). *Identifikasi logam berat dan fitoremediasi menggunakan tanaman ekor kucing (Typha latifolia) pada air lindi (Studi kasus di tempat pembuangan akhir (TPA) Blang Bintang, Aceh Besar)* (Skripsi tidak diterbitkan). UIN Ar-Raniry Banda Aceh). <https://repository.ar-raniry.ac.id/id/eprint/29422/>