Efektivitas Kemampuan Isolat Bakteri menggunakan Wetland dalam Pengolahan Polutan Air Lindi di IPAL TPA Piyungan

Erdina Trisna Mukti[1], Nurun Nailis Sa'adah[1], Joni Aldilla Fajri[1,2*], Tito Naufal Bhyantoro[2], Fetria Hikmawati Susilo[2], Fina Muyassarah[2]

[1] Program Studi Teknik Lingkungan Program Magister, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584.
[2] Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584.

*Korespondensi: 165131306@uii.ac.id

Abstrak. Air lindi merupakan salah satu sumber pencemar utama dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang mengandung bahan organik dan anorganik dengan konsentrasi tinggi, sehingga berpotensi menurunkan kualitas lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan bakteri dalam menurunkan konsentrasi pencemar utama air lindi, yaitu COD, warna, dan amonia. Isolat bakteri yang digunakan berasal dari tanah sekitar TPA dan air lindi, dengan perlakuan tambahan berupa aerasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan dengan bakteri mampu menurunkan kadar COD secara signifikan dari 3170 mg/L, sejalan dengan penurunan intensitas warna, terutama pada perlakuan dengan konsorsium bakteri. Penurunan amonia terjadi lebih lambat dibandingkan COD dan warna, namun perlakuan dengan aerasi memperlihatkan efektivitas lebih tinggi dibanding tanpa aerasi. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan konsorsium bakteri, khususnya dengan dukungan kondisi aerobik, merupakan pendekatan potensial dalam menurunkan kandungan pencemar pada air lindi, meskipun pengolahan lanjutan masih diperlukan agar memenuhi baku mutu lingkungan.

Kata Kunci: air lindi, bakteri, biodegradasi, bioremediasi, wetland

1. PENDAHULUAN

Pengolahan limbah lindi lebih dari sekedar respon terhadap permasalahn lingkungan yang diciptakan oleh pengelolaan limbah, namun kebutuhan mendasar bagi keberlanjutan lingkungan dan kesehatan publik. Air limbah lindi merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang cukup serius di Indonesia, terutama di area sekitar tempat pembuangan akhir (TPA) sampah. Air lindi dihasilkan dari proses perkolasi air hujan dan kelembaban yang menembus tumpukan sampah, mengakibatkan ekstraksi senyawa terlarut dan tersuspensi yang memiliki konsentrasi tinggi dari berbagai material organic, logam berat, serta patogen berbahaya. Karakteristik yang mencolok pada limbah lindi adalah kandungan organik yang tinggi, sifat asam yang mencemari tanah dan

sumber air di sekitarnya, serta membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem . Menurut penelitian sebelumnya, kandungan organik nitrogen yang tinggi dalam air limbah lindi dapat menyebabkan eutrofikasi pada badan air, yang berdampak negatif pada ekosistem perairan dan kesehatan manusia. Penanganan air limbah lindi ini menjadi tantangan bagi pemerintah dan masyarakat, yang membutuhkan pendekatan inovatif untuk mengurangi dampak buruknya. Salah satu metode yang mulai diterapkan dalam pengolahan limbah lindi adalah phytoremediasi, dimana tanaman digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan polutan dari lingkungan.

Pemanfaatan sistem hibrida wetland yang mengintegrasikan constructed wetland (CW) dan floating treatment wetland (FTW) menunjukkan efektivitas tinggi dalam menghilangkan polutan. Selain itu, dengan adanya proses pretreatment, dampak beban air limbah terhadap wetland dapat diminimalkan, diharapkan akan menurunkan tingkat toksisitas pada air limbah lindi.

Air lindi yang dihasilkan dari tempat pembuangan akhir (TPA) sampah mengandung berbagai polutan yang sangat berbahaya bagi lingkungan. Kandungan zat pencemar dalam air lindi, seperti bahan organik, logam berat, dan senyawa anorganik, sering kali melebihi baku mutu yang ditetapkan untuk limbah cair. Penelitian menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti jenis dan komposisi sampah serta kondisi iklim secara signifikan mempengaruhi konsentrasi polutan dalam air lindi. Misalnya, menurut Suprihatin et al. (2019) air lindi umumnya memiliki kandungan bahan organik, seperti Chemical Oxygen Demand (COD) dan Biochemical Oxygen Demand (BOD), serta amonium yang tinggi, sehingga memerlukan pengolahan yang cermat untuk mengurangi dampak lingkungan negatifnya (Suprihatin et al., 2019). Selain itu, Jauhary et al. mencatat bahwa di TPA Ngipik, kandungan BOD dan COD dalam air lindi melebihi baku mutu, mencerminkan perlunya intervensi dalam sistem pengolahan (Jauhary et al., 2023).

Kualitas air lindi berpotensi berbahaya tidak hanya karena kadar bahan organik yang tinggi, tetapi juga karena adanya logam berat. Penelitian oleh Nofiyanto et al. menunjukkan bahwa air lindi di TPA Jatibarang mengandung amonia-nitrogen dan logam berat yang signifikan, menciptakan tantangan besar dalam pengelolaan dan remediasi (Nofiyanto et al., 2019). Pengujian toksisitas air lindi yang dilakukan oleh Maulidia et al. juga menunjukkan potensi risiko signifikan bagi organisme akuatik, yang dapat mencemari ekosistem perairan sekitar (Maulidia et al., 2023).

Model pengolahan yang digunakan untuk menanggulangi air lindi, seperti metode elektrokoagulasi-adsorbsi yang dianalisis oleh Takwanto et al., menunjukkan efektivitas dalam menurunkan kadar polutan, tetapi ini belum sepenuhnya menyelesaikan masalah toksisitas (Takwanto et al., 2018). Penelitian ini menekankan bahwa perlu adanya pemantauan yang berkualitas dalam penanganan air lindi agar memperhitungkan komposisi kimiawi yang bervariasi, yang tidak hanya meliputi parameter BOD dan COD, tetapi juga logam berat dan senyawa berbahaya lainnya (Said & Hartaja, 2018).

Air lindi, yang dihasilkan dari proses dekomposisi sampah di tempat pemrosesan akhir (TPA), dapat menyebabkan dampak yang sangat merugikan bagi lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Salah satu dampak utama adalah pencemaran sumber air baik permukaan maupun tanah. Air lindi mengandung berbagai polutan berbahaya, seperti logam berat, senyawa organik, dan bahan-bahan berbahaya lainnya (Maulidia et al., 2023; Afifah & Retnaningrum, 2023). Jika air lindi ini dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan yang memadai, ia dapat mencemari badan air, mengganggu ekosistem akuatik, dan berpotensi menyebabkan kematian pada organisme yang hidup di dalamnya seperti ikan dan makhluk hidup air lainnya. Penelitian menunjukkan bahwa kepadatan polutan dalam air lindi dapat mengakibatkan peningkatan tingkat toksisitas,

menciptakan risiko bagi spesies akuatik, serta ekologinya secara keseluruhan (Kartikasari et al., 2020).

Dampak negatif lainnya adalah terhadap kesehatan masyarakat. Pencemaran akibat air lindi dapat menyebabkan berbagai penyakit yang berasal dari patogen serta unsur kimia yang berbahaya. Masyarakat yang tinggal di sekitar TPA yang tidak diolah akan terpapar risiko ini, yang dapat berujung pada masalah kesehatan jangka panjang, termasuk gangguan pernapasan dan penyakit kulit (Afifah & Retnaningrum, 2023, Fadhila & Purwanti, 2022). Keberadaan logam berat, seperti timbal dan kadmium, dalam air lindi dapat menimbulkan risiko karsinogenik bagi manusia (Afifah & Retnaningrum, 2023, Fadhila & Purwanti, 2022).

Tidak hanya itu, air lindi yang meresap ke dalam tanah juga dapat memperburuk kualitas tanah, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi hasil pertanian dan kesehatan tanaman Jauhary et al., (2023), Jatmoko et al., (2021). Pencemaran tanah menurunkan kesuburan tanah dan dapat mengakibatkan akumulasi logam berat dalam rantai makanan, sehingga mempengaruhi kesehatan manusia yang mengonsumsi tanaman tersebut (Afifah & Retnaningrum, 2023; Fadhila & Purwanti, 2022). Oleh karena itu, pengolahan air lindi yang efektif di TPA sangat penting untuk melindungi lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Penanganan yang tidak adekuat terhadap air lindi tidak hanya memperburuk kondisi lingkungan tetapi juga berdampak pada biodiversitas dan ekosistem secara keseluruhan Jauhary et al., (2023). Fenomena ini mempertegas perlunya manajemen limbah yang lebih baik dan teknologi pengolahan yang sesuai agar dapat mengurangi dampak buruk air lindi (Kartikasari et al., 2020; Jauhary et al., 2023); dengan pengolahan yang tepat, potensi bahaya terhadap lingkungan dapat diminimalisir dan kualitas lingkungan dapat diperbaiki.

Pengolahan air lindi merupakan aspek penting dalam manajemen limbah yang efektif mengingat potensi pencemarannya yang dapat berdampak pada lingkungan, dan berbagai metode telah dikembangkan dengan kelebihan serta keterbatasannya masing-masing. Kolam aerasi yang dikombinasikan dengan wetland dapat meningkatkan proses biologis dan filtrasi alami, namun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti iklim, sebagaimana terlihat pada studi kasus TPA Ngipik di mana terjadi kegagalan operasional dan hasil efluen masih jauh dari baku mutu (Jauhary et al., 2023). Metode oksidasi lanjut seperti Foto-Fenton terbukti efisien dalam menurunkan COD, tetapi membutuhkan biaya tinggi untuk bahan kimia serta pengelolaan residu yang kompleks (Lesa et al., 2020).

Alternatif ramah lingkungan seperti fitoremediasi mampu menurunkan BOD dan COD secara signifikan, meskipun membutuhkan waktu lebih lama dan bergantung pada kesesuaian spesies tanaman (Fajariyah & Mangkoedihardjo, 2017; Rahmawati et al., 2022). Metode elektrokoagulasi efektif dalam menurunkan COD dan TSS, namun menghadapi kendala berupa tingginya konsumsi energi dan kebutuhan penggantian elektroda secara berkala (Fadhila & Purnama, 2022). Adsorpsi dengan karbon aktif juga menunjukkan hasil baik, tetapi regenerasi karbon aktif yang diperlukan menambah biaya dan kompleksitas operasional (Maulidya et al., 2022; Sari & Sudarno, 2019). Pendekatan terbaru, seperti Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), mengombinasikan proses biologis dengan efisiensi tinggi, tetapi memerlukan pemeliharaan ketat untuk mencegah penumpukan biofilm dan biaya instalasi yang relatif besar (Imania & Herumurti, 2018). Secara keseluruhan, meskipun berbagai metode pengolahan air lindi menunjukkan potensi yang menjanjikan, tantangan finansial dan operasional menegaskan pentingnya pemilihan teknik yang sesuai dengan kondisi spesifik lokasi guna mencapai pengelolaan lindi yang berkelanjutan.

Biodegradasi adalah suatu proses alami di mana mikroorganisme, termasuk bakteri, jamur, dan protozoa, memecah bahan organik menjadi komponen yang lebih sederhana, yang pada gilirannya dapat digunakan kembali oleh ekosistem. Proses ini penting dalam pengelolaan limbah organik, termasuk limbah rumah tangga, industri, dan pertanian, karena dapat mengurangi jumlah limbah yang harus diolah secara kimia atau fisik dan meminimalkan dampak lingkungan (Rahmi & Shovitri, 2017; Azmi et al., 2019).

Kelebihan dari metode biodegradasi mencakup sifatnya yang ramah lingkungan. Proses ini memanfaatkan mikroorganisme yang tersedia secara alami, sehingga mengurangi kebutuhan akan bahan kimia berbahaya yang sering digunakan dalam proses pengolahan limbah konvensional (Azmi et al., 2019). Selain itu, biodegradasi dapat menjadikan limbah sebagai sumber energi, misalnya melalui produksi biogas dari limbah organik, yang berpotensi menyediakan alternatif energi terbarukan (Bantacut & Fitriani, 2019). Metode ini juga dapat mengurangi pencemaran tanah dan air karena produk akhir dari biodegradasi biasanya lebih aman bagi lingkungan dibandingkan dengan residu dari metode pengolahan lainnya (Ilafi et al., 2024).

Di sisi lain, terdapat pula kekurangan dalam penggunaan metode biodegradasi. Proses ini sering kali memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan teknologi pengolahan limbah lain, seperti elektrokoagulasi atau filtrasi (Sulistyaningsih & Rachmanto, 2023). Proses biodegradasi juga sangat tergantung pada kondisi lingkungan, seperti suhu, pH, dan kelembaban, yang dapat mempengaruhi efisiensi dan kecepatan degradasi (Athikoh et al., 2021). Selain itu, tidak semua jenis limbah organik dapat terdegradasi dengan efektif oleh mikroorganisme, terutama senyawa-senyawa yang bersifat toksik atau kompleks (Rahmi & Shovitri, 2017).

Dalam konteks pengolahan limbah domestik, penelitian menunjukkan bahwa metode biodegradasi dapat diaplikasikan untuk mengolah limbah dengan cara yang lebih ekonomis dan berkelanjutan (Bantacut & Fitriani, 2019; Kurniawati & Sanuddin, 2020). Misalnya, penelitian oleh Kurniawati dan Sanuddin menunjukkan bahwa limbah cair dari proses industri, jika dikelola dengan baik melalui biodegradasi, dapat memenuhi standar kualitas lingkungan dan tidak berdampak negatif pada kesehatan masyarakat (Kurniawati & Sanuddin, 2020).

Secara keseluruhan, metodologi biodegradasi menawarkan pendekatan yang berkelanjutan untuk mengelola limbah, meskipun ada tantangan tertentu yang perlu diatasi untuk meningkatkan efektivitasnya dalam konteks yang lebih luas. Pengembangan teknologi dan pengelolaan yang efisien akan sangat penting dalam memaksimalkan potensi biodegradasi sebagai metode pengolahan ramah lingkungan (Azmi et al., 2019; Hastuti et al., 2014).

Degradasi air lindi menggunakan bakteri merupakan area penelitian yang semakin penting terkait pengelolaan limbah. Air lindi adalah hasil leachate dari tempat pembuangan akhir (TPA) yang mengandung campuran senyawa organik dan anorganik hasil dekomposisi limbah. Proses biodegradasi menggunakan mikroorganisme, khususnya bakteri, telah terbukti efektif dalam mengurangi beban pencemaran pada air lindi dan meningkatkan kesehatan lingkungan.

Liu et al. menjelaskan bahwa perlakuan biologis dapat menghilangkan sebagian besar senyawa organik terlarut dalam air lindi, seperti bahan organik terlarut (BOD), yang menunjukkan potensi biodegradabilitas yang tinggi (Liu et al., 2012). Selain itu, mereka mencatat bahwa mikroorganisme dapat berfungsi secara lebih efektif dalam proses ini, mengubah senyawa organik kompleks menjadi produk yang lebih sederhana yang dapat didegradasi lebih lanjut (Liu et al., 2012). Kemampuan bakteri untuk mendegradasi senyawa ini sangat bervariasi tergantung pada jenis bakteri serta komposisi zat pencemar yang ada dalam air lindi tersebut (Obute et al., 2024).

Santos et al. menjelaskan bahwa aplikasi air lindi yang terpilih dapat menyebabkan perubahan dalam kondisi tanah dan fenomena denitrifikasi berkontribusi dalam mengurangi konsentrasi amonia, yang menciptakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme denitrifikasi (Santos et al., 2013). Hal ini menyoroti peranan penting bakteri dalam proses pengolahan serta stabilisasi air lindi.

Stamps et al. menegaskan bahwa tempat pembuangan akhir memiliki keanekaragaman mikrobioma yang unik, yang berpotensi membantu dalam degradasi senyawa pencemar (Stamps et al., 2016). Mereka mencatat bahwa pendekatan berbasis kultur yang diarahkan dan metagenomik dapat meningkatkan pemahaman kita mengenai kapasitas metabolik bakteri yang belum teridentifikasi yang dapat mendukung proses degradasi di lingkungan pembuangan limbah.

Lebih lanjut, penelitian oleh Yang et al. mengenai komunitas bakteri dalam air lindi dari pemulihan bangkai hewan menunjukkan bahwa komunitas bakteri ini berubah seiring waktu, dan mengindikasikan bahwa mikroba oportunistik dapat berkembang selama dekomposisi, mempengaruhi komposisi bahan organik dan mikroba lokal (Yang et al., 2017; Yang et al., 2015). Hasil-hasil ini menggarisbawahi pentingnya pemantauan dan karakterisasi komunitas bakteri dalam pengelolaan air lindi.

Secara keseluruhan, penggunaan bakteri dalam proses degradasi air lindi menawarkan pendekatan yang ramah lingkungan dan efektif untuk mengurangi pencemaran. Dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme, metode ini berpotensi untuk mengolah air lindi menjadi sumber yang lebih aman bagi lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi bakteri yang mampu mendegradasi senyawa organik dalam air lindi dari tempat pembuangan akhir, sekaligus meningkatkan efisiensi pengolahan limbah melalui pemanfaatan mikroorganisme sebagai alternatif ramah lingkungan dibandingkan metode kimia konvensional. Diharapkan penelitian ini dapat menunjukkan pengurangan signifikan konsentrasi pencemar, seperti BOD dan COD, setelah perlakuan bakterial, serta menghasilkan pemetaan komunitas mikrobial yang memberikan wawasan tentang keanekaragaman dan potensi bakteri dalam biodegradasi. Selain itu, temuan penelitian diharapkan mampu memberikan rekomendasi pengembangan teknologi pengolahan limbah berbasis mikroorganisme dan prosedur operasional yang lebih berkelanjutan, sehingga penerapan teknik biodegradasi dapat mengurangi dampak pencemaran tanah dan air serta meningkatkan kualitas ekosistem di sekitar lokasi pembuangan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Isolasi Bakteri

Penelitian ini menggunakan isolat bakteri yang diisolasi dari air lindi, tanah, dan tanaman di sekitar IPAL TPA Piyungan yang rinciannya dapat dilihat pada Tabel 1. Isolasi bakteri tanah dan tanaman mengacu penelitian Shehzadi et al. (2016) dengan beberapa modifikasi.

Sampel tanah 2 gram diekstraksi dengan 30 mL NaCl 0,9% dan dihomogenkan menggunakan stirer dengan kecepatan 200 rpm selama 20 menit. Sedangkan untuk sampel air lindi dilakukan penyaringan terlebih dahulu. Endapan yang tertahan di kertas saring diekstraksi seperti sampel tanah. Hasil air lindi yang telah disaring dan hasil ekstraksi sampel tanah serta endapan tersebut diencerkan hingga 10^{-6} dan 100 µL dituangkan pada cawan petri yang berisi media selektif (10 mL *Nutrient Agar* dengan 10% air lindi steril) dan diinkubasi pada suhu 30°C selama 48 jam.

Sampel tanaman perlu disterilkan dahulu sebelum diekstraksi. Akar tanaman 5 gram dibersihkan dengan ethanol 70% selama 10 menit, kemudian dicuci dengan 50 mL NaOCl 1% dan 50 mL larutan tween 20 0,01% selama 1 menit. Selanjutnya akar dicuci dengan aquades steril selama 1 menit sebanyak 3 kali. Air bilasan terakhir dicek pada media *Luria Bertani* (LB) untuk menguji sterilnya permukaan akar. Jika hasil pengujian tersebut masih tumbuh bakteri, maka dilakukan pencucian ulang hingga tidak ada bakteri yang tumbuh. Akar yang telah steril kemudian dihaluskan dengan lumpang dan alu dan dilarutkan dengan 20 mL NaCl 0,9%. Hasil ekstraksi tersebut diencerkan hingga 10^{-6} dan 100 µL dituangkan pada cawan petri yang berisi media selektif (10 mL LB dengan 10% air lindi steril) dan diinkubasi pada suhu 30℃ selama 48 jam.

2.2 Kulturisasi Bakteri

Bakteri yang tumbuh kemudian dipilih berdasarkan perbedaan morfologi dari segi bentuk, margin, *elevation*, dan warna. Sebanyak 7 bakteri tanah, 2 bakteri endofit, 3 bakteri air lindi dan 1 bakteri dari endapan air lindi dipilih untuk diujikan pada air lindi dan diobservasi kemampuannya dalam menurunkan polutan. Bakteri terpilih tersebut dikultur pada tube yang berisi media *Lactosa Broth* 25 mL dan diinkubasi dalam *water bath shaker* dengan suhu 30℃ pada kecepatan 100 rpm selama 48 jam. Media yang sudah keruh dalam tube kemudian disentrifuge pada kecepatan 7000 g untuk memisahkan antara padatan dan cairan media. Setelah padatan mengendap pada dasar tube, cairan media dibuang dan diresuspensi dengan NaCl 0,9%.

2.3 Pengoperasian Reaktor

Sistem pengolahan dilakukan dengan sistem *batch* selama 19 hari dengan variasi reaktor yang terdiri dari reaktor kontrol, pengolahan dengan beberapa bakteri, serta pengolahan kombinasi bakteri dan aerasi. Rincian variasi reaktor tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi reaktor uji pengolahan air lindi

Reaktor	Keterangan/ Sumber Bakteri
Kontrol	
K	Kontrol air limbah
KA	Kontrol air limbah + aerasi
Pengolahan dengan bakteri dari tanah	
T1	Tanah di sekitar outlet IPAL TPA Piyungan
T2	Tanah di sekitar outlet IPAL TPA Piyungan
T3	Tanah di sekitar outlet IPAL TPA Piyungan
T4	Tanah di sekitar outlet IPAL TPA Piyungan
TF1	Tanah dari reaktor FTW yang mengolah air lindi
TF2	Tanah dari reaktor FTW yang mengolah air lindi
TF3	Tanah dari reaktor FTW yang mengolah air lindi
Pengolahan dengan bakteri endofit	
A	Akar *Amaranthus viridis* di dekat bak ekualisasi IPAL TPA Piyungan
AF	Akar *Typha latifolia* dari reaktor FTW yang mengolah air lindi
Pengolahan dengan bakteri dari air lindi + aerasi	
AL1	Air lindi di bak ekualisasi IPAL TPA Piyungan
AL2	Air lindi di bak ekualisasi IPAL TPA Piyungan
AL3	Air lindi di bak ekualisasi IPAL TPA Piyungan
EL	Endapan air lindi di bak ekualisasi IPAL TPA Piyungan

Reaktor pengolahan dibuat dari gelas kaca dengan ukuran diameter 9,5 cm dan tinggi 12,5 cm. Air limbah yang diuji sebanyak 350 mL per reaktor dengan konsentrasi 25%. Sedangkan volume kultur bakteri yang dimasukkan ke reaktor yaitu 20 mL.

2.4 Analisis Fisika-kimia Air Lindi

Parameter fisika-kimia yang diuji terdiri dari parameter utama dan parameter harian. Parameter utama meliputi *chemical oxygen demand* (COD), warna, dan amonia yang diuji setiap seminggu sekali. Sedangkan untuk parameter harian yang diuji yaitu pH, suhu, *electrical conductivity* (EC), *total dissolved solid* (TDS), dan *oxidation reduction potential* (ORP). Metode yang dilakukan untuk menganalisis parameter tersebut mengacu pada Standar Nasional Indonesia yang berlaku.

2.5 Analisis Statistik

Data kualitas air lindi dari hasil proses pengolahan dilakukan uji ANOVA (*analysis of variance*) dan *Tukey post hoc* menggunakan *software* IBM SPSS 25 untuk menganalisis perbedaan signifikan antar variasi pengolahan pada tingkat signifikansi 5%.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Karakteristik Air Lindi

Karakteristik awal air lindi 25% disajikan pada Tabel 2. Secara umum, air lindi memiliki karakteristik kandungan bahan organik tinggi yang ditandai dengan tingginya nilai COD (3170 mg/L) dan kandungan anorganik yang tinggi seperti amonia (3431,76 mg/L). Parameter warna juga menunjukkan kandungan yang tinggi. Parameter tersebut masih melebihi baku mutu yang berlaku, hal ini berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Selain itu, air lindi juga memiliki nilai DO yang rendah yaitu 0,11 mg/L, hal ini menunjukkan tingginya bahan organik yang belum terurai sehingga oksigen terlarut cepat habis.

Tabel 2. Karakteristik awal air lindi 25%

Parameter	Satuan	Nilai	Baku Mutu*
pH	-	8,88	6 – 9
EC	µS/cm	3420	NG
TDS	mg/L	1710	NG
Suhu	℃	24,30	NG
DO	mg/L	0,11	NG
ORP	mV	-303	NG
Warna	Pt-Co	1266,11	200
Amonia	mg/L	3431,76	8
COD	mg/L	3170	150

*Baku mutu berdasarkan PeMenLHK RI Nomor 16 Tahun 2019

Tabel 3. Perbandingan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu

Parameter	Hasil Penelitian (2024)	Renou et al. (2008)	Kurniawan et al. (2010)
pH	8,88 (6–9)	4,5 – 9	4,5 – 9
COD (mg/L)	3170	2000 – 60.000	2300 – 54.000
NH_3–N (mg/L)	3431,76	10 – 800	30 – 2000
DO (mg/L)	0,11	<0,5	<0,5
Warna (Pt-Co)	1266,11	Tinggi	Tinggi
Suhu (°C)	24,3	20 – 35	25 – 30

Dari Tabel 3, dapat dianalisis, karakteristik awal air lindi pada penelitian ini menunjukkan nilai COD sebesar 3170 mg/L dan amonia (NH_3–N) sebesar 3431,76 mg/L, dengan warna 1266,11 Pt-Co dan DO sangat rendah (0,11 mg/L). Nilai COD tersebut masih berada dalam kisaran bawah yang dilaporkan oleh Renou et al. (2008) dan Kurniawan et al. (2010) yang melaporkan COD lindi mencapai ribuan hingga puluhan ribu mg/L. Namun demikian, konsentrasi amonia yang terukur dalam penelitian ini jauh lebih tinggi dibandingkan laporan sebelumnya. Dengan demikian, hasil penelitian ini mengindikasikan terjadinya akumulasi nitrogen anorganik yang lebih tinggi, suatu karakteristik yang umum pada lindi tua (aged leachate).

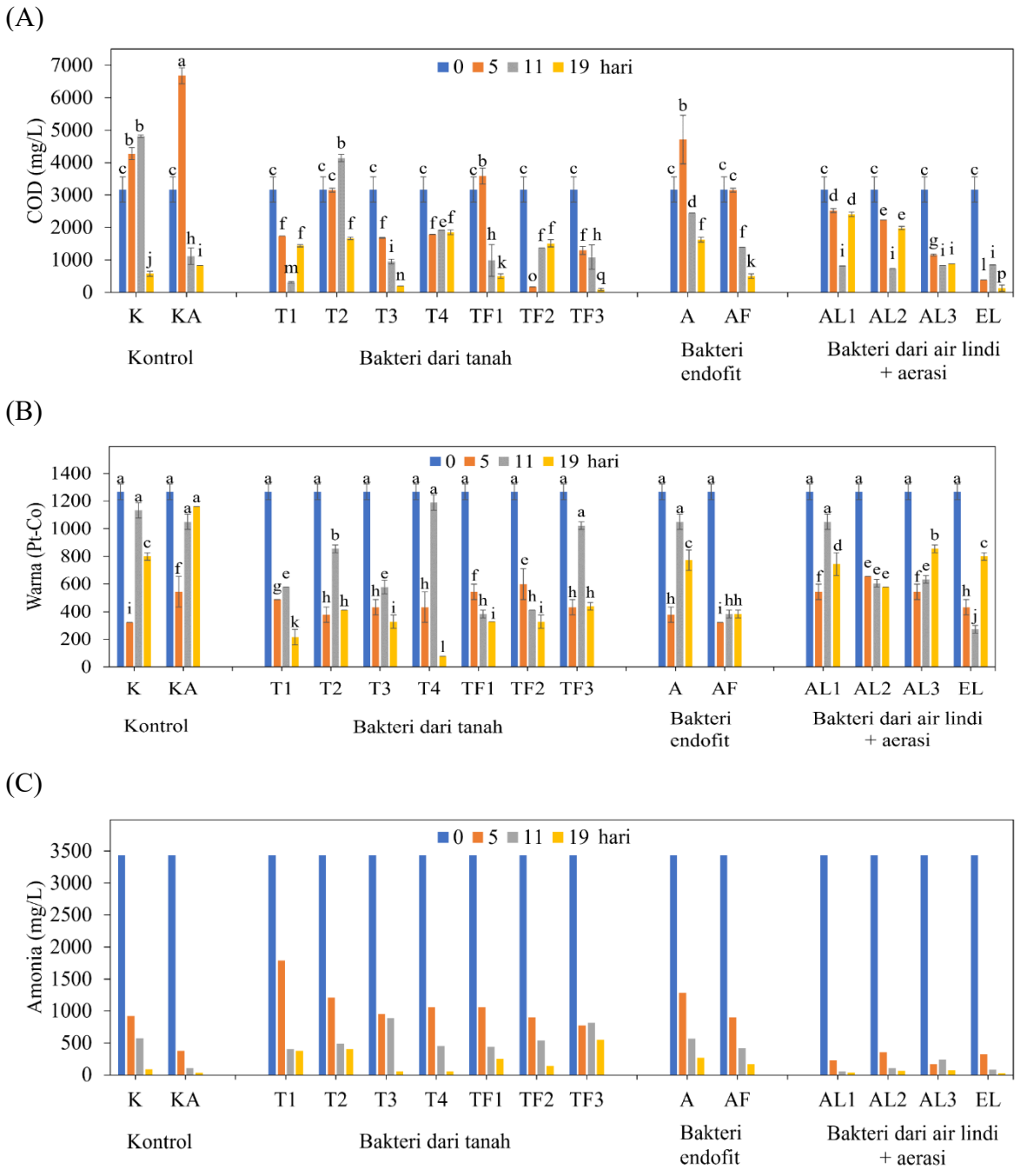
Tingginya warna serta rendahnya DO menunjukkan bahwa senyawa organik dan anorganik dalam lindi masih dalam jumlah signifikan, sehingga konsumsi oksigen berlangsung cepat dan membatasi ketersediaan oksigen terlarut di dalam air (Renou et al., 2008). Kondisi ini menandakan bahwa pengolahan air lindi memerlukan pendekatan yang mampu menurunkan beban nitrogen dan senyawa organik kompleks secara efektif. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa meskipun nilai COD masih dalam kisaran umum yang dilaporkan dalam literatur, konsentrasi amonia yang sangat tinggi menjadi parameter pembeda utama. Hal ini menunjukkan perlunya fokus pada teknologi pengolahan yang menargetkan reduksi amonia, seperti nitrifikasi-denitrifikasi atau kombinasi proses biologis dan kimia, untuk memastikan kualitas air lindi memenuhi baku mutu dan tidak menimbulkan potensi pencemaran serius terhadap lingkungan.

3.2 Evaluasi Kemampuan Bakteri dalam Mendegradasi Polutan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan dengan bakteri mampu menurunkan parameter pencemar utama pada air lindi, yaitu COD, warna, dan amonia, dengan efektivitas yang berbeda-beda. Penurunan COD terjadi secara signifikan, terutama pada perlakuan menggunakan isolat bakteri dari tanah (T1–T4, TF1–TF3) dan bakteri dari air lindi dengan aerasi (AL1–AL3). Hal ini mengindikasikan bahwa bakteri heterotrofik berperan dominan dalam mengoksidasi bahan organik terlarut, sebagaimana juga dipenelitian Kurniawan et al. (2010), yang menemukan bahwa isolat bakteri dari tanah mampu mendegradasi senyawa organik kompleks dalam lindi secara efektif. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung bukti bahwa pendekatan biologi dapat diandalkan dalam menurunkan beban organik pada air lindi.

Selain itu, parameter warna juga mengalami penurunan bertahap selama periode inkubasi. Penurunan ini mencerminkan degradasi senyawa kromoforik dan aromatik, yang umumnya berasal dari senyawa humik dan fulvik pada lindi tua. Tren ini sejalan dengan temuan Renou et al. (2008) yang menyebutkan bahwa degradasi senyawa aromatik berkontribusi terhadap berkurangnya intensitas warna. Perlakuan kombinasi bakteri (TF1–TF3) menunjukkan efektivitas lebih tinggi, mendukung studi Yang et al. (2015) yang menekankan pentingnya sinergi mikroba

dalam memecah senyawa kompleks yang sulit diuraikan secara individu. Hal ini memperlihatkan bahwa penggunaan konsorsium mikroba dapat meningkatkan efisiensi proses bioremediasi.



Gambar 1. Penurunan konsentrasi COD (A), warna (B), dan amonia (C) oleh beberapa perlakuan. Setiap nilai merupakan rerata dari dua ulangan dan *error bar* merupakan standar error. Huruf yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan pada tingkat signifikansi 5%.

Di sisi lain, penurunan amonia berlangsung lebih lambat dibanding COD dan warna. Fenomena ini konsisten dengan penelitian Kurniawan et al. (2010), yang menyatakan bahwa senyawa nitrogen anorganik pada lindi cenderung lebih persisten dan memerlukan waktu lebih lama untuk terurai. Meski demikian, perlakuan dengan aerasi terbukti mempercepat penurunan kadar amonia, yang menguatkan teori bahwa kondisi aerobik mendukung proses nitrifikasi oleh bakteri nitrifikasi. Dengan demikian, walaupun perlakuan biologi menunjukkan potensi yang besar, pengolahan tambahan khusus nitrogen tetap diperlukan agar konsentrasi akhir memenuhi baku mutu lingkungan sesuai PermenLHK No. P.16/2019.

4. KESIMPULAN

Air lindi memiliki kandungan bahan organik dan anorganik yang sangat tinggi (COD 3170 mg/L dan amonia 3431,76 mg/L) serta DO rendah (0,11 mg/L), sehingga berpotensi mencemari lingkungan. Perlakuan biologi dengan isolat bakteri mampu menurunkan COD dan warna secara signifikan, terutama pada perlakuan dengan konsorsium bakteri. Penurunan amonia berlangsung lebih lambat, namun perlakuan dengan aerasi mempercepat proses nitrifikasi sehingga menurunkan konsentrasi amonia lebih efektif. Konsorsium bakteri dengan dukungan kondisi aerobik terbukti menjadi metode potensial dalam pengolahan lindi, tetapi pengolahan tambahan tetap diperlukan agar kualitas akhir memenuhi baku mutu lingkungan (PermenLHK No. P.16/2019).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang mendukung penelitian ini.

REFERENSI

Afifah, F., & Retnaningrum, E. (2023). Isolasi dan identifikasi bakteri dekontaminasi logam berat timbal (Pb) dari tempat pengelolaan sampah terpadu (TPST) Piyungan, Bantul, Yogyakarta. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan, 10*(3), 126–133. https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2023.010.03.4

Agung Rachmanto, T., Ulfah Farahdiba, A., Hanggararas Sasdika, A., & Elok Arohmah, N. (2022). Pengaruh pH dan substrat terhadap nilai kinetika pertumbuhan bakteri *Pseudomonas sp.* dan *Bacillus sp.* pada pengolahan limbah cair batik. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan, 14*(2), 144–151. https://doi.org/10.33005/envirotek.v14i2.256

Alan, O., Jung, K., Lamba, H. R., & Verardo, J. C. (2023). A bioaugmentation approach for efficient total nitrogen reduction in landfill leachate. *Journal of Waste Management & Recycling Technology*. https://doi.org/10.47363/JWMRT/2023(1)118

Athikoh, N., Gunawan, G., & Nur, M. (2021). Pengolahan limbah cair tekstil dengan proses oksidasi menggunakan ozon gelembung mikro. *Arena Tekstil, 36*(2). https://doi.org/10.31266/at.v36i2.6688

Azmi, K., Danumihardja, I., & Said, N. (2019). Aplikasi teknologi pengolahan air limbah domestik menggunakan kombinasi biofilter aerobik media plastik sarang tawon dan biofilter media kerikil dengan aliran ke atas. *Jurnal Air Indonesia, 10*(2). https://doi.org/10.29122/jai.v10i2.3760

Bantacut, T., & Fitriani, A. (2019). Keseimbangan biomassa dan pemanenan energi pada pengolahan limbah cair kelapa sawit. *Jurnal Teknologi Lingkungan, 20*(1), 83–91. https://doi.org/10.29122/jtl.v20i1.2929

Darussalam, A. B. (2024). *Seleksi bakteri endogenik dan endofit pengolahan limbah lindi menggunakan floating wetland dalam menurunkan kadar COD dan TSS* [Undergraduate thesis, Universitas Islam Indonesia].

Dell'Osbel, N., et al. (2020). Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: Increased nutrient removal and landscape potential. *Ecological Engineering, 158*, 106072. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106072

Fadhila, A., & Purnama, H. (2022). Pengaruh jarak elektroda dan tegangan terhadap efektivitas pengolahan air lindi dengan metode elektrokoagulasi-adsorpsi zeolit. *Jurnal Teknik Kimia USU, 11*(1), 21–27. https://doi.org/10.32734/jtk.v11i1.8284

Fadhila, D., & Purwanti, I. (2022). Kajian fikoremediasi pada air tanah tercemar timbal dan kadmium di sekitar TPA Wukirsari, Gunungkidul. *Jurnal Teknik ITS, 11*(2). 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). https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25366

Hastuti, E., Medawati, I., & Darwati, S. (2014). Kajian penerapan teknologi biofilter skala komunal untuk memenuhi standar perencanaan pengolahan air limbah domestik. *Jurnal Standardisasi, 16*(3), 205–213. https://doi.org/10.31153/js.v16i3.196

Ilafi, A., Azkiya, N., & Taufiqi, R. (2024). Penggunaan limbah cair di equalizer ZA-II (limbah produksi amonium sulfat) sebagai penetral limbah asam di produksi sulfuric acid (SA-I). *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi, 10*(1), 316–321. https://doi.org/10.33795/distilat.v10i1.4900

Imania, A., & Herumurti, W. (2018). Pengolahan lindi menggunakan moving bed biofilm reactor (MBBR) dengan pre-treatment kimiawi untuk menurunkan konsentrasi organik dan nitrogen. *Jurnal Teknik ITS, 7*(1). https://doi.org/10.12962/j23373539.v7i1.29051

Jatmoko, M., Adinda, A., Siregar, F., Dalimunthe, R., Sari, M., & Pertama, I. (2021). Perencanaan proses pengolahan lindi di TPA Nusa Lembongan dengan menggunakan kolam stabilisasi. *Jurnal Teknik Pengairan, 12*(2), 165–173. https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2021.012.02.08

Jauhary, A., Auvaria, S., & Nengse, S. (2023). Redesain instalasi pengolahan air lindi di TPA Ngipik, Kecamatan Gresik, Kabupaten Gresik. *Environmental Engineering Journal ITATS, 3*(2), 80–94. https://doi.org/10.31284/j.envitats.2023.v3i2.3865

Kartikasari, I., Widyastuti, M., & Hadisusanto, S. (2020). Pengujian toksisitas lindi instalasi pengolahan lindi TPA Piyungan pada *Daphnia sp.* dengan whole effluent toxicity. *Jurnal Ilmu Lingkungan, 18*(2), 297–304. https://doi.org/10.14710/jil.18.2.297-304

Khairani, D., Rasyidah, R., & Mayasari, U. (2024). Potensi penggunaan eco enzyme dan *Bacillus cereus* dalam bioremediasi limbah air lindi. *Spizaetus: Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi, 5*(3), 409–418. https://doi.org/10.55241/spibio.v5i3.433

Kurniawan, T. A., Lo, W. H., & Chan, G. Y. S. (2010). Physico–chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials, 129*(1–3), 80–100. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.010

Kurniawati, E., & Sanuddin, M. (2020). Metode filtrasi dan adsorpsi dengan variasi lama kontak dalam pengolahan limbah cair batik. *Riset Informasi Kesehatan, 9*(2), 126–133. https://doi.org/10.30644/rik.v9i2.452

Lesa, W., Ali, M., & Rosariawari, F. (2020). Proses foto-Fenton dalam reaktor resirkulasi untuk menyisihkan beban pencemar pada lindi. *Jukung: Jurnal Teknik Lingkungan, 6*(1). https://doi.org/10.20527/jukung.v6i1.8239

Liu, L., Wei, D., Yu, P., Liu, T., Zhang, T., & Xia, X. (2012). Experimental research on treatment of landfill leachate with efficient microorganisms. *Advanced Materials Research, 518–523*, 3363–3366. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.518-523.3363

Ma, C., Qiao, Y., Bin, L., & Yao, Y. (2021). Performance of hybrid-constructed floating treatment wetlands in purifying urban river water: A field study. *Ecological Engineering, 171*, 106372. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106372

Maulidia, B., Pramadita, S., & Jumiati, J. (2023). Uji toksisitas air lindi TPA Batu Layang, Kota Pontianak terhadap ikan nila (*Oreochromis niloticus*) dengan metode uji renewal test. *Jurnal Reka Lingkungan, 11*(2), 162–172. https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v11i2.162-172

Maulidya, Y., Rudiyansyah, R., & Wahyuni, N. (2022). Adsorpsi senyawa organik pada lindi menggunakan cangkang kerang ale-ale (*Meretrix meretrix*) secara batch. *Chimica et Natura Acta, 9*(3). https://doi.org/10.24198/cna.v9.n3.35607

Nofiyanto, E., Soeprobowati, T., & Izzati, M. (2019). Fikoremediasi kualitas lindi TPA Jatibarang terhadap efektivitas *Lemna minor* L. dan *Ipomoea aquatica* Forsk. *Jurnal Ilmu Lingkungan, 17*(1), 107–112. https://doi.org/10.14710/jil.17.1.107-112

Obute, C., Ofon, U., Dunkwu-Okafor, A., Ndubuisi-Nnaji, U., & Amaowoh, U. (2024). Dynamics in physicochemical and bacteriological properties of simulated leachate from dump site soil in Ikhueniro, Benin City, Edo State, Nigeria. *UMYU Journal of Microbiology Research, 9*(2), 66–74. https://doi.org/10.47430/ujmr.2492.007

Rahmawati, A., Noerhayati, E., Sholikhin, G., & Sahroni, M. (2022). Perencanaan sistem lahan basah buatan dalam pengolahan limbah cair domestik menggunakan tanaman *Cyperus papyrus*. *Jurnal Envirotek, 14*(2), 164–168. https://doi.org/10.33005/envirotek.v14i2.231

Rahmi, D., & Shovitri, M. (2017). Pengaruh *Bacillus* PL01 dan monosodium glutamat terhadap bakteri indigenous pasir dalam mendegradasi plastik. *Jurnal Sains dan Seni ITS, 6*(2). https://doi.org/10.12962/j23373520.v6i2.25997

Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunities. *Journal of Hazardous Materials, 150*(3), 468–493. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077

Said, N., & Hartaja, D. (2018). Pengolahan air lindi dengan proses biofilter anaerob-aerob dan denitrifikasi. *Jurnal Air Indonesia, 8*(1). https://doi.org/10.29122/jai.v8i1.2380

Santos, C., Panchoni, L., Bini, D., Kuwano, B., Carmo, K., Silva, S., & Nogueira, M. (2013). Land application of municipal landfill leachate: Fate of ions and ammonia volatilization. *Journal of Environmental Quality, 42*(2), 523–531. https://doi.org/10.2134/jeq2012.0170

Sari, A., & Sudarno, S. (2019). Integrasi pengolahan air limbah lindi hitam dengan COD dan TSS tinggi dari proses pembuatan bioetanol. *Jurnal Ilmu Lingkungan, 17*(1), 100–106. https://doi.org/10.14710/jil.17.1.100-106

Shehzadi, M., Fatima, K., Imran, A., Mirza, M. S., Khan, Q. M., & Afzal, M. (2016). Ecology of bacterial endophytes associated with wetland plants growing in textile effluent for pollutant

degradation and plant growth promotion potentials. *Plant Biosystems, 150*(6), 1261–1270. https://doi.org/10.1080/11263504.2015.1022238

Stamps, B., Lyles, C., Suflita, J., Masoner, J., Cozzarelli, I., Kolpin, D., & Stevenson, B. (2016). Municipal solid waste landfills harbor distinct microbiomes. *Frontiers in Microbiology, 7*, 534. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00534

Sulistyaningsih, A., & Rachmanto, T. (2023). Peningkatan efektivitas elektrokoagulasi dan fotokatalis pada proses degradasi limbah batik. *Envirous, 1*(1), 9–15. https://doi.org/10.33005/envirous.v1i1.17

Suprihatin, M., Yani, D., Yani, M., & Ratnasari, D. (2019). Penyisihan polutan dari air lindi tempat pembuangan sampah dengan metode presipitasi struvite: Pengaruh dosis presipitan dan pH. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian, 29*(2), 205–212. https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2019.29.2.205

Surabhi Singh. (2022). Wastewater pretreatment methods for constructed wetland: A review. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology, 9*(3), 40–47. https://doi.org/10.31033/ijrasb.9.3.8

Susanti, O., Yusuf, M. W., & Elisdiana, Y. (2021). Potensi bakteri endofit lamun *Enhalus sp.* dengan aktivitas antimikrofouling dari perairan Lampung. *Journal of Marine Research, 10*(4), 589–594. https://doi.org/10.14710/jmr.v10i4.32286

Takwanto, A., Mustain, A., & Sudarminto, H. (2018). Penurunan kandungan polutan pada lindi dengan metode elektrokoagulasi-adsorpsi karbon aktif. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan, 2*(1), 11–16. https://doi.org/10.33795/jtkl.v2i1.37

Yadav, S., Kumar, J., Malyan, S. K., Singh, R., Singh, O., Goyal, V. C., Singh, J., & Negi, R. (2023). Evaluating pilot-scale floating wetland for municipal wastewater treatment using *Canna indica* and *Phragmites australis* as plant species. *Sustainability, 15*(18), 13601. https://doi.org/10.3390/su151813601

Yang, S., Ahn, H., Kim, B., Chang, S., Chung, K., Lee, E., & Kwon, E. (2017). Comparison of bacterial communities in leachate from decomposing bovine carcasses. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 30*(11), 1660–1666. https://doi.org/10.5713/ajas.17.0553

Yang, S., Lim, J., Khan, M., Kim, B., Choi, D., Lee, E., & Ahn, H. (2015). High-throughput nucleotide sequence analysis of diverse bacterial communities in leachates of decomposing pig carcasses. *Genetics and Molecular Biology, 38*(3), 373–380. https://doi.org/10.1590/s1415-475738320140252