

Analisis Potensi Mangrove Sebagai Fitoremediator Nutrien (Nitrogen Dan Fosfor) Pada Limbah Tambak Udang Di Area Pesisir Desa Legung

Moh J Royhan Mawardi¹, Akhmad Ferdiansyah^{2*}

¹Mahasiswa Program studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Annuqayah

²Dosen Program studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Annuqayah

*Corresponding Email: akhmad0n7@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Submitted 03-Agustus-2026

Received 07-Agustus-2026

Published 15-Agustus-2026

Keywords:

Bioaccumulation; Mangrove
Effectiveness;
Phytoremediation; Nutrient;
Shrimp Pond

Kata Kunci:

Bioakumulasi; Efektivitas
Mangrove; Fitoremediasi;
Nutrien; Tambak Udang

ABSTRACT

*Mangrove ecosystems have considerable potential as natural phytoremediation agents for treating shrimp aquaculture wastewater, yet their effectiveness in narrow buffer zones located close to pond outlets remains poorly understood. This study addresses that gap by integrating water quality assessment, phytoremediation efficiency, and nutrient bioaccumulation mechanisms of two dominant mangrove species *Lumnitzera racemosa* and *Avicennia marina* within a single, spatially confined coastal transition zone in Legung Village, Sumenep Regency. A natural experimental approach was used, comparing water quality and plant nutrient content across four zones along the wastewater flow path. The mangrove zone reduced phosphate concentrations very effectively (>97%) but was markedly less effective for ammonia (14.88%), while the two species showed contrasting nutrient-partitioning strategies: root retention in *Lumnitzera Racemosa* versus active stem translocation in *Avicennia marina*. These findings provide practical guidance for designing species-based, tiered mangrove buffer zones as a nature-based approach to managing shrimp pond wastewater in narrow coastal transition areas.*

ABSTRAK

Ekosistem mangrove berpotensi besar sebagai agen fitoremediasi alami untuk mengolah limbah budidaya udang, namun efektivitasnya pada zona penyangga yang sempit dan berdekatan dengan outlet tambak masih belum banyak dipahami. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui integrasi evaluasi kualitas air, efisiensi fitoremediasi, dan mekanisme *bioakumulasi nutrien* pada dua spesies mangrove dominan *Lumnitzera racemosa* dan *Avicennia marina* di kawasan transisi pesisir sempit Desa Legung, Kabupaten Sumenep. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen alami, membandingkan kualitas air dan kandungan nutrien tanaman pada

empat zona sepanjang aliran limbah. Zona mangrove terbukti sangat efektif menurunkan fosfat (>97%) namun jauh kurang efektif untuk amonia (14,88%), sementara kedua spesies menunjukkan strategi partisi hara yang kontras: retensi di akar pada *Lumnitzera Racemosa* versus translokasi aktif ke batang pada *Avicennia marina*. Temuan ini memberikan panduan praktis untuk merancang zona penyangga mangrove bertingkat berbasis spesies sebagai pendekatan berbasis alam dalam pengelolaan limbah tambak udang di kawasan transisi pesisir di desa Legung, kabupaten Sumenep yang sempit.

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki ekosistem mangrove terluas di dunia dengan lebih dari 20% luas mangrove global serta keanekaragaman hayati yang sangat tinggi (Galimberti, 2020). Namun, tingginya tekanan antropogenik, seperti alih fungsi lahan, deforestasi, dan pencemaran, terus mengancam keberlanjutan ekosistem tersebut. Arifanti et al. (2022) melaporkan bahwa Indonesia kehilangan sekitar 182.091 ha mangrove selama periode 2009–2019, yang turut meningkatkan emisi karbon akibat perubahan tutupan lahan. Kondisi ini menunjukkan bahwa upaya konservasi belum sepenuhnya mampu mengimbangi laju degradasi, sehingga diperlukan strategi pengelolaan berbasis karakteristik kawasan pesisir (Ferdiansyah & Ali, 2024).

Salah satu sumber tekanan utama berasal dari budidaya udang intensif yang menghasilkan limbah kaya nitrogen dan fosfor akibat rendahnya efisiensi pemanfaatan pakan (Jumraeni et al., 2020). Akumulasi kedua unsur tersebut berpotensi menurunkan kualitas perairan melalui proses eutrofikasi yang memicu pertumbuhan alga berlebihan dan penurunan oksigen terlarut sehingga mengganggu keseimbangan ekosistem pesisir (Mahmud et al., 2013; Yusal et al., 2025). Oleh karena itu, amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$) dan fosfat (PO_4^{3-}) dipilih sebagai parameter utama karena keduanya merupakan indikator penting pencemaran nutrien sekaligus penentu keberhasilan upaya pengendalian kualitas air (Dermawan et al., 2026).

Mangrove berperan sebagai penyaring alami melalui mekanisme fitoremediasi, yaitu penyerapan, akumulasi, dan transformasi nutrien dengan dukungan aktivitas mikroorganisme di daerah rizosfer (Khotimah et al., 2024; Zul, 2026). Meskipun demikian, efektivitas fungsi tersebut dipengaruhi oleh karakteristik spesies mangrove, kondisi hidrologi, serta konfigurasi zona penyangga antara sumber limbah dan perairan terbuka. Dengan demikian, kemampuan fitoremediasi mangrove tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh kawasan pesisir.

Desa Legung, Kabupaten Sumenep, merupakan salah satu kawasan pesisir dengan aktivitas budidaya udang berbasis *open system* yang menghasilkan aliran limbah langsung menuju kawasan mangrove. Berbeda dengan lokasi yang memiliki sabuk hijau mangrove yang luas, zona mangrove di Desa Legung relatif sempit dan berada sangat dekat dengan outlet tambak. Kondisi ini menimbulkan pertanyaan mengenai sejauh mana zona transisi yang

terbatas tersebut masih mampu mereduksi beban nutrien sebelum limbah memasuki perairan pesisir.

Penelitian terdahulu umumnya mengevaluasi kemampuan mangrove dalam mengakumulasi logam berat (Hamzah & Setiawan, 2010; MacFarlane et al., 2007) atau hanya menilai penurunan kualitas air tanpa menghubungkannya dengan mekanisme bioakumulasi pada organ tanaman. Selain itu, sebagian besar penelitian dilakukan pada kawasan mangrove yang relatif luas sehingga belum menggambarkan kondisi zona transisi yang sempit dan berdekatan dengan outlet tambak. Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian mengenai bagaimana efektivitas fitoremediasi nutrien anorganik ($\text{NH}_3\text{-N}$ dan PO_4^{3-}) dipengaruhi oleh karakteristik zona mangrove yang terbatas serta bagaimana distribusi akumulasi nutrien pada organ mangrove berkontribusi terhadap proses tersebut.

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya mengkaji mangrove pada kawasan sabuk hijau luas atau berfokus pada akumulasi logam berat (Hamzah & Setiawan, 2010; MacFarlane et al., 2007), penelitian ini dilakukan pada kondisi yang belum banyak dikaji: zona mangrove sempit yang berbatasan langsung dengan outlet tambak udang open system, sebagaimana dijumpai di Desa Legung. Karakteristik lokasi ini menjadikan penelitian relevan untuk menjawab pertanyaan praktis apakah sabuk hijau yang terbatas masih mampu berfungsi sebagai biofilter efektif. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi tiga aspek yang belum banyak dikaji secara bersamaan pada kondisi zona transisi sempit tersebut, yaitu analisis kualitas air limbah, evaluasi efisiensi fitoremediasi, dan identifikasi mekanisme bioakumulasi nitrogen serta fosfor pada organ mangrove. Secara ilmiah, temuan ini berkontribusi pada pengembangan konsep fitoremediasi nutrien berbasis karakteristik spesies dan konfigurasi zona penyangga, yang dapat menjadi acuan dalam mendesain sistem biofilter mangrove pada kawasan pesisir dengan luasan terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis karakteristik kualitas air limbah tambak udang berdasarkan parameter $\text{NH}_3\text{-N}$, PO_4^{3-} , pH, salinitas, dan suhu; (2) mengevaluasi efektivitas zona mangrove dalam mereduksi konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ dan PO_4^{3-} ; serta (3) mengidentifikasi distribusi akumulasi nutrien pada akar, batang, dan daun spesies mangrove di kawasan pesisir Desa Legung. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah bagi pengelolaan limbah tambak udang berbasis ekosistem mangrove serta mendukung penyusunan strategi konservasi dan pengelolaan kualitas perairan pesisir yang lebih efektif dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *natural experiment* (eksperimen alami), yaitu studi observasional yang memanfaatkan variasi kondisi lingkungan yang terjadi secara alami tanpa manipulasi terhadap variabel penelitian (Sampling Design of Ecological Experiments, 2022). Penelitian dilaksanakan di kawasan pesisir Desa Legung, Kecamatan Batang-Batang, Kabupaten Sumenep, Jawa Timur, dengan rancangan komparatif-

spasial yang membandingkan kualitas air dan akumulasi nutrien pada empat zona pengamatan: T0 (kontrol/laut terbuka), T1 (outlet tambak udang), T2 (zona mangrove), dan T3 (pasca mangrove), masing-masing dengan tiga titik ulangan (total 12 titik sampel air). Parameter kualitas air diukur in-situ meliputi pH (pH meter digital), salinitas (refraktometer), dan suhu (termometer digital), sementara $\text{NH}_3\text{-N}$, dan N-Total dianalisis dengan metode Spektrofotometer UV-Vis, serta PO_4^{3-} dan P-Total dengan metode asam askorbat, keduanya di Laboratorium Terpadu Universitas Trunojoyo Madura. Sampel organ mangrove (akar, batang, daun) diambil secara purposive pada dua spesies dominan di T2 untuk analisis kandungan nutrien internal.

Analisis data dilakukan bertahap: uji asumsi normalitas (*Shapiro-Wilk*) dan homogenitas varians (*Levene's Test*), dilanjutkan uji beda antar zona menggunakan One-Way ANOVA (jika asumsi terpenuhi) atau Kruskal-Wallis (jika tidak), dengan uji *post-hoc* Tukey HSD; perhitungan *removal efficiency* untuk menilai reduksi nutrien oleh zona mangrove berdasarkan formula Metcalf & Eddy, 2014; serta analisis bioakumulasi melalui Bioconcentration Factor ($\text{BCF} = \text{C organ} / \text{C sedimen}$, mg/g dan mg/kg berat kering), dengan kategori $\text{BCF} > 1.000$ (*hyperaccumulator*), 100–1.000 (akumulator kuat), 10–100 (akumulator sedang), dan < 10 (akumulator lemah) (Alloway, 2013), serta Translocation Factor ($\text{TF} = \text{C organ atas} / \text{C akar}$), di mana $\text{TF} > 1$ mengindikasikan translokasi aktif nutrien ke bagian atas tanaman (strategi fitodegradasi) dan $\text{TF} < 1$ menunjukkan nutrien tertahan di zona perakaran (strategi fitoekstraksi) (MacFarlane et al., 2007).

Alat yang digunakan dalam penelitian ini dibedakan menjadi alat lapangan dan alat laboratorium. Alat lapangan meliputi GPS, kamera, meteran, botol sampel, pH meter digital, thermometer digital, DO meter, refraktometer, gunting, pisau, alat tulis, dan kantong plastik. Alat laboratorium meliputi spektrofotometer UV-Vis, oven, timbangan analitik, blender, ayakan mesh 200, erlenmeyer, pipet volume, desikator, pipet tetes, gelas ukur, labu ukur, mortar dan pestle, hot plate, dan shaker.

Bahan yang digunakan meliputi sampel air limbah tambak udang, sampel jaringan mangrove (akar, batang, dan daun), aquades bebas amonia, larutan H_2SO_4 pekat, larutan NaOH 0,5 N, larutan fenol 10%, larutan natrium nitroprusida 0,5%, natrium hipoklorit (NaOCl), reagen asam askorbat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), antimonium kalium tartrat, ammonium molibdat, larutan H_2O_2 , larutan KCl 2 M, kertas saring Whatman No. 42, ammonium klorida (NH_4Cl) sebagai bahan standar $\text{NH}_3\text{-N}$, serta kalium dihidrogen fosfat (KH_2PO_4) sebagai bahan standar PO_4^{3-} .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Instrumen dan Kurva Kalibrasi

Sebelum analisis sampel dilakukan, validasi instrumen spektrofotometer UV-Vis dilakukan melalui penyusunan kurva kalibrasi untuk memastikan akurasi dan presisi pengukuran konsentrasi nutrien. Kurva kalibrasi berfungsi sebagai acuan konversi nilai absorbansi menjadi konsentrasi sebenarnya menggunakan persamaan regresi linear, sehingga

hasil pengukuran dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Suatu kurva kalibrasi dinyatakan valid apabila nilai koefisien determinasi (R^2) $\geq 0,995$, yang menunjukkan bahwa hubungan antara konsentrasi standar dan absorbansi bersifat linear dan dapat digunakan. Nilai koefisien $\text{NH}_3\text{-N}$ yang diperoleh adalah sebesar 0,9993 dan untuk PO_4^{3-} sebesar 0,9957. Kedua nilai R^2 tersebut memenuhi persyaratan validitas kurva kalibrasi yaitu $R^2 \geq 0,995$, sehingga dinyatakan VALID dan dapat digunakan untuk mengkonversi nilai absorbansi menjadi konsentrasi nutrien dengan persamaan $C = (A - a) / b$.

Analisis Kualitas Air Limbah Tambak Udang di Desa Legung

Analisis kualitas air limbah tambak udang dilakukan dengan mengukur beberapa parameter fisika-kimia pada empat zona pengambilan sampel, yaitu T0 (zona kontrol/laut terbuka), T1 (outlet tambak udang), T2 (zona mangrove), dan T3 (pasca mangrove). Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kondisi awal air limbah sebelum melewati zona mangrove sekaligus mengamati perubahan konsentrasi nutrien dan parameter pendukung lainnya sepanjang aliran dari sumber pencemar menuju pesisir terbuka. Seluruh nilai parameter kemudian dibandingkan dengan baku mutu air laut untuk biota laut sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 guna menilai tingkat kesesuaian kondisi perairan.

Hasil pengukuran parameter fisika-kimia pada sampel air limbah menunjukkan bahwa air limbah tambak udang di area pesisir Desa Legung memiliki karakteristik yang khas sebagai dampak dari aktivitas budidaya tambak udang semi-intensif. Nilai pH di seluruh titik sampling berkisar antara 7,40–7,95, berada dalam kisaran netral hingga sedikit basa yang masih mendukung kehidupan biota perairan. Nilai pH pada T1 (7,40) yang sedikit lebih rendah dibandingkan T0 (7,66) dapat dikaitkan dengan peningkatan aktivitas dekomposisi bahan organik sisa pakan dan feses udang di kolam tambak yang menghasilkan CO_2 dan asam organik (Supono, 2018; Toan et al., 2025). Penurunan salinitas yang signifikan dari T0 (48,13 ms) ke T1 (31,43 ms) menunjukkan bahwa air limbah tambak memiliki kadar garam yang lebih rendah dibandingkan air pesisir alami, berkaitan dengan sistem pengelolaan air tambak yang menggunakan tambahan air tawar. Salinitas pada T2 dan T3 yang relatif stabil (22,87 dan 23,13 ms) mengindikasikan bahwa zona mangrove berperan sebagai penyangga kondisi fisik perairan. Suhu air relatif stabil di seluruh titik pengamatan, berkisar antara 27,10–27,23 °C, sehingga tidak menjadi faktor pembatas bagi proses biologis fitoremediasi. Kondisi fisik perairan yang dinamis ini berbanding lurus dengan konsentrasi nutrisi berupa amonia ($\text{NH}_3\text{-N}$) dan fosfat (PO_4^{3-}). Konsentrasi amonia tertinggi terdeteksi pada titik T1 (Outlet) sebesar 3,50 mg/L dan fosfat sebesar 1,12 mg/L akibat akumulasi sisa pakan. Namun, setelah melewati vegetasi mangrove pada T2 dan T3, konsentrasi kedua unsur hara tersebut menurun drastis hingga mencapai kadar terendah masing-masing sebesar 2,98 mg/L dan 0,01 mg/L. Hal ini mengindikasikan adanya mekanisme penyerapan dan penyaringan unsur hara yang optimal oleh ekosistem mangrove di kawasan pesisir tersebut.

Nilai Dissolved Oxygen (DO) pada T1 (2,24 mg/L) merupakan yang terendah di antara seluruh titik sampling, jauh di bawah ambang batas baku mutu air laut untuk biota laut sebesar 5 mg/L sesuai KepMen LH No. 51 Tahun 2004. Rendahnya DO pada outlet tambak disebabkan oleh tingginya beban bahan organik yang memerlukan banyak oksigen untuk proses dekomposisi, sejalan dengan karakteristik limbah tambak udang semi-intensif (Maysabila et al., 2023, Abdul Wafi, Heri Ariadi, 2025). Nilai DO yang meningkat kembali pada T2 (2,99 mg/L) dan T3 (3,31 mg/L) menunjukkan adanya kontribusi aktivitas fotosintesis vegetasi mangrove dalam meningkatkan oksigen terlarut di perairan pasca-mangrove.

Amonia dalam bentuk $\text{NH}_3\text{-N}$ merupakan parameter kualitas air yang paling banyak ditemukan dalam limbah tambak udang karena sifatnya yang berdampak secara langsung terhadap biota perairan bahkan pada konsentrasi rendah. Pengukuran konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ di setiap zona bertujuan untuk memetakan sebaran dan perubahan kadar amonia mulai dari sumber pencemar T1 (outlet tambak) hingga T0 (pesisir terbuka) setelah melewati T3 (zona mangrove). Perbandingan antar zona juga digunakan untuk menilai apakah terjadi penurunan konsentrasi yang signifikan secara statistik sebagai dampak dari fungsi biofilter mangrove.

Konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ tertinggi ditemukan pada T1 (3,50 mg/L), melebihi baku mutu air limbah budidaya yang ditetapkan sebesar 0,3 mg/L (PP No. 22 Tahun 2021). Tingginya konsentrasi amonia pada zona outlet tambak merupakan konsekuensi langsung dari proses ekskresi nitrogen pada udang, di mana hanya sekitar 25–35% nitrogen pakan dimanfaatkan untuk pertumbuhan biomassa, sedangkan sisanya diekskresi ke kolom air dalam bentuk amonia (Cao et al., 2025).

Uji asumsi menunjukkan konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ pada seluruh zona berdistribusi normal (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$) dengan varians yang homogen (Levene's test, $p = 0,238$), sehingga analisis dilanjutkan dengan One-Way ANOVA. Hasil ANOVA menunjukkan perbedaan konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ yang signifikan antar zona sampling ($F = 5,040$; $df = 3,8$; $p = 0,030$). Uji lanjut Tukey HSD mengonfirmasi bahwa perbedaan signifikan hanya terjadi antara T1 (outlet tambak) dan T3 (pasca mangrove) (selisih rerata = 0,527 mg/L; $p = 0,031$), sementara pasangan zona lainnya tidak berbeda signifikan meskipun menunjukkan kecenderungan penurunan yang konsisten dari T1 menuju T3.

Pola konsentrasi PO_4^{3-} menunjukkan dinamika yang lebih dramatis, dengan nilai sangat tinggi pada T1 (1,12 mg/L). Tingginya kadar fosfat pada outlet tambak berkaitan dengan pelepasan fosfat terikat dari sedimen dasar tambak yang bersifat anaerob melalui mekanisme reduksi ikatan Fe-P, di mana kondisi rendah oksigen menyebabkan ikatan besi-fosfat (Fe-P) terputus sehingga fosfat terlarut kembali ke kolom air dalam jumlah besar.

Berbeda dengan $\text{NH}_3\text{-N}$, uji Shapiro-Wilk menunjukkan konsentrasi PO_4^{3-} tidak berdistribusi normal pada sebagian besar zona ($p < 0,05$ pada T0, T2, dan T3), sehingga pengujian beda antar zona dilakukan dengan uji non-parametrik Kruskal-Wallis. Hasil uji menunjukkan perbedaan konsentrasi PO_4^{3-} yang signifikan antar zona sampling ($p = 0,033$). Namun, uji pairwise comparison dengan koreksi Bonferroni tidak menunjukkan pasangan zona

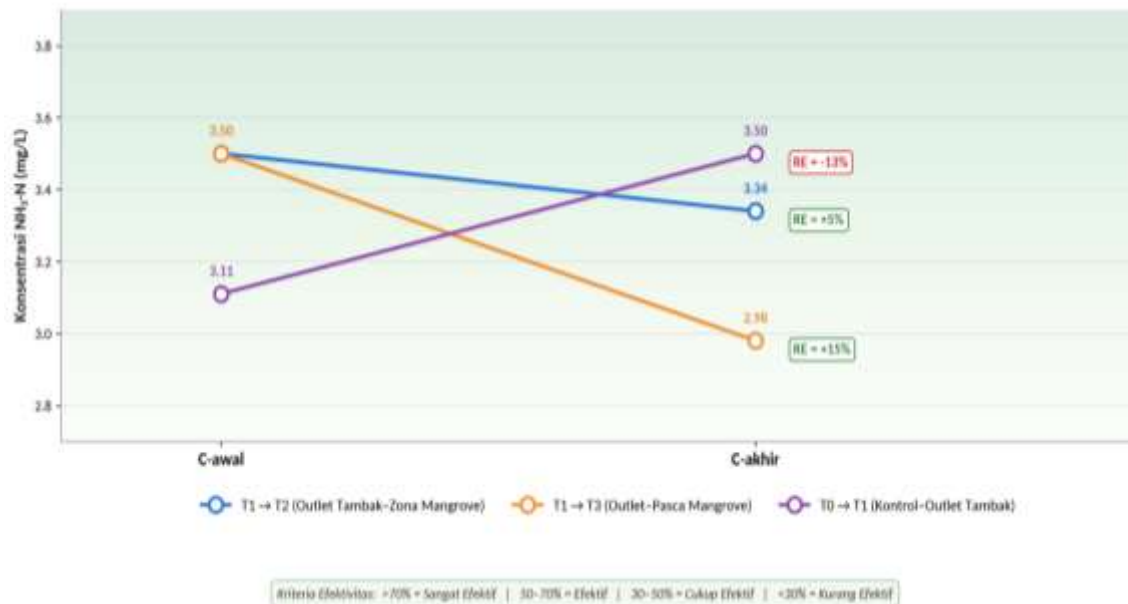
yang berbeda signifikan secara individual (adj. p tertinggi mendekati signifikan pada T0-T1 dan T3-T1 sebesar 0,070), yang mengindikasikan bahwa perbedaan terdeteksi pada tingkat keseluruhan (omnibus) namun ukuran sampel yang terbatas (n=3 per zona) menurunkan daya uji pada perbandingan berpasangan.

Karakteristik beban makro organik pada lokasi penelitian ditunjukkan melalui dinamika nilai *Biochemical Oxygen Demand* BOD₅ dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang dijelaskan pada setiap zonasi pengambilan sampel. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa konsentrasi COD di perairan pesisir Desa Legung melambung sangat tinggi pada kisaran 1280 mg/L hingga 5120 mg/L. Fenomena yang terjadi nilai COD hingga ribuan mg/L ini secara kimiawi tidak murni merepresentasikan total bahan organik asli limbah, melainkan dipicu oleh adanya interferensi ion Klorida (Cl⁻) yang sangat pekat khas karakteristik air payau dan air laut dari outlet tambak udang semi-intensif. Ion klorida tersebut ikut teroksidasi oleh Kalium Dikromat selama proses refluks menggunakan metode APHA 5220 C, sehingga menimbulkan bias positif berupa overestimasi nilai COD (inflasi nilai) akibat melampauinya kapasitas pengikatan oleh HgSO₄. Indikasi bias kimiawi akibat matriks salinitas tinggi ini diperkuat oleh rasio BOD₅/COD yang sangat rendah (< 0,1) di seluruh titik sampling. Di sisi lain, parameter BOD₅ menunjukkan pola ekologi ekologi yang linier dengan fungsi zonasi dan struktur ekosistem mangrove. Konsentrasi BOD₅ pengukuran sebesar 25,35 mg/L pada outlet tambak (T1), kemudian mengalami gangguan signifikan hingga hampir dua kali lipat pada zona mangrove (T2) yaitu sebesar 54,78 mg/L. Peningkatan deplesi oksigen di zona T2 ini menjadi indikator kuatnya pasokan bahan organik alami baru berupa dekomposisi guguran serasah daun dan mengoceh mangrove, yang berinteraksi dengan efek perangkap sedimen (*trapping effect*) akibat rapatnya sistem perakaran vegetasi yang memperlambat arus limbah. Namun, setelah melewati kerapatan vegetasi tersebut, nilai BOD₅ tereduksi secara drastis pada zona pasca mangrove (T3) menjadi hanya 8,18 mg/L, sebelum akhirnya mencapai titik terendah di perairan laut terbuka (T4) sebesar 4,91 mg/L. Penurunan tajam beban organik yang mudah terurai (*biodegradable*) ini menjadi bukti otentik bahwa di samping sangat efektif mereduksi P-Total hingga 98,73%, ekosistem mangrove di Desa Legung sukses menjalankan fungsinya sebagai biofilter alami makro-organik yang menjaga stabilitas kualitas perairan pesisir.

Efisiensi Fitoremediasi Zona Mangrove terhadap NH₃-N³ dan PO₄³⁻

Zona mangrove berperan sebagai biofilter alami yang diharapkan mampu mereduksi beban nutrien dari air limbah tambak udang sebelum mencapai perairan pesisir terbuka guna untuk mengevaluasi sejauh mana zona mangrove mampu mereduksi beban nutrien dari air limbah tambak udang, dilakukan perhitungan *removal efficiency* (RE%) berdasarkan selisih konsentrasi nutrien antara zona inlet dan outlet zona mangrove. Nilai RE% merupakan indikator kuantitatif yang menggambarkan persentase penurunan konsentrasi suatu parameter akibat melewati suatu sistem pengolahan dalam hal ini zona mangrove sebagai biofilter alami. Semakin tinggi nilai RE%, semakin efektif zona mangrove dalam menyerap dan mereduksi

nutrien tersebut dari kolom air. Diagram di bawah ini menyajikan nilai RE% untuk parameter $\text{NH}_3\text{-N}$ dan PO_4^{3-} pada setiap segmen antar zona (T1→T2, T2→T3, dan T1→T3) sebagai gambaran efektivitas reduksi secara bertahap maupun keseluruhan.



Gambar 1. Perubahan konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ pada setiap zona mangrove

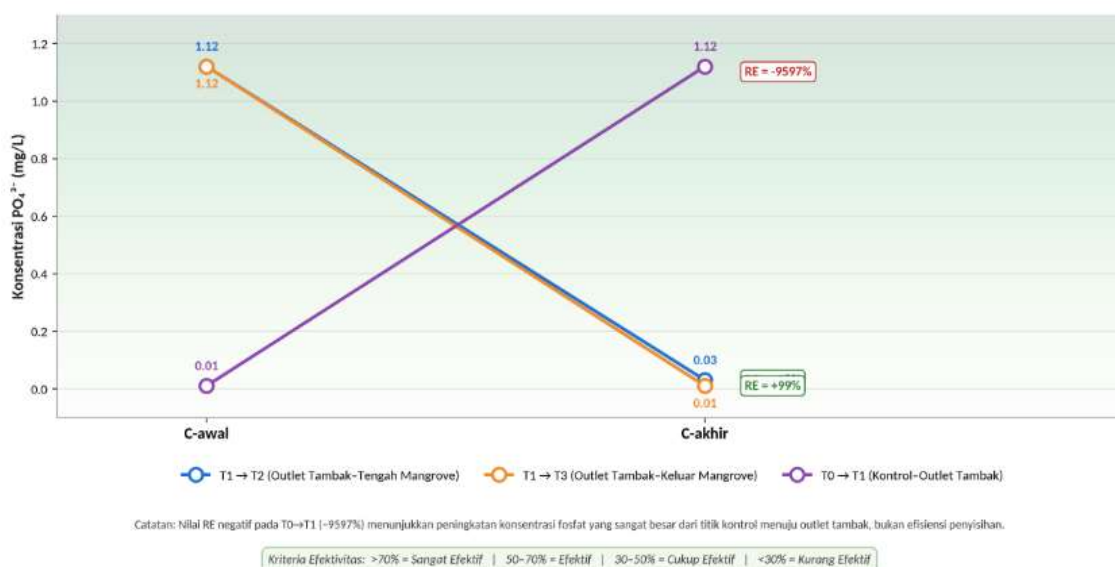
Diagram diatas memperlihatkan tren penurunan konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ yang cukup landai dari T1 menuju T3, tanpa penurunan tajam pada satu segmen tertentu. Bentuk kurva yang cenderung linear ini berbeda dengan pola penurunan eksponensial yang umumnya diharapkan pada sistem pengolahan berbasis lahan basah dengan efisiensi tinggi (Metcalf & Eddy, 2014), dan mengindikasikan bahwa kapasitas asimilasi zona mangrove terhadap beban amonia belum mencapai titik jenuh, namun juga belum bekerja secara optimal pada kondisi debit dan waktu tinggal saat ini. Pola ini memberi petunjuk praktis bahwa perpanjangan lintasan zona mangrove berpotensi menghasilkan penurunan $\text{NH}_3\text{-N}$ yang lebih signifikan apabila diterapkan pada skala pengelolaan yang lebih luas.

Rendahnya efisiensi ini dapat dijelaskan oleh tiga faktor utama: pertama, konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ yang tinggi pada outlet tambak melampaui kapasitas serapan biologis mangrove pada luasan sabuk hijau yang terbatas; kedua, amonia merupakan bentuk nitrogen yang mudah terlarut dalam kolom air sehingga lebih sulit tereduksi oleh mekanisme fisik sedimentasi; ketiga, proses nitrifikasi biologis yang mengkonversi $\text{NH}_3\text{-N}$ menjadi NO_3^- membutuhkan kondisi aerobik yang tidak sepenuhnya tersedia di zona perakaran mangrove yang bersifat semi-anaerobik (Kathiresan, 2021). Meskipun demikian, penurunan konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ secara absolut dari 3,50 mg/L (T1) menjadi 2,98 mg/L (T3) menunjukkan bahwa zona mangrove tetap memberikan kontribusi nyata dalam mereduksi amonia, sejalan dengan kajian Ngabito et al.

(2024) yang menyatakan bahwa efektivitas fitoremediasi mangrove terhadap amonia sangat dipengaruhi oleh lebar sabuk hijau dan kepadatan vegetasi.

Kontras efisiensi antara kedua parameter ini pada dasarnya mencerminkan perbedaan lintasan reaksi yang mendasarinya. Reduksi fosfat berlangsung melalui mekanisme abiotik yang relatif instan, yaitu presipitasi dengan kation logam (Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+}) yang melimpah pada sedimen mangrove serta adsorpsi pada plak besi (iron plaque) yang terbentuk di permukaan akar akibat pelepasan oksigen radial (radial oxygen loss/ROL). Sebaliknya, reduksi $\text{NH}_3\text{-N}$ bergantung pada nitrifikasi, yaitu proses biologis bertahap yang dikatalisis mikroba dan hanya berlangsung optimal pada mikrozona oksik terbatas di sekitar akar, sementara sebagian besar sedimen mangrove bersifat anoksik-hipoksik. Perbedaan sifat reaksi kimiawi-instan pada P versus biologis-bertahap pada N—ini yang mendasari mengapa kurva penurunan $\text{NH}_3\text{-N}$ cenderung linear landai, karena laju reduksinya dikendalikan oleh kinetika mikroba yang lambat dan konstan, bukan oleh kesetimbangan kimia yang cepat tercapai seperti pada fosfat.

Perbandingan dengan penelitian sejenis turut memperkuat interpretasi ini. Wang et al. (2021) melaporkan bahwa zona mangrove alami yang menerima limbah tambak udang di Nansha, Tiongkok, mampu mereduksi NH_4^+ hingga 65,0% jauh melampaui capaian RE% $\text{NH}_3\text{-N}$ pada penelitian ini (14,88%). Perbedaan ini mengindikasikan bahwa faktor lokal seperti lebar sabuk hijau, kepadatan vegetasi, dan waktu tinggal alami limbah tambak udang di area pesisir Desa Legung masih membatasi kapasitas biofiltrasi amonia dibandingkan lokasi lain dengan karakteristik limbah tambak yang serupa, sejalan dengan faktor-faktor yang telah diuraikan sebelumnya.



Gambar 2. Perubahan konsentrasi PO_4^{3-} pada setiap zona mangrove

Diagram di atas memperlihatkan pola RE% PO_4^{3-} yang meningkat konsisten dari T1→T2 hingga mencapai nilai tertinggi pada T1→T3, mencerminkan efektivitas kumulatif zona

mangrove dalam menyerap ortofosfat sepanjang lintasan aliran air. Secara kuantitatif, konsentrasi PO_4^{3-} turun tajam dari 1,12 mg/L pada C-awal menjadi 0,03 mg/L ($\text{T1} \rightarrow \text{T2}$) dan 0,01 mg/L ($\text{T1} \rightarrow \text{T3}$) pada C-akhir, setara dengan RE% masing-masing mencapai sekitar +97% dan +99% – jauh melampaui ambang 70% yang mengkategorikan zona mangrove sebagai “sangat efektif” mereduksi fosfat berdasarkan kriteria efektivitas pada Gambar 2. Pola penurunan konsentrasi yang tajam ini menunjukkan bahwa mekanisme presipitasi dan adsorpsi fisik-kimia untuk fosfat berlangsung relatif cepat, berbeda dengan reduksi amonia yang sangat bergantung pada proses biologis (asimilasi akar dan nitrifikasi) sehingga membutuhkan waktu tinggal (retention time) lebih lama (Hargreaves & Tucker, 2004). Menariknya, segmen $\text{T0} \rightarrow \text{T1}$ (dari titik kontrol menuju outlet tambak) justru menunjukkan pola sebaliknya, dengan konsentrasi PO_4^{3-} meningkat drastis dari 0,01 mg/L (kontrol) menjadi 1,12 mg/L (outlet tambak), setara dengan RE negatif sebesar -9597%. Nilai negatif ini bukan mencerminkan kegagalan sistem pengolahan, melainkan menggambarkan besarnya beban fosfat yang ditambahkan oleh aktivitas budidaya udang itu sendiri sebelum air limbah memasuki zona mangrove. Kontras tajam antara segmen $\text{T0} \rightarrow \text{T1}$ (peningkatan ekstrem akibat aktivitas tambak) dengan segmen $\text{T1} \rightarrow \text{T2}$ dan $\text{T1} \rightarrow \text{T3}$ (penurunan tajam akibat kerja zona mangrove) justru mempertegas peran krusial zona mangrove sebagai penyangga yang mengembalikan kualitas air mendekati kondisi awal sebelum tercemar oleh limbah budidaya.

Temuan RE% PO_4^{3-} yang tinggi pada penelitian ini (>97%) juga konsisten dengan hasil Sansanayuth et al. (1996) yang melaporkan efisiensi reduksi ortofosfat serupa pada limbah tambak bersalinitas tinggi, memperkuat validitas mekanisme presipitasi dan adsorpsi fosfat yang telah diuraikan sebelumnya sekaligus menegaskan bahwa fosfor merupakan parameter yang paling responsif terhadap keberadaan zona penyangga mangrove di Desa Legung.

Bioakumulasi Nutrien pada Organ Mangrove: BCF dan Translocation Factor

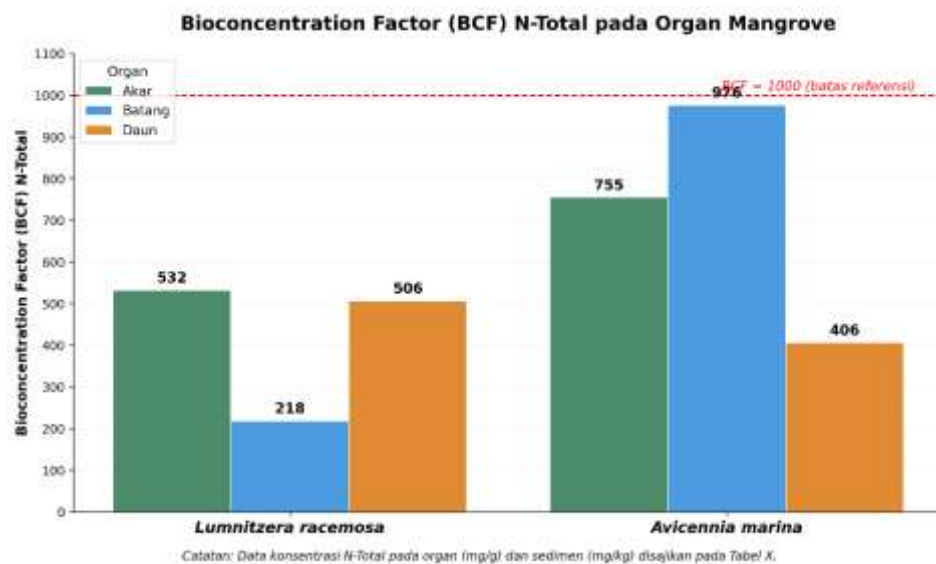
Analisis bioakumulasi nutrien pada organ mangrove dilakukan melalui dua indikator kuantitatif, yaitu Bioconcentration Factor (BCF) dan Translocation Factor (TF). Nilai BCF dihitung sebagai rasio antara konsentrasi nutrien pada jaringan organ mangrove (C organ, mg/g berat kering) terhadap konsentrasi nutrien pada sedimen tempat tumbuhnya (C sedimen, mg/kg berat kering), mengikuti persamaan $\text{BCF} = \text{C organ} / \text{C sedimen}$, dengan kategori kapasitas akumulasi: $\text{BCF} > 1.000$ (*hyperaccumulator*), $\text{BCF} 100\text{--}1.000$ (akumulator kuat), $\text{BCF} 10\text{--}100$ (akumulator sedang), dan $\text{BCF} < 10$ (akumulator lemah) (Alloway, 2013). Kapasitas translokasi nutrien dari akar menuju organ atas dihitung melalui *Translocation Factor* (TF), yaitu rasio konsentrasi nutrien pada organ atas (batang atau daun) terhadap konsentrasi nutrien pada akar ($\text{TF} = \text{C organ atas} / \text{C akar}$), dengan $\text{TF} > 1$ mengindikasikan translokasi aktif nutrien ke bagian atas tanaman sebagai strategi fitodegradasi, sedangkan $\text{TF} < 1$ menunjukkan nutrien cenderung tertahan di zona perakaran sebagai strategi fitoekstraksi (MacFarlane et al., 2007).

Analisis bioakumulasi nutrien pada jaringan mangrove dilakukan terhadap tiga organ (akar, batang, dan daun) dari dua spesies yang teridentifikasi, yaitu *Lumnitzera racemosa* (Sp. 1) dan *Avicennia marina* (Sp. 2).

Tabel 1. Konsentrasi nitrogen total (n-total) pada organ mangrove dan sedimen

Organ	C Organ N-Total (mg/g)	C Sedimen (mg/kg)
Akar <i>Lumnitzera Racemosa</i>	23,92	44,99
Batang <i>Lumnitzera Racemosa</i>	9,80	
Daun <i>Lumnitzera Racemosa</i>	22,77	
Akar <i>Avicennia marina</i>	33,98	
Batang <i>Avicennia marina</i>	43,90	
Daun <i>Avicennia marina</i>	18,29	

Sumber: Hasil uji laboratorium, 2026



Gambar 3. Bioconcentration Factor (BCF) N-Total pada organ mangrove

Pada Sp. 1, konsentrasi N-Total tertinggi ditemukan pada akar (23,92 mg/g BK), diikuti daun (22,77 mg/g BK) dan batang (9,80 mg/g BK), mengindikasikan mekanisme fitoekstraksi dominan di mana nitrogen diserap dan diakumulasi di sistem perakaran tanpa translokasi aktif ke organ tajuk. Hal ini dikuatkan oleh nilai Translocation Factor (TF) < 1 pada batang (0,41) dan daun (0,95) Sp. 1. Sebaliknya, Sp. 2 menunjukkan pola yang lebih kompleks dengan konsentrasi

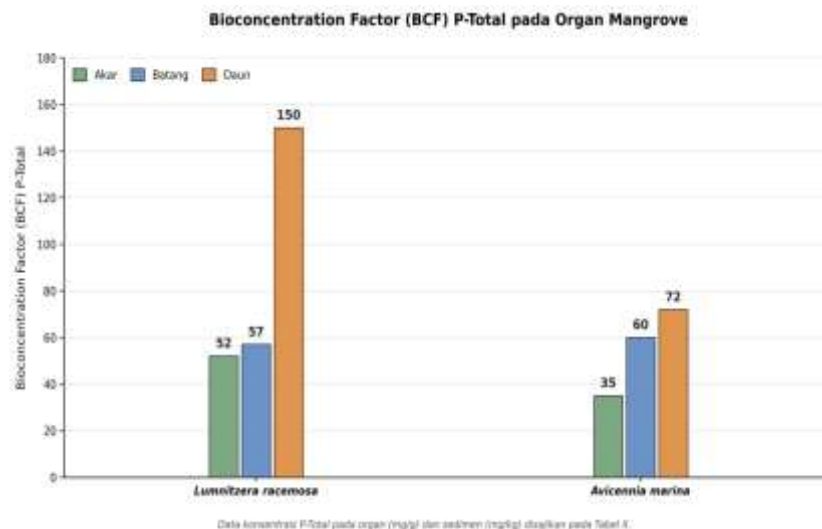
N-Total tertinggi pada batang (43,90 mg/g BK), diikuti akar (33,98 mg/g BK) dan daun (18,29 mg/g BK), dengan nilai TF batang > 1 (1,29) yang mengindikasikan translokasi aktif nitrogen dari akar ke batang melalui mekanisme fitodegradasi. Secara umum, Sp. 2 menunjukkan kapasitas akumulasi N-Total yang lebih tinggi dibandingkan Sp. 1 pada semua organ.

Secara statistik, residual model N-Total organ berdistribusi normal (Shapiro-Wilk, $p=0,146$), namun uji Levene menunjukkan pelanggaran asumsi homogenitas varians yang berat ($p<0,001$). Pelanggaran ini teridentifikasi bersumber dari jumlah replikat yang terbatas ($n=2$ per kombinasi organ x spesies) akibat keterbatasan ketersediaan sampel di lapangan, yang menyebabkan simpangan baku antar kelompok menjadi sangat timpang (berkisar 0,14–17,51 mg/g) semata karena kedekatan atau jarak nilai kedua replikat pada masing-masing kelompok, bukan mencerminkan perbedaan keragaman biologis yang sesungguhnya. Dengan n sekecil ini, estimasi varians per kelompok menjadi tidak stabil sehingga uji homogenitas varians dan ANOVA parametrik ($F=4,832$; $p=0,041$; Tukey HSD signifikan hanya antara batang *Lumnitzera racemosa* dan batang *Avicennia Marina*, $p=0,032$) tidak dapat diandalkan sepenuhnya. Sebagai konfirmasi, uji non-parametrik Kruskal-Wallis yang tidak mensyaratkan homogenitas varians menunjukkan bahwa perbedaan konsentrasi N-Total antar kombinasi spesies dan organ tidak signifikan ($p=0,122$). Dengan mempertimbangkan keterbatasan jumlah replikat tersebut, hasil Kruskal-Wallis dijadikan acuan utama, sehingga pola perbedaan N-Total antar organ pada kedua spesies lebih tepat dimaknai sebagai kecenderungan deskriptif yang didukung nilai BCF dan TF, bukan perbedaan yang teruji signifikan secara statistik. Keterbatasan jumlah replikat ini disampaikan secara terbuka sebagai batasan metodologis penelitian.

Tabel 2. Konsentrasi fosfor total (p-total) pada organ mangrove dan sedimen

ORGAN	C ORGAN P-TOTAL (MG/G)	C SEDIMEN (MG/KG)
Akar <i>Lumnitzera Racemosa</i>	0,04	0,78
Batang <i>Lumnitzera Racemosa</i>	0,04	
Daun <i>Lumnitzera Racemosa</i>	0,12	
Akar <i>Avicennia Marina</i>	0,03	
Batang <i>Avicennia Marina</i>	0,05	
Daun <i>Avicennia Marina</i>	0,06	

Sumber: Hasil uji laboratorium, 2026



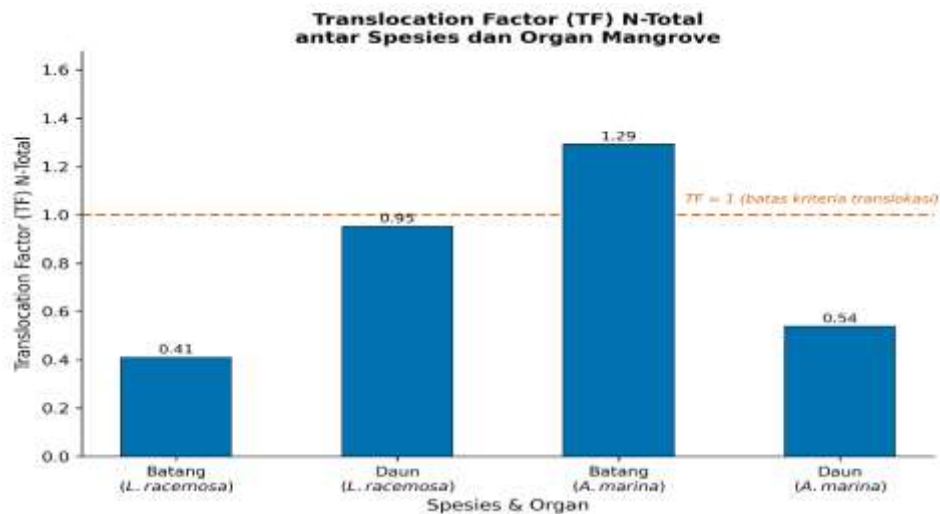
Gambar 4. Bioconcentration Factor (BCF) P-Total pada organ mangrove

Nilai Bioconcentration Factor (BCF) P-Total pada seluruh organ kedua spesies berkisar antara 35–150. Berbeda dengan pola BCF N-Total yang menempatkan batang sebagai organ akumulasi tertinggi, BCF P-Total menunjukkan pola daun > batang > akar yang konsisten pada kedua spesies, dengan nilai tertinggi pada daun *Lumnitzera racemosa* (150) dan nilai terendah pada akar *Avicennia marina* (35). Pola ini mengindikasikan bahwa fosfor, setelah diserap oleh akar dari sedimen, ditranslokasikan secara aktif menuju jaringan daun, berbeda dengan mekanisme akumulasi nitrogen yang cenderung tertahan pada jaringan batang. Untuk P-Total, nilai BCF berkisar antara 35–150, dengan nilai tertinggi pada daun *Lumnitzera racemosa* (150). Pola TF P-Total menunjukkan mekanisme yang berbeda, di mana seluruh organ kedua spesies memiliki TF > 1 (rentang 1,1–2,9), mengindikasikan dominansi mekanisme fitodegradasi untuk fosfor. Nilai TF daun *Lumnitzera racemosa* yang paling tinggi (2,9) menunjukkan bahwa *Lumnitzera racemosa* memiliki kemampuan translokasi P-Total ke daun yang paling dominan, yang berimplikasi pada distribusi fosfor ke seluruh bagian tanaman melalui jaringan xilem (Tam & Wong, 2022).

Uji Shapiro-Wilk terhadap residual P-Total organ menunjukkan penyimpangan dari normalitas ($p=0,041$), sehingga perbandingan antar spesies dan organ diuji dengan Kruskal-Wallis. Hasil uji menunjukkan tidak terdapat perbedaan konsentrasi P-Total yang signifikan antar kombinasi spesies dan organ ($p=0,725$). Perlu dicatat bahwa hasil ini turut dipengaruhi oleh jumlah replikat yang terbatas ($n=2$ per kombinasi organ×spesies) akibat keterbatasan sampel di lapangan, yang tercermin dari keragaman nilai antar replikat yang sangat tinggi pada beberapa kelompok (misalnya Daun *Lumnitzera racemosa* dengan koefisien variasi >100%), sehingga daya uji (power) untuk mendeteksi perbedaan antar kelompok relatif rendah. Dengan

demikian, variasi nilai BCF dan TF P-Total yang diuraikan di atas mencerminkan pola distribusi deskriptif antar organ, bukan perbedaan yang teruji signifikan secara statistik, konsisten dengan sifat fosfor sebagai unsur yang lebih mudah larut dan terdistribusi merata dibandingkan nitrogen pada sistem jaringan mangrove di lokasi penelitian ini.

Nilai *translocation factor* (TF) pada penelitian ini menunjukkan pola kontras antara kedua spesies mangrove yang diteliti. Merujuk kriteria translokasi yang lazim digunakan dalam studi fitoakumulasi— $TF > 1$ menandakan translokasi akar-ke-organ atas berlangsung efektif, sedangkan $TF < 1$ menandakan unsur lebih banyak tertahan di akar (Rezvani & Zaefarian, 2011) maka pola TF pada kedua unsur hara, N-Total dan P-Total, perlu dibahas secara terpisah karena mencerminkan mekanisme fisiologis yang berbeda.

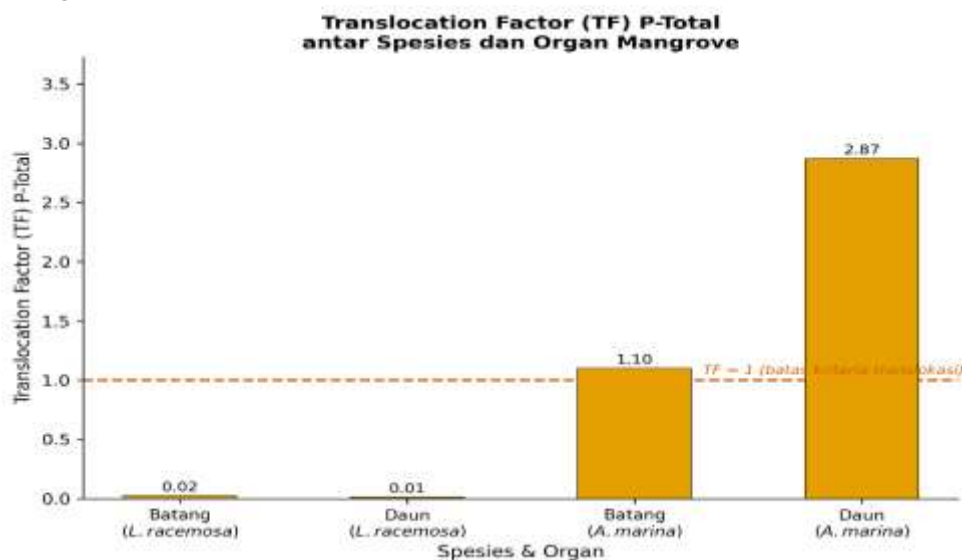


Gambar 5. Translocation Factor (TF) N-Total antar spesies dan organ mangrove

Nilai TF N-Total pada *Lumnitzera racemosa* tercatat 0,41 pada batang dan 0,95 pada daun, keduanya di bawah ambang 1, mengindikasikan nitrogen masih didominasi tertahan di zona perakaran meski translokasi menuju daun sudah cukup aktif (mendekati ambang 1). Sebaliknya, *Avicennia marina* menunjukkan TF N batang sebesar 1,29 yang telah melampaui ambang 1, namun TF N daunnya justru rendah (0,54).

Pola ini berkaitan dengan sifat nitrogen yang sangat mobile karena dapat diangkut baik lewat xilem maupun floem, sehingga distribusinya ke jaringan atas relatif efisien dibanding unsur lain (Reef et al., 2010). Pada *A. marina*, TF N batang yang tinggi namun TF N daun yang rendah mengindikasikan nitrogen banyak tertahan sementara di batang sebagai cadangan struktural, sebelum dialokasikan lebih lanjut ke daun. Sementara itu, pola TF N pada *L. racemosa* yang konsisten di bawah 1 mencerminkan kecenderungan spesies ini untuk mengimobilisasi nitrogen lebih lama di zona akar.

Menurut penulis, temuan TF N batang *A. marina* yang melampaui ambang 1 sementara TF N daunnya tetap rendah justru menarik untuk dicermati lebih jauh, sebab pola ini mengisyaratkan bahwa batang berperan sebagai *buffer* sementara sebelum nitrogen benar-benar dialokasikan ke daun—suatu tahapan translokasi bertingkat yang konsisten dengan peran jaringan vaskular batang sebagai jalur sekaligus tempat penyimpanan transisi hara mobile seperti nitrogen (Reef et al., 2010).



Gambar 6. Translocation Factor (TF) P-Total antar spesies dan organ mangrove

Pola TF P-Total menunjukkan kontras yang jauh lebih tajam antarspesies dibanding N-Total. *L. racemosa* mencatat TF P batang sebesar 1,10 dan TF P daun sebesar 2,87—nilai TF tertinggi di seluruh dataset penelitian ini, sedangkan *A. marina* menunjukkan TF P batang sebesar 1,68 dan TF P daun sebesar 2,03, keduanya tetap >1 namun sedikit lebih rendah dibanding *L. racemosa*.

Perbedaan pola translokasi P dan N pada *L. racemosa* menunjukkan bahwa spesies ini menerapkan strategi partisi hara yang selektif: nitrogen ditahan secara dominan di akar (TF batang dan daun keduanya <1) sebagai bentuk sekuestrasi yang melindungi jaringan fotosintetik dari potensi toksisitas amonia, sedangkan fosfor justru ditranslokasikan secara aktif menuju daun hingga mencapai TF tertinggi di seluruh dataset (2,87). Pola ini konsisten dengan peran fosfor sebagai unsur esensial penyusun ATP, asam nukleat, dan fosfolipid membran, sehingga tumbuhan tetap memprioritaskan realokasi P yang terbatas menuju jaringan dengan aktivitas metabolik tertinggi melalui floem meskipun translokasi N dibatasi (Reef et al., 2010).

Sementara itu, *A. marina* beradaptasi terhadap salinitas tinggi melalui sekresi garam di daun, mekanisme yang menuntut laju transpirasi besar dan secara tidak langsung mendorong aliran massa hara terlarut termasuk fosfor dan nitrogen melalui xilem menuju jaringan atas

(Naidoo, 2009). Gaya tarik transpirasi inilah yang menjelaskan mengapa nitrogen terakumulasi kuat di batang (BCF hingga 976, TF batang 1,29) pada spesies ini, sekaligus mendorong translokasi P menuju daun (TF 2,03) meskipun magnitudonya sedikit lebih rendah dibanding *L. racemosa*. Nitrogen yang tertahan sementara di batang *A. marina* (TF daun N hanya 0,54) mengindikasikan mekanisme proteksi serupa dengan *L. racemosa*, hanya saja dieksekusi pada organ penyimpanan yang berbeda (batang, bukan akar). Studi terdahulu pada genus *Avicennia* di kawasan tambak silvofishery juga melaporkan kapasitas translokasi yang relatif lebih tinggi dibanding genus mangrove lain, mendukung karakter *Avicennia* sebagai translokator internal yang kuat (Takarina & Pin, 2017). Status pembatas hara (N- atau P-limited) pada ekosistem mangrove sendiri dilaporkan bervariasi tergantung karakteristik sedimen dan tekanan antropogenik seperti limbah tambak (Naidoo, 2009; Feller et al., 2003) faktor yang relevan mengingat lokasi penelitian ini berada di kawasan bekas outlet tambak udang.

Implikasi Pengelolaan Kawasan Pesisir Berbasis Nature-Based Solutions

Berdasarkan keseluruhan hasil penelitian, zona mangrove di Desa Legung terbukti berfungsi sebagai sistem fitoremediasi alami yang sangat efektif untuk P-Total namun masih memerlukan optimalisasi untuk N-Total. Mengingat tingginya efisiensi reduksi PO_4^{3-} (>97%), keberadaan zona mangrove perlu dipertahankan dan ditingkatkan luasannya sebagai bagian dari sistem pengolahan limbah tambak berbasis alam (*nature-based solutions*). Setiap penambahan lebar sabuk hijau mangrove akan secara proporsional meningkatkan kapasitas penyerapan nutrien, khususnya amonia yang masih menjadi tantangan utama, mengingat RE $\text{NH}_3\text{-N}$ hanya 14,88% pada kondisi saat ini. Perbedaan kapasitas akumulasi antara *L. racemosa* dan *A. marina* memberikan dasar ilmiah untuk mempertimbangkan komposisi spesies dalam program rehabilitasi mangrove, di mana *A. marina* dengan nilai BCF batang mendekati 1.000 berpotensi besar sebagai fitoremediator andalan di kawasan tambak udang. Berdasarkan perbedaan strategi partisi hara kedua spesies, desain rekayasa vegetasi berbasis zonasi bertingkat dapat dipertimbangkan: *A. marina*, dengan kapasitas translokasi nitrogen tinggi menuju batang yang didorong oleh laju transpirasinya, ditempatkan pada zona terdepan yang berbatasan langsung dengan outlet tambak untuk menyerap beban nitrogen puncak secara cepat, sedangkan *L. racemosa*, dengan strategi retensi akar yang kuat, ditempatkan pada zona berikutnya untuk menangkap sisa nitrogen yang lolos dari zona pertama sekaligus memperkuat kontribusi reduksi fosfor melalui translokasi daunnya membentuk sistem biofilter sekuensial yang memanfaatkan perbedaan mekanisme partisi internal kedua spesies. Selain itu, nilai DO pada outlet tambak (2,24 mg/L) yang jauh di bawah baku mutu mengindikasikan perlunya kombinasi penerapan sistem aerasi atau pengurangan kepadatan tebar di tambak dengan optimalisasi zona penyangga mangrove sebagai pendekatan terpadu yang paling efektif untuk keberlanjutan ekosistem pesisir Desa Legung.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan menganalisis kualitas air limbah tambak udang, mengevaluasi efektivitas zona mangrove dalam mereduksi $\text{NH}_3\text{-N}$ dan PO_4^{3-} , serta mengidentifikasi pola distribusi akumulasi nutrien pada organ *Lumnitzera racemosa* dan *Avicennia marina* di kawasan pesisir Desa Legung, Kabupaten Sumenep. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi nutrien tertinggi terukur pada outlet tambak (T1), yaitu $\text{NH}_3\text{-N}$ sebesar 3,50 mg/L dan PO_4^{3-} sebesar 1,12 mg/L, keduanya melampaui baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 dan Permen LH No. 5 Tahun 2014, disertai nilai oksigen terlarut yang rendah (2,24 mg/L), pH netral-basa (7,40–7,95), salinitas yang menurun dari laut menuju outlet (48,13→31,43 mS), dan suhu relatif stabil (27,1–27,2°C). Zona mangrove terbukti sangat efektif mereduksi PO_4^{3-} hingga 98,73% (T1→T3), namun efektivitasnya terbatas untuk $\text{NH}_3\text{-N}$ yang hanya mencapai 14,88% akibat keterbatasan lebar sabuk hijau dan sifat amonia yang mudah terlarut.

Distribusi akumulasi nutrien pada organ menunjukkan pola yang berbeda antar spesies maupun antar jenis nutrien. Untuk N-Total, *L. racemosa* mengakumulasi tertinggi di akar (23,92 mg/g), diikuti daun (22,77 mg/g) dan batang (9,80 mg/g) – sejalan dengan TF batang dan daun yang keduanya <1 (0,41 dan 0,95), menandakan mekanisme fitoekstraksi (N dipertahankan di akar). Sebaliknya, *A. marina* justru mengakumulasi N-Total tertinggi di batang (43,90 mg/g), melebihi akar (33,98 mg/g) dan daun (18,29 mg/g), dengan TF batang=1,29 (>1, fitodegradasi/translokasi aktif ke batang) namun TF daun=0,54 (<1, translokasi ke daun tetap terbatas).

Pola sebaliknya ditemukan untuk P-Total: kedua spesies justru mengakumulasi P lebih tinggi di jaringan tajuk dibanding akar. Pada *L. racemosa*, daun mencatat P-Total tertinggi (0,116 mg/g) dibanding batang (0,045 mg/g) dan akar (0,041 mg/g); pada *A. marina*, daun (0,056 mg/g) dan batang (0,046 mg/g) juga melebihi akar (0,028 mg/g). Nilai TF P-Total pada kedua spesies seluruhnya >1 (*L. racemosa*: batang=1,10, daun=2,87; *A. marina*: batang=1,68, daun=2,03), menunjukkan translokasi P ke tajuk berlangsung aktif pada kedua spesies – kontras dengan pola N yang lebih spesies-spesifik. Kedua spesies tergolong akumulator kuat berdasarkan BCF, dengan BCF N-Total berkisar 218–976 (tertinggi pada batang *A. marina*) dan BCF P-Total berkisar 35–150 (tertinggi pada daun *L. racemosa*). Temuan ini menegaskan peran ekologis mangrove sebagai penyangga alami (*nature-based solutions*) yang mampu memutus rantai pencemaran nutrien tambak sebelum mencapai perairan pesisir, sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem estuari Desa Legung.

Meningkat efektivitas zona mangrove dalam mereduksi amonia masih terbatas (14,88%), penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji pengaruh perluasan lebar sabuk hijau dan waktu tinggal (*retention time*) limbah terhadap peningkatan efisiensi reduksi $\text{NH}_3\text{-N}$. Desain rekayasa vegetasi berbasis zonasi bertingkat menempatkan *Avicennia marina* pada zona terdepan dan *Lumnitzera racemosa* pada zona berikutnya juga perlu diuji secara langsung di lapangan untuk memvalidasi efektivitasnya sebagai sistem biofilter sekuensial. Selain itu, pengelola tambak disarankan mengombinasikan optimalisasi zona penyangga mangrove

dengan perbaikan manajemen kualitas air kolam, seperti penerapan sistem aerasi atau penyesuaian kepadatan tebar, untuk mengurangi beban nutrien sebelum limbah memasuki zona mangrove.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Wafi, Heri Ariadi, T. van M. (2025). Dynamic Model Analysis of Waste Absorption Carrying Capacity Values in Semi-Intensive Shrimp Ponds. *Journal of Biology & Biology Education*, 1-11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15294/biosaintifika.v17i3.28439>
- Alongi, D. M. (2020). Carbon balance in salt marsh and mangrove ecosystems: A global synthesis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8. <https://doi.org/10.3390/jmse8100767>
- Arifanti, V. B., Kauffman, J. B., Subarno, J. B., Ilman, M., Tosiani, A., & Novita, N. (2022). Contributions of mangrove conservation and restoration to climate change mitigation in Indonesia. *Global Change Biology*, 28(15), 4523-4538. <https://doi.org/10.1111/gcb.16216>
- Cao, T. T., Anh Le, H., & Eppe, G. (2025). Nutrient dynamics, environmental impacts, and feed efficiency in intensive whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) farming on sandy soils in Ninh Thuan, Vietnam. *Aquaculture Reports*, 44(August), 103050. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103050>
- Dermawan, R., Sasongko, A. S., & Yulda, Y. (2026). *Studi Analisis Nitrat , Fosfat dan Amonia Muara Sungai di Pesisir Teluk Banten , Banten Study of Nitrate , Phosphate and Ammonia Analysis of River Estuary on the Coast of Banten Bay , Banten*. 15(1), 233-242.
- Ferdiansyah, A., & Ali, M. (2024). Biodiversity of Mangrove Vegetation in Rivers, Estuaries and Coastal Areas in Saronggi Subdistrict, Sumenep. *Electronic Journal of Education, Social Economics and Technology*, 5(2), 197-202. <https://doi.org/10.33122/ejeset.v5i2.175>
- Galimberti, P. (2020). Open Science and Evaluation. *Scires-It*, 10(2), 65-70. <https://doi.org/10.2423/i22394303v10Sp65>
- Hamzah, F., & Setiawan, A. (2010). Akumulasi logam berat Pb, Cu, dan Zn di hutan mangrove Muara Angke, Jakarta Utara. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 2(2), 41-52.
- Jumraeni, Khaeriyah, A., Burhanuddin, & Anwar, A. (2020). Pengaruh Model Pembuangan terhadap akumulasi bahan organik tambak intensif udang vaname (*litopenaeus vannamei*). *Octopus : Jurnal Ilmu Perikanan*, 9(1), 11-18.
- Khotimah, N. N., Rozirwan, Putri, W. A. E., Fauziyah, Aryawati, R., Isnaini, & Nugroho, R. Y. (2024). Bioaccumulation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination (Lead and Copper) Build Up in the Roots of *Avicennia alba* and *Excoecaria agallocha*. *Journal of Ecological Engineering*, 25(5), 101-113. <https://doi.org/10.12911/22998993/185716>
- MacFarlane, G. R., Koller, C. E., & Blomberg, S. P. (2007). Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*, 69(9), 1454-1464.
- Mahmud, S. L., Nugrahani, E. H., & Sianturi, P. (2013). Model Matematika dan Analisis

- Kandungan Oksigen Terlarut dalam Badan Air yang Mengalami Eutrofikasi. *Jurnal Matematika Dan Aplikasi*, 1-11.
- Maysabila, A., Heryanti, R., Permana, R., & Hasan, Z. (2023). Bioremediation of shrimp pond wastewater using effective microorganism-4 (EM4). *Aceh Journal of Animal Science*, 8(3), 72-77. <https://doi.org/10.13170/ajas.8.3.28971>
- Putri, Safira Aisha; Suryono; Ario, R. (2022). Hubungan Konsentrasi Nutrien Pada Sedimen terhadap Persentase Tutupan Lamun di Pulau Harapan dan Kelapa Dua, Kepulauan Seribu, DKI Jakarta. *Journal of Marine Research*, 11. <https://doi.org/DOI:10.14710/jmr.v11i4.34126>
- Saputra, C. A., Yuniarti, Y., Harsono, G., Subiyanto, S., & Rafii, A. (2024). Studi Pola Sebaran Sedimen Dasar Perairan Menggunakan Model Hidrodinamika 2 Dimensi Di Pantai Biru, Desa Kersik, Kecamatan Marangkayu, Kutai Kartanegara. *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 6(1), 23-34. <https://doi.org/10.62703/jhi.v6i1.63>
- Sari, S. H. J., Yona, D., Vidayanti, V., & Ramadhan, F. (2023). Effectivity of Bioaccumulation and Translocation of Heavy Metals (Cd, Zn, and Pb) in *Avicennia marina* Growing at Wonorejo Mangrove Ecosystem, East Surabaya. *Journal of Environmental Engineering and Sustainable Technology*. <https://doi.org/10.21776/ub.jeest.2023.010.02.7>
- Supono. (2018). *manajemen kualitas air untuk budidaya tambak udang* (T. aura Creative (ed.); xvi).
- Toan, N., Ngoc, P., Dũng, L., Tue, N., Quy, T., & Nhuan, M. (2025). Nitrate, Ammonium, and Phosphate Patterns from Mangrove Sediment Cores Near Extensive Aquaculture Areas in the Red River Delta, Vietnam. *One Ecosystem*. <https://doi.org/10.3897/oneeco.10.e150217>
- Yusal, M. S., Hasyim, A., Hastuti, H., Arif, A., & Pratomo, R. H. S. (2025). Review Eutrofikasi: Risiko dalam Kesuburan Lingkungan Perairan dan Upaya Penanggulangannya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24(1), 123-134. <https://doi.org/10.14710/jkli.67125>
- Zul, D. (2026). *Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Selulolitik dari Hutan Mangrove Bengkalis , Riau : Potensi Sebagai Agen Biofertilizer Isolation and Characterization of Cellulolytic Bacteria from the Bengkalis Mangrove Forest , Riau : Potential Biofertilizer Agents* *Pend.* 11(1), 12-26. <https://doi.org/10.24002/biota.v11i1.11824>