

The Impact of Mangrove Ecosystems on Water Quality in Vaname Shrimp Farming

Brilian Amanat Taqwa^{1*}, Arif Luqman², Awik Puji Dyah Nurhayati³

Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

ABSTRACT: Mangrove ecosystems play a crucial role in maintaining coastal environmental stability while supporting sustainable aquaculture practices through biofiltration and carbon sequestration. However, empirical studies assessing the contribution of mangroves to water quality dynamics and sediment microbiomes in aquaculture ponds remain limited. This study aims to analyze the differences in water quality parameters, nutrients, and microbiome communities between ponds with and without mangroves in the biosphere buffer zone. Data were collected from several pond blocks with measurements of key variables, including pH, salinity, ammonium (NH₄), nitrite (NO₂), nitrate (NO₃), phosphate (PO₄), total organic matter (TOM), alkalinity, *Vibrio* bacteria, total bacteria, and plankton. Analyses were conducted using normality tests, the Mann-Whitney U test for intergroup differences, and Spearman's correlation to assess relationships among variables. The results showed significant differences in salinity, TOM, alkalinity, and total *Vibrio* between ponds with and without mangroves. Moreover, strong correlations were observed between nutrients (PO₄, NH₄) and the dynamics of bacteria and plankton, indicating a close link between water quality and pond ecosystem health. These findings highlight the contribution of mangroves in maintaining environmental stability in aquaculture systems while enhancing production efficiency. Therefore, mangrove conservation is a key strategy to promote sustainable aquaculture practices and climate change mitigation.

Keywords: Mangrove, Microbiome, Water Quality, *Vibrio*, Sustainable Aquaculture

Submitted: 20-05-2026; Revised: 22-06-026; Accepted: 25-07-2026

*Corresponding Author: 6005241008@student.its.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.55927/ijaea.v5i2.16647>
<https://journal.formosapublisher.org/index.php/ijaea>

Pengaruh Ekosistem Mangrove Terhadap Kualitas Air Pada Budidaya Udang Vaname

Brilian Amanat Taqwa^{1*}, Arif Luqman², Awik Puji Dyah Nurhayati³
Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

ABSTRAK: Ekosistem mangrove berperan penting dalam menjaga stabilitas lingkungan pesisir sekaligus mendukung praktik akuakultur berkelanjutan melalui fungsi biofiltrasi dan penyerapan karbon. Namun, masih terbatas kajian empiris yang menilai kontribusi mangrove terhadap dinamika kualitas air dan mikrobioma sedimen di tambak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan parameter kualitas air, nutrisi, serta komunitas mikrobioma antara tambak dengan dan tanpa mangrove di zona penyangga biosfer. Data dikumpulkan dari beberapa blok tambak dengan pengukuran variabel utama, meliputi pH, salinitas, amonium (NH_4), nitrit (NO_2), nitrat (NO_3), fosfat (PO_4), total organic matter (TOM), alkalinitas, bakteri *Vibrio*, total bakteri, dan plankton. Analisis dilakukan menggunakan uji normalitas, Mann-Whitney U untuk perbedaan antar kelompok, serta korelasi Spearman untuk hubungan antarvariabel. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada variabel salinitas, TOM, alkalinitas, dan total *Vibrio* antara tambak dengan dan tanpa mangrove. Selain itu, ditemukan korelasi kuat antara nutrisi (PO_4 , NH_4) dengan dinamika bakteri dan plankton, yang mengindikasikan keterkaitan erat antara kualitas air dan kesehatan ekosistem tambak. Temuan ini menegaskan bahwa keberadaan mangrove berkontribusi dalam menjaga stabilitas lingkungan budidaya sekaligus mendukung efisiensi produksi. Oleh karena itu, konservasi mangrove menjadi strategi penting dalam mendorong praktik akuakultur berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim.

Kata Kunci: Mangrove, Mikrobioma, Kualitas Air, *Vibrio*, Akuakultur Berkelanjutan

Submitted: 20-05-2026; Revised: 22-06-026; Accepted: 25-07-2026

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki fungsi ekologis dan ekonomis yang sangat penting (Yaabari et al., 2024). Keberadaan mangrove tidak hanya berperan dalam melindungi garis pantai dari abrasi dan badai, tetapi juga menyediakan jasa ekosistem berupa penyimpanan karbon biru, habitat bagi berbagai organisme, serta penyaring alami bagi limbah yang masuk ke perairan pesisir. Namun, tekanan dari aktivitas manusia, khususnya alih fungsi lahan menjadi tambak dan pemukiman, telah menyebabkan degradasi luas ekosistem mangrove di berbagai wilayah pesisir Indonesia. Degradasi ini mengakibatkan menurunnya kualitas lingkungan pesisir, termasuk berkurangnya kemampuan ekosistem dalam mendukung perikanan budidaya yang berkelanjutan (Underwood et al., 2022).

Dalam konteks akuakultur, kualitas lingkungan, khususnya kualitas air, merupakan faktor penentu keberhasilan produksi. Tingginya konsentrasi bahan organik, nutrisi anorganik, serta keberadaan bakteri patogen dapat menyebabkan penurunan kualitas air tambak (Tong et al., 2022). Kondisi tersebut sering kali berujung pada munculnya penyakit pada organisme budidaya, khususnya udang dan ikan, yang berdampak pada penurunan produksi bahkan kegagalan panen. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk menjaga kualitas air tambak agar tetap berada pada kondisi optimal. Salah satu pendekatan yang mulai banyak dikaji adalah pemanfaatan ekosistem mangrove sebagai zona penyangga yang mampu meningkatkan kualitas air secara alami (Puthusseri et al., 2021).

Menurut Palit et al. (2022) mangrove berperan sebagai biofilter alami melalui mekanisme fisik, kimia, dan biologis. Akar mangrove mampu menjebak sedimen, menyerap nutrisi, serta mendukung keberadaan komunitas mikroorganisme yang berfungsi dalam proses dekomposisi. Selain itu, ekosistem mangrove diketahui mendukung keberagaman mikrobioma sedimen, yang berkontribusi penting dalam mengendalikan siklus nutrisi serta menekan keberadaan mikroorganisme patogen (Nuangjui et al., 2023). Hal ini menjadikan keberadaan mangrove sangat relevan dalam konteks tambak budidaya, di mana akumulasi limbah organik dari pakan dan metabolisme biota budidaya sering menjadi masalah utama. Dengan demikian, integrasi tambak dengan mangrove dipandang sebagai strategi potensial untuk menciptakan sistem akuakultur yang lebih berkelanjutan.

Permasalahan utama yang muncul adalah banyak tambak di Indonesia masih belum terintegrasi dengan ekosistem mangrove. Sebagian besar tambak intensif lebih menekankan pada input teknologi dan pakan buatan, namun kurang memperhatikan fungsi ekosistem penyangga alami (Lim et al., 2019). Akibatnya, beban pencemaran dari sisa pakan, kotoran, serta senyawa nitrogen dan fosfor cenderung tinggi. Kondisi ini tidak hanya menurunkan produktivitas tambak, tetapi juga meningkatkan risiko serangan penyakit akibat proliferasi bakteri patogen seperti *Vibrio* spp (Kopprio et al., 2020). Oleh karena itu, perlu adanya pendekatan yang menggabungkan fungsi ekologis mangrove dengan sistem budidaya modern agar tercapai keseimbangan antara produktivitas dan kelestarian lingkungan.

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian sebelumnya telah mengungkapkan sejumlah manfaat dari integrasi mangrove dengan tambak. Hebbar et al. (2025) menemukan bahwa tambak yang berasosiasi dengan mangrove memiliki tingkat kejernihan air yang lebih tinggi dibandingkan tambak tanpa mangrove. Sementara itu, Ghosh et al. (2022) menunjukkan bahwa keberadaan mangrove mampu menurunkan konsentrasi amonia dan nitrit secara signifikan pada tambak udang, sehingga menurunkan risiko toksisitas bagi organisme budidaya. Kedua penelitian ini menegaskan bahwa keberadaan mangrove dapat memperbaiki kualitas air tambak secara alami.

Temuan serupa juga dilaporkan oleh Das et al. (2024) yang menemukan bahwa mikrobioma sedimen di tambak dengan mangrove lebih beragam dan memiliki kemampuan menekan perkembangan bakteri patogen. Alsharif et al. (2024) melengkapi temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa keberadaan mangrove mampu menurunkan kepadatan *Vibrio harveyi*, salah satu bakteri penyebab penyakit pada udang. Kedua penelitian ini menggarisbawahi pentingnya peran mikrobioma sedimen dalam menjaga kesehatan ekosistem tambak sekaligus mendukung keberlanjutan produksi akuakultur.

Meskipun telah ada sejumlah penelitian yang menyoroti manfaat keberadaan mangrove pada tambak, sebagian besar studi masih terbatas pada aspek kualitas air atau penurunan konsentrasi nutrisi saja. Kajian yang secara komprehensif menghubungkan kualitas air, keberadaan bakteri patogen, dan peran mikrobioma sedimen dalam mendukung sistem budidaya berkelanjutan masih jarang dilakukan. Hal ini menimbulkan kesenjangan pengetahuan (research gap) mengenai sejauh mana integrasi mangrove benar-benar dapat meningkatkan ketahanan ekosistem tambak. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan kualitas air, komunitas mikroorganisme, dan keberadaan bakteri patogen pada tambak yang berasosiasi dengan mangrove dibandingkan dengan tambak yang tidak memiliki mangrove. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis dalam pengelolaan tambak berkelanjutan, sekaligus memperkuat argumen pentingnya konservasi mangrove sebagai penyangga biosfer.

METODOLOGI

Desain penelitian ini menggunakan pendekatan komparatif kuantitatif dengan tujuan menganalisis perbedaan kualitas lingkungan tambak yang berasosiasi dengan mangrove dan tambak tanpa mangrove. Penelitian dilaksanakan di Kawasan budidaya udang vaname Desa Bandar Negeri, Kec. Labuhan Maringgai, Lampung Timur, yang terdiri atas dua kelompok perlakuan, yaitu 10 kolam tambak dengan mangrove dan 10 kolam tambak tanpa mangrove.

Setiap kelompok tambak dibagi ke dalam blok pengamatan. Tambak dengan mangrove terbagi menjadi Blok A (7 kolam) dan Blok D (3 kolam), sedangkan tambak tanpa mangrove terbagi menjadi Blok B (5 kolam) dan Blok C (5 kolam). Pembagian ini bertujuan untuk memudahkan sistem identifikasi data sekaligus mencerminkan kondisi ekologis setempat. Masing-masing kolam dijadikan satuan pengamatan dengan kode unik, dan setiap kolam dilakukan

pengambilan data secara berulang sebanyak 12–18 kali sepanjang periode penelitian.

Pengumpulan data dilakukan secara periodik mengikuti umur pemeliharaan benur (DOC). Sampel air diambil pada beberapa titik representatif dalam setiap kolam, baik pada pagi maupun sore hari. Parameter kualitas air yang diukur meliputi pH, salinitas, amonia (NH_4), nitrit (NO_2), nitrat (NO_3), fosfat (PO_4), total organic matter (TOM), serta alkalinitas total. Selain itu, dilakukan isolasi bakteri *Vibrio*, penghitungan total bakteri (TBC), dan total plankton (cell/ml) sebagai indikator kesehatan perairan dan stabilitas ekosistem tambak.

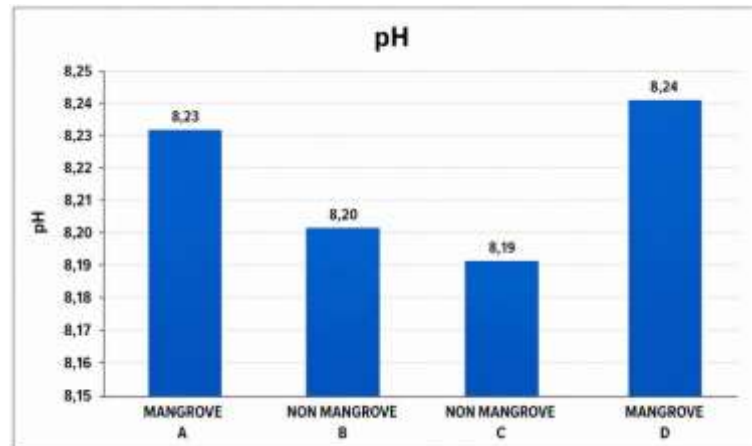
Pengukuran parameter kualitas air dilakukan menggunakan instrumen lapangan yang terkalibrasi, seperti pH meter, refraktometer, dan DO meter. Analisis nutrisi (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4) dan TOM dilakukan di laboratorium menggunakan metode spektrofotometri dan titrasi sesuai standar APHA (2017). Analisis bakteri *Vibrio* dilakukan dengan metode kultur pada media selektif TCBS agar, dilanjutkan dengan perhitungan koloni, sedangkan TBC dihitung dengan metode plate count. Identifikasi dan kuantifikasi plankton dilakukan dengan mikroskopi menggunakan haemocytometer.

Data yang terkumpul kemudian disusun dalam bentuk tabulasi berdasarkan blok, kode kolam, dan kelompok perlakuan (mangrove vs non-mangrove). Data yang tidak lengkap pada variabel kunci seperti pH, salinitas, nutrisi, dan parameter mikrobiologi dieliminasi untuk menjaga kualitas analisis. Selanjutnya, dilakukan analisis deskriptif untuk menggambarkan rata-rata, standar deviasi, dan distribusi data. Uji normalitas dilakukan menggunakan Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk untuk menentukan kelayakan penggunaan uji parametrik atau non-parametrik.

Untuk menguji perbedaan antar kelompok tambak, digunakan uji Mann-Whitney U karena sebagian besar data tidak berdistribusi normal. Analisis korelasi Spearman's rho dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antar variabel kualitas air, nutrisi, dan mikrobiologi. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 26.0, dengan tingkat signifikansi 5%. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk mengkaji peran ekosistem mangrove terhadap stabilitas kualitas air, pengendalian bakteri, serta dukungan terhadap akuakultur berkelanjutan di zona penyangga biosfer.

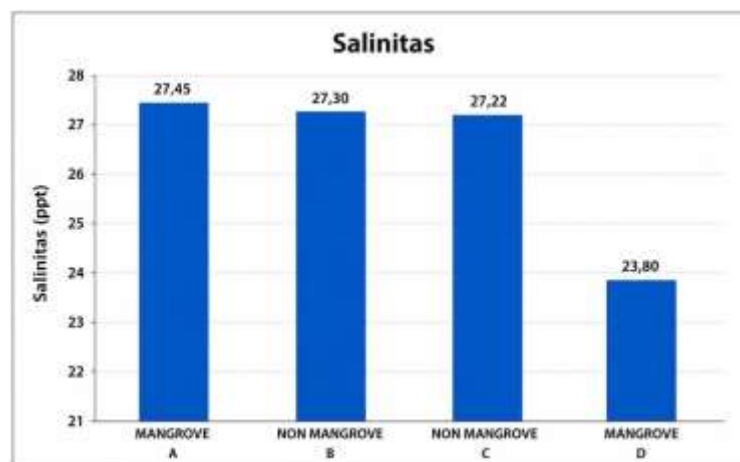
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian hasil dan pembahasan ini menyajikan temuan utama penelitian terkait perbedaan kualitas lingkungan antara tambak di Blok A dan D yang berasosiasi dengan ekosistem mangrove dengan tambak di Blok B dan C yang tidak berasosiasi dengan ekosistem mangrove. Analisis deskriptif data penelitian tergambar pada grafik di bawah ini.



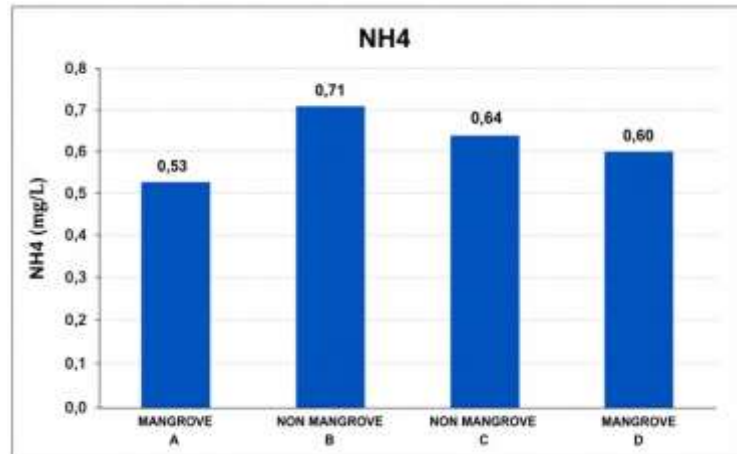
Gambar 1. Rata-rata pH antarblok

Nilai rata-rata pH antarblok tambak relatif seragam dengan kisaran 8,18–8,24. Blok D mencatat pH tertinggi sebesar 8,24, diikuti oleh Blok A dengan 8,23, sedangkan Blok B dan C memiliki nilai sedikit lebih rendah, masing-masing 8,20 dan 8,19. Secara keseluruhan, pH pada semua blok berada dalam rentang optimal untuk budidaya, menunjukkan kondisi perairan yang stabil tanpa perbedaan mencolok antarblok.



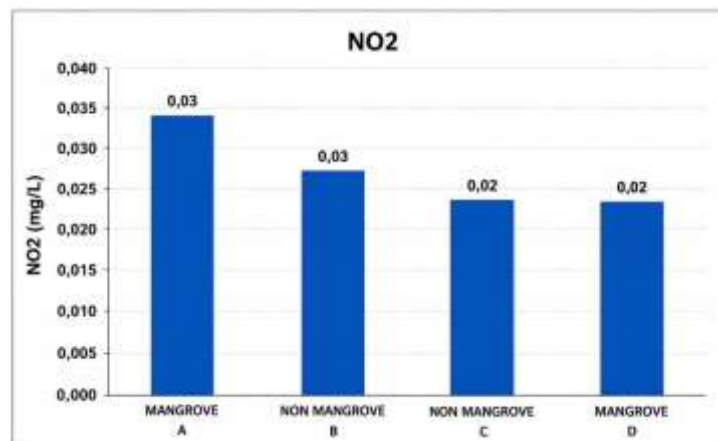
Gambar 2. Rata-rata Salinitas antarblok

Hasil pengukuran rata-rata salinitas menunjukkan variasi antarblok tambak. Blok A (mangrove) memiliki salinitas tertinggi sebesar 27,45 ppt, diikuti oleh Blok B dan C (non-mangrove) dengan nilai yang relatif serupa, masing-masing 27,30 ppt dan 27,22 ppt. Sementara itu, Blok D (mangrove) mencatat salinitas terendah, yakni 23,80 ppt. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa keberadaan ekosistem mangrove dapat memengaruhi kestabilan salinitas, meskipun pengaruhnya bervariasi antarblok sesuai kondisi lingkungan setempat.



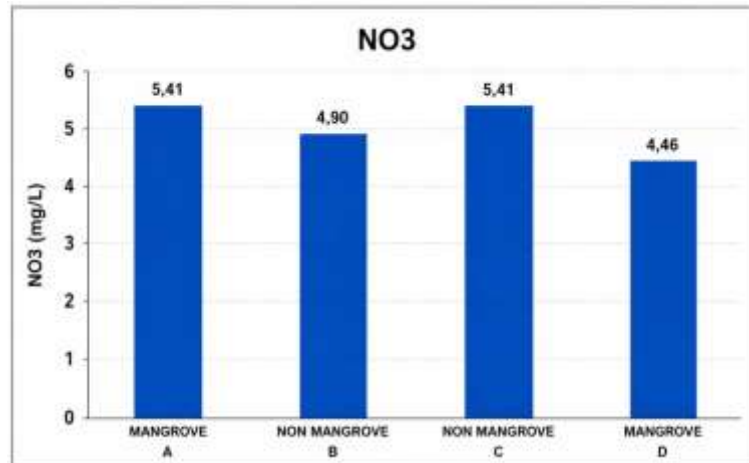
Gambar 3. Rata-rata NH₄ antarblok

Rata-rata konsentrasi amonium (NH₄) antarblok menunjukkan variasi yang cukup jelas. Blok B (non-mangrove) memiliki nilai tertinggi sebesar 0,71 mg/L, disusul Blok C (non-mangrove) dengan 0,64 mg/L. Blok D (mangrove) mencatat 0,60 mg/L, sedangkan nilai terendah terdapat pada Blok A (mangrove) dengan 0,53 mg/L. Pola ini mengindikasikan bahwa tambak non-mangrove cenderung memiliki konsentrasi NH₄ lebih tinggi dibandingkan tambak yang berasosiasi dengan mangrove.



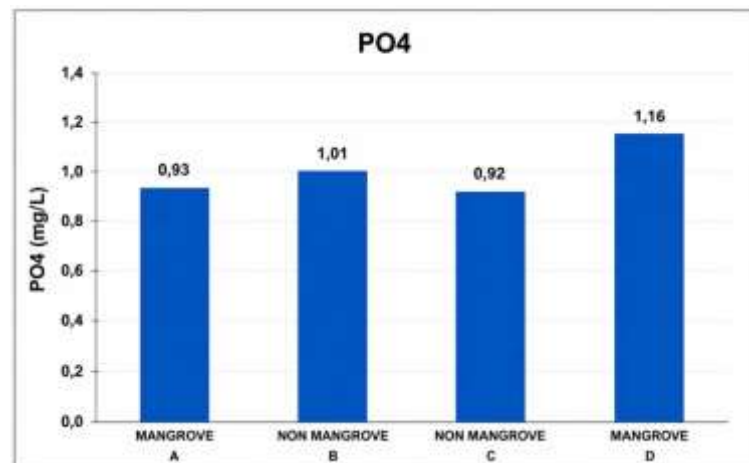
Gambar 4. Rata-rata NO₂ antarblok

Rata-rata konsentrasi nitrit (NO₂) pada keempat blok relatif rendah dengan perbedaan yang tipis. Nilai tertinggi tercatat di Blok A (0,034 mg/L), diikuti Blok B (0,027 mg/L), sedangkan Blok C dan D memiliki nilai hampir sama yaitu sekitar 0,024 mg/L. Secara umum, kadar NO₂ antarblok berada pada kisaran aman, dengan indikasi bahwa tambak mangrove maupun non-mangrove tidak menunjukkan perbedaan mencolok pada parameter ini.



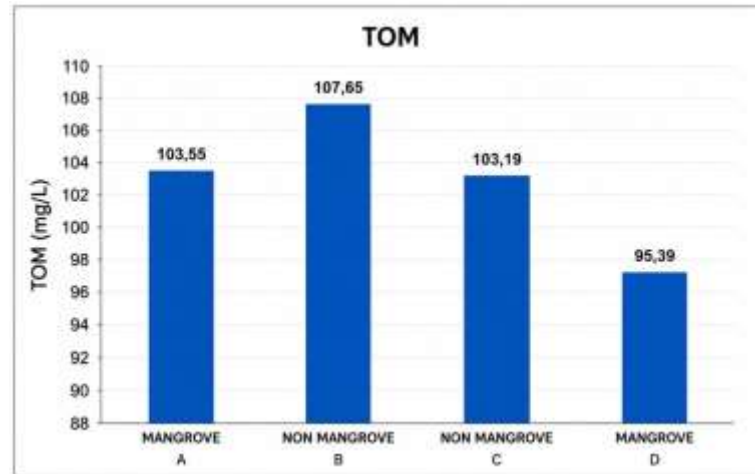
Gambar 5. Rata-rata NO₃ antarblok

Rata-rata konsentrasi nitrat (NO₃) menunjukkan variasi antarblok dengan kisaran 4,46–5,41 mg/L. Blok C mencatat nilai tertinggi sebesar 5,41 mg/L, diikuti Blok A dengan 5,41 mg/L, sedangkan Blok B sedikit lebih rendah yaitu 4,90 mg/L. Nilai terendah terdapat pada Blok D dengan 4,46 mg/L. Hasil ini memperlihatkan bahwa meskipun ada perbedaan antarblok, konsentrasi NO₃ secara umum berada pada level yang masih relatif seimbang.



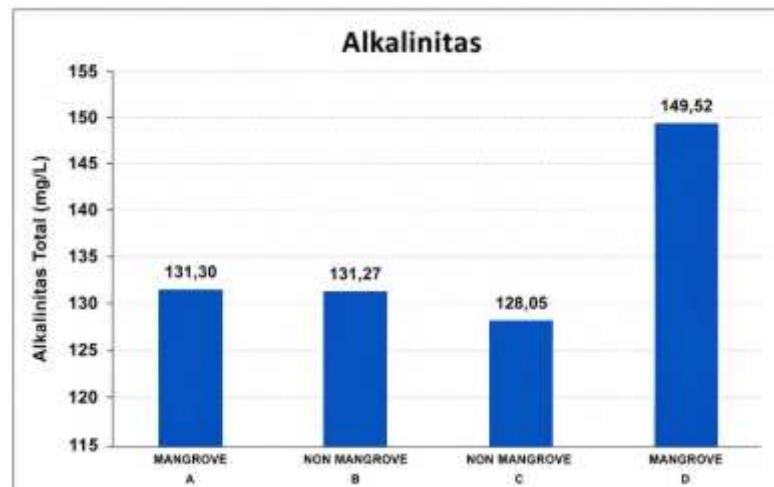
Gambar 6. Rata-rata PO₄ antarblok

Rata-rata konsentrasi fosfat (PO₄) antarblok memperlihatkan variasi dengan kisaran 0,92–1,16 mg/L. Blok D memiliki nilai tertinggi sebesar 1,16 mg/L, disusul Blok B dengan 1,01 mg/L. Sementara itu, Blok A dan C menunjukkan nilai lebih rendah namun hampir sama, masing-masing 0,93 mg/L dan 0,92 mg/L. Secara keseluruhan, konsentrasi PO₄ pada semua blok relatif seimbang, meskipun tambak mangrove di Blok D cenderung memiliki kandungan fosfat lebih tinggi.



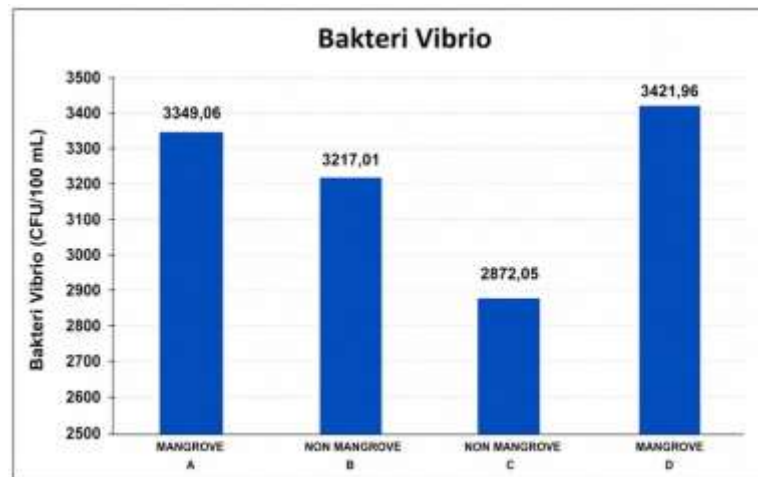
Gambar 7. Rata-rata TOM antarblok

Rata-rata total organic matter (TOM) menunjukkan perbedaan yang cukup jelas antarblok. Blok B mencatat nilai tertinggi sebesar 107,65 mg/L, disusul Blok A dan C yang relatif serupa, masing-masing 103,55 mg/L dan 103,19 mg/L. Sementara itu, Blok D memiliki nilai terendah dengan 95,39 mg/L. Pola ini mengindikasikan bahwa tambak non-mangrove (khususnya Blok B) cenderung mengalami akumulasi bahan organik lebih tinggi dibandingkan tambak mangrove.



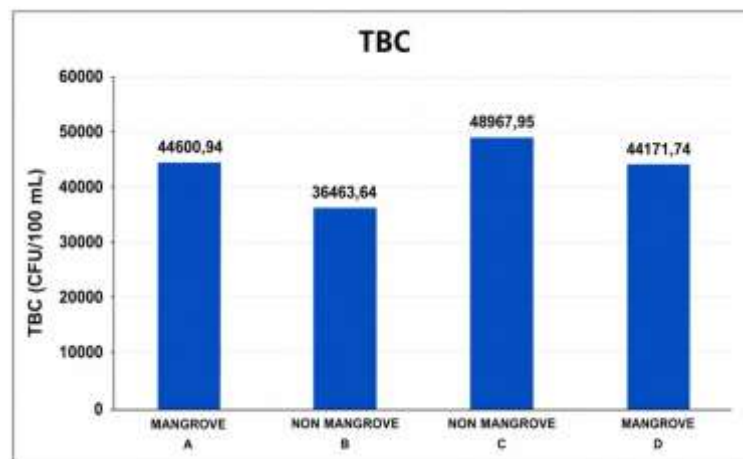
Gambar 8. Rata-rata alkalinitas total antarblok

Rata-rata alkalinitas total antarblok memperlihatkan variasi yang cukup nyata. Blok D memiliki nilai tertinggi sebesar 149,52 mg/L, jauh lebih tinggi dibandingkan blok lainnya. Blok A dan B menunjukkan nilai hampir sama, masing-masing 131,30 mg/L dan 131,27 mg/L, sedangkan Blok C mencatat nilai terendah yaitu 128,05 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa tambak mangrove, khususnya Blok D, memiliki kapasitas penyangga perairan yang lebih besar dibandingkan tambak non-mangrove.



Gambar 8. Rata-rata bakteri vibrio antarblok

Rata-rata total bakteri *Vibrio* antarblok berada pada kisaran 2.872–3.422 CFU/ml. Blok D mencatat nilai tertinggi sebesar 3.422 CFU/ml, disusul Blok A dengan 3.349 CFU/ml. Blok B memiliki nilai menengah sebesar 3.217 CFU/ml, sedangkan Blok C menunjukkan nilai terendah yaitu 2.872 CFU/ml. Secara umum, perbedaan jumlah *Vibrio* antarblok tidak terlalu besar, namun terlihat bahwa tambak mangrove (A dan D) tetap mencatat angka yang relatif tinggi.



Gambar 9. Rata-rata TBC antarblok

Rata-rata total bakteri (TBC) antarblok menunjukkan variasi yang cukup mencolok. Blok C mencatat nilai tertinggi sebesar 48.968 CFU/ml, diikuti Blok A dan Blok D dengan nilai yang hampir sama, masing-masing 44.601 CFU/ml dan 44.172 CFU/ml. Sementara itu, Blok B memiliki nilai terendah yakni 36.464 CFU/ml. Hasil ini menunjukkan bahwa kepadatan total bakteri cenderung lebih tinggi pada beberapa blok, khususnya non-mangrove (Blok C), dibandingkan lainnya.

Tabel 1. Hasil Uji Normalitas

Variabel	Mangrove	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	Tidak	.229	102	.000	.884	102	.000
	Ada	.220	95	.000	.911	95	.000
Salinitas	Tidak	.176	102	.000	.912	102	.000
	Ada	.181	95	.000	.934	95	.000
NH ₄	Tidak	.187	102	.000	.725	102	.000
	Ada	.221	95	.000	.839	95	.000
NO ₂	Tidak	.437	102	.000	.132	102	.000
	Ada	.333	95	.000	.350	95	.000
NO ₃	Tidak	.207	102	.000	.892	102	.000
	Ada	.204	95	.000	.888	95	.000
PO ₄	Tidak	.247	102	.000	.828	102	.000
	Ada	.251	95	.000	.774	95	.000
TOM	Tidak	.058	102	.200*	.963	102	.006
	Ada	.098	95	.024	.962	95	.008
Alkalinitas	Tidak	.057	102	.200*	.984	102	.237
	Ada	.125	95	.001	.961	95	.007
Bakteri Vibrio	Tidak	.108	102	.005	.941	102	.000
	Ada	.085	95	.087	.921	95	.000
TBC	Tidak	.238	102	.000	.493	102	.000
	Ada	.377	95	.000	.300	95	.000
Plankton	Tidak	.076	102	.168	.971	102	.025
	Ada	.086	95	.078	.987	95	.498

Berdasarkan hasil uji normalitas menggunakan Kolmogorov-Smirnov dan Shapiro-Wilk, hanya variabel TOM (pada tambak tanpa mangrove), Alkalinitas_Total (pada tambak tanpa mangrove), serta Total Plankton (pada kedua kelompok) yang menunjukkan distribusi normal ($p > 0,05$). Sementara itu, seluruh variabel lain termasuk pH, salinitas, NH₄, NO₂, NO₃, PO₄, Bakteri Vibrio total, dan TBC tidak berdistribusi normal. Oleh karena sebagian besar data tidak normal, maka analisis perbedaan antar kelompok dilakukan menggunakan uji non-parametrik Mann-Whitney U, bukan uji parametrik seperti t-test independen.

Tabel 2. Hasil Uji Mann-Whitney-U

Parameter	Mann-Whitney U	Z	Asymp. Sig.
pH	10566.0	-1.576	0.115
Salinitas	10068.0	-2.218	0.027
NH ₄	4593.0	-0.634	0.526
NO ₂	11644.0	-0.080	0.936
NO ₃	11404.5	-0.488	0.625
PO ₄	8811.0	-0.158	0.875
TOM	10161.5	-2.082	0.037
Alkalinitas	9467.5	-2.977	0.003
Bakteri Vibrio	11125.0	-0.842	0.400
TBC	8817.5	-3.810	0.000
Plankton	11568.0	-0.273	0.785

Berdasarkan hasil uji Mann-Whitney U, parameter kualitas air menunjukkan variasi yang berbeda antara tambak dengan dan tanpa mangrove. Nilai pH memiliki signifikansi 0,115 ($p > 0,05$), sehingga tidak terdapat perbedaan nyata antara kedua kelompok. Sebaliknya, variabel salinitas menunjukkan nilai signifikansi 0,027 ($p < 0,05$), yang berarti terdapat perbedaan signifikan antara tambak dengan dan tanpa mangrove. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan mangrove berpengaruh dalam menjaga kestabilan salinitas tambak.

Hasil pengujian pada parameter nutrisi memperlihatkan bahwa konsentrasi amonia (NH_4), nitrit (NO_2), nitrat (NO_3), dan fosfat (PO_4) memiliki nilai signifikansi $> 0,05$, sehingga tidak ada perbedaan yang bermakna antara tambak dengan mangrove dan tanpa mangrove. Namun, parameter TOM menunjukkan perbedaan signifikan ($p = 0,037$), yang mengindikasikan bahwa keberadaan mangrove berkontribusi terhadap akumulasi bahan organik di sedimen tambak. Selain itu, alkalinitas total juga berbeda nyata antar kelompok ($p = 0,003$), menandakan adanya peran mangrove dalam memengaruhi kapasitas penyangga perairan tambak.

Untuk parameter mikrobiologi, total bakteri *Vibrio* tidak menunjukkan perbedaan signifikan ($p = 0,400$), namun nilai total bakteri (TBC) berbeda sangat nyata antara kedua kelompok ($p = 0,000$). Hal ini mengindikasikan bahwa ekosistem mangrove memiliki pengaruh penting dalam menekan populasi bakteri total di lingkungan tambak. Sementara itu, kepadatan total plankton tidak berbeda signifikan ($p = 0,785$), menunjukkan bahwa keberadaan mangrove tidak memengaruhi kepadatan plankton secara langsung. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa ekosistem mangrove berperan penting dalam menjaga stabilitas parameter fisika-kimia utama, khususnya salinitas, TOM, alkalinitas, serta keseimbangan mikrobiologi pada tambak.

Tabel 3. Uji Korelasi Spearman

Parameter	pH	Salinitas	NH_4	NO_2	NO_3	PO_4	TOM	Alkalinitas	Bakteri <i>Vibrio</i>
pH	1.000	0.427**	0.426**	0.257**	0.027	0.667**	0.277**	-0.118*	-0.258**
Salinitas	0.000	1.000	0.627**	0.173**	0.168**	0.460**	-0.057	-0.422**	-0.355**
NH_4	0.000	0.000	1.000	0.265**	-0.155*	0.374**	0.184**	0.227**	0.296**
NO_2	0.000	0.002	0.000	1.000	0.198**	0.353**	0.251**	0.178**	0.054
NO_3	0.640	0.003	0.030	0.000	1.000	0.056	0.120*	-0.018	-0.035
PO_4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.366	1.000	0.268**	0.441**	0.189**
TOM	0.000	0.317	0.009	0.000	0.036	0.000	1.000	0.173**	0.277**
Alkalinitas	0.038	0.000	0.001	0.002	0.752	0.000	0.002	1.000	0.239**
Bakteri <i>Vibrio</i>	0.000	0.000	0.000	0.344	0.537	0.002	0.000	0.000	1.000

Hasil uji korelasi Spearman menunjukkan adanya hubungan yang cukup kuat antara beberapa parameter kualitas air. Angka di atas diagonal memperlihatkan skor r (koefisien korelasi) sedangkan skor di bawah diagonal memperlihatkan nilai p . Nilai pH berhubungan positif dengan salinitas ($r = 0,427$;

$p < 0,01$) namun berkorelasi negatif dengan NH_4 , NO_2 , PO_4 , TOM, alkalinitas total, dan total bakteri *Vibrio*. Korelasi negatif yang paling kuat terlihat antara pH dengan fosfat ($r = -0,667$; $p < 0,01$), mengindikasikan bahwa peningkatan fosfat berhubungan dengan penurunan pH. Hal ini penting karena perubahan pH dapat memengaruhi kelarutan nutrisi serta aktivitas mikroorganisme di perairan tambak.

Salinitas menunjukkan korelasi negatif yang signifikan dengan NH_4 ($r = -0,627$; $p < 0,01$), PO_4 ($r = -0,460$; $p < 0,01$), alkalinitas total ($r = -0,422$; $p < 0,01$), serta bakteri *Vibrio* ($r = -0,355$; $p < 0,01$). Sebaliknya, salinitas berkorelasi positif dengan NO_3 ($r = 0,168$; $p < 0,01$). Temuan ini menunjukkan bahwa fluktuasi salinitas dapat memengaruhi dinamika nutrisi anorganik dan bakteri di tambak. Menariknya, amonia (NH_4) sendiri berkorelasi positif dengan nitrit ($r = 0,265$; $p < 0,01$) dan fosfat ($r = 0,374$; $p < 0,01$), sehingga peningkatan senyawa organik nitrogen cenderung berjalan beriringan dengan fosfat.

Parameter lain yang juga menonjol adalah hubungan antar komponen nutrisi dan bahan organik. Fosfat berkorelasi positif dengan nitrit ($r = 0,353$; $p < 0,01$), TOM ($r = 0,268$; $p < 0,01$), alkalinitas total ($r = 0,441$; $p < 0,01$), serta bakteri *Vibrio* ($r = 0,189$; $p < 0,01$). Selain itu, TOM sendiri berhubungan positif dengan nitrit, nitrat, fosfat, alkalinitas, dan bakteri *Vibrio*. Pola ini menegaskan bahwa akumulasi bahan organik di perairan tambak erat kaitannya dengan ketersediaan nutrisi dan perkembangan bakteri. Secara keseluruhan, hasil korelasi ini menggambarkan bahwa keseimbangan kualitas air dalam tambak sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara parameter kimia dan mikrobiologi.

Kualitas Air pada Tambak Mangrove dan Non-Mangrove

Kualitas air merupakan salah satu faktor kunci dalam menentukan keberhasilan budidaya udang dan ikan di tambak. Hasil analisis deskriptif menunjukkan bahwa rata-rata pH pada tambak mangrove (8,23) relatif lebih stabil dibandingkan tambak non-mangrove (8,19). Nilai pH yang berada pada kisaran 7,5–8,5 dianggap ideal untuk budidaya udang, karena mendukung proses metabolisme serta aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat (Vázquez-Rosas-Landa et al., 2024). Keberadaan ekosistem mangrove diduga membantu menjaga kestabilan pH melalui kontribusi bahan organik dan proses dekomposisi yang terkontrol di sedimen. Hal ini sejalan dengan penelitian Alongi (2018) yang menyatakan bahwa mangrove berperan penting dalam menstabilkan parameter kimia perairan di daerah pesisir.

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan pada salinitas antara kedua kelompok tambak. Rata-rata salinitas pada tambak non-mangrove lebih tinggi (27,26 ppt) dibandingkan tambak mangrove (26,35 ppt). Variasi ini dapat dijelaskan oleh peran vegetasi mangrove dalam mengurangi laju evaporasi dan memperlambat intrusi air laut secara langsung ke tambak. Studi yang dilakukan oleh Torres et al. (2019) menunjukkan bahwa sistem tambak yang berdekatan dengan hutan mangrove cenderung memiliki fluktuasi salinitas yang lebih rendah, sehingga memberikan kondisi yang lebih stabil bagi organisme budidaya. Stabilitas salinitas penting karena fluktuasi yang ekstrem dapat

menyebabkan stres pada udang dan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit.

Perbedaan juga ditemukan pada konsentrasi nutrisi, khususnya amonium (NH_4), nitrit (NO_2), dan fosfat (PO_4). Rata-rata konsentrasi NH_4 lebih tinggi pada tambak non-mangrove (0,67 mg/L) dibandingkan tambak mangrove (0,55 mg/L). Demikian pula, konsentrasi PO_4 pada tambak non-mangrove sedikit lebih rendah dibandingkan tambak mangrove. Hal ini menunjukkan bahwa mangrove berfungsi sebagai biofilter alami yang mampu menyerap kelebihan nitrogen dan fosfor melalui akar serta asosiasi dengan mikroorganisme di sedimen (Sánchez-Gallego et al., 2023). Temuan ini konsisten dengan penelitian Potipat et al. (2024) yang menyebutkan bahwa ekosistem mangrove dapat meningkatkan kualitas air dengan menurunkan kandungan nutrisi anorganik yang berlebihan.

Parameter lain yang juga memperlihatkan variasi adalah total organik matter (TOM) dan alkalinitas. Rata-rata TOM pada tambak non-mangrove (105,41 mg/L) lebih tinggi dibandingkan tambak mangrove (101,08 mg/L). Peningkatan bahan organik pada tambak non-mangrove diduga terkait dengan akumulasi sisa pakan dan feses tanpa adanya proses filtrasi alami yang signifikan. Di sisi lain, alkalinitas pada tambak mangrove lebih tinggi (136,82 mg/L) dibandingkan tambak non-mangrove (129,65 mg/L), yang menunjukkan bahwa ekosistem mangrove berperan dalam menjaga kapasitas penyangga perairan. Ohimain et al. (2024) menekankan bahwa alkalinitas yang cukup penting untuk menstabilkan pH serta mendukung proses nitrifikasi, sehingga kondisi pada tambak mangrove dinilai lebih ideal untuk keberlanjutan budidaya.

Perbedaan Kualitas Air antara Tambak Mangrove dan Non-Mangrove

Hasil uji Mann-Whitney menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada beberapa parameter kualitas air antara tambak mangrove dan non-mangrove. Parameter yang berbeda nyata meliputi salinitas ($p = 0,027$), total organik matter/TOM ($p = 0,037$), alkalinitas total ($p = 0,003$), dan total bakteri (TBC) ($p = 0,000$). Perbedaan ini menegaskan bahwa keberadaan mangrove memberikan pengaruh yang substansial terhadap kondisi lingkungan tambak. Sebaliknya, parameter lain seperti pH, NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , bakteri *Vibrio*, dan total plankton tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Temuan ini memperlihatkan bahwa tidak semua aspek kualitas air terpengaruh langsung oleh keberadaan mangrove, melainkan terutama yang berkaitan dengan stabilitas kimia dan beban organik perairan.

Perbedaan salinitas yang signifikan antara kedua kelompok tambak menunjukkan peran mangrove dalam menahan fluktuasi intrusi air laut dan mengurangi tingkat evaporasi. Pada tambak non-mangrove, salinitas cenderung lebih tinggi, yang berpotensi meningkatkan stres fisiologis pada organisme budidaya. Ma et al. (2021) menegaskan bahwa salinitas yang terlalu tinggi atau berfluktuasi cepat dapat mengurangi pertumbuhan udang serta meningkatkan risiko serangan penyakit. Dengan demikian, kondisi tambak mangrove yang lebih stabil memberikan keuntungan ekologis bagi keberlanjutan budidaya.

Selain itu, perbedaan yang signifikan pada TOM menunjukkan bahwa tambak non-mangrove memiliki tingkat akumulasi bahan organik yang lebih tinggi dibandingkan tambak mangrove. Akumulasi ini kemungkinan besar berasal dari sisa pakan dan metabolit udang yang tidak terurai secara optimal. Keberadaan vegetasi mangrove yang berfungsi sebagai biofilter dapat membantu menurunkan beban organik melalui proses dekomposisi alami oleh mikroorganisme pada sedimen. Hasil ini konsisten dengan penelitian Lai et al. (2022) yang menjelaskan bahwa mangrove mampu meningkatkan kualitas perairan dengan menurunkan konsentrasi bahan organik dan nutrisi berlebih.

Sementara itu, perbedaan signifikan pada alkalinitas total dan total bakteri menunjukkan fungsi tambahan mangrove sebagai penyangga kimia dan regulator populasi mikroba. Tambak mangrove memiliki alkalinitas yang lebih tinggi, yang bermanfaat dalam menjaga kestabilan pH dan mendukung proses biologis seperti nitrifikasi (James et al., 2025). Di sisi lain, kepadatan bakteri yang lebih tinggi pada tambak non-mangrove dapat meningkatkan risiko penyakit, khususnya vibriosis, meskipun perbedaan langsung pada bakteri *Vibrio* total tidak signifikan. Penelitian Hassard et al. (2016) mendukung temuan ini dengan menyebutkan bahwa lingkungan dengan kualitas air yang lebih stabil dapat menekan pertumbuhan bakteri patogen. Dengan demikian, perbedaan parameter-parameter tersebut menegaskan pentingnya ekosistem mangrove dalam mendukung keberlanjutan tambak melalui mekanisme alami pengendalian kualitas air.

Hubungan Antarparameter Kualitas Air

Analisis korelasi Spearman menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara beberapa parameter kualitas air, baik yang bersifat positif maupun negatif. Misalnya, pH berkorelasi negatif kuat dengan PO_4 ($r = -0,667$, $p < 0,01$) dan NH_4 ($r = -0,426$, $p < 0,01$), tetapi positif dengan salinitas ($r = 0,427$, $p < 0,01$). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nutrisi anorganik seperti amonium dan fosfat dapat menurunkan kestabilan pH, sedangkan peningkatan salinitas cenderung mendukung kestabilan pH. Hasil ini sejalan dengan temuan Deris et al. (2022) yang menyebutkan bahwa akumulasi senyawa nitrogen tereduksi dapat menurunkan pH perairan melalui proses nitrifikasi, sedangkan salinitas yang moderat justru mampu menekan fluktuasi pH akibat peningkatan kapasitas penyangga air.

Hubungan antara salinitas dan NH_4 ($r = -0,627$, $p < 0,01$) memperlihatkan bahwa tambak dengan salinitas tinggi cenderung memiliki konsentrasi amonium yang lebih rendah. Kondisi ini mungkin berkaitan dengan peningkatan aktivitas oksidasi amonium menjadi nitrit pada lingkungan dengan salinitas yang relatif tinggi. Penelitian Behera et al. (2019) mendukung temuan ini dengan menjelaskan bahwa salinitas dapat memengaruhi bentuk nitrogen di perairan, di mana nitrifikasi lebih optimal pada kondisi salinitas menengah hingga tinggi. Dengan demikian, dinamika nitrogen dalam tambak tidak hanya ditentukan oleh input organik, tetapi juga oleh kondisi fisik-kimia seperti salinitas.

Selain itu, ditemukan korelasi positif antara NH_4 dengan NO_2 ($r = 0,265$, $p < 0,01$) serta antara NH_4 dengan PO_4 ($r = 0,374$, $p < 0,01$). Hubungan ini

mengindikasikan bahwa tingginya beban amonium di tambak juga diikuti dengan peningkatan nitrit dan fosfat, yang kemungkinan besar berasal dari sisa pakan dan feses organisme budidaya. Kondisi ini berpotensi memicu eutrofikasi apabila tidak dikendalikan. Menurut penelitian Al-Tarshi et al. (2024) kombinasi nitrogen dan fosfor yang tinggi merupakan faktor utama terjadinya ledakan alga (algal bloom), yang dapat menurunkan kualitas air dan mengganggu kelangsungan budidaya. Oleh karena itu, pemantauan berkelanjutan terhadap nutrisi anorganik sangat penting untuk menjaga keberlanjutan produksi.

Di sisi lain, korelasi signifikan juga ditemukan antara TOM dengan bakteri *Vibrio* ($r = 0,277$, $p < 0,01$) dan antara TOM dengan NO_2 ($r = 0,251$, $p < 0,01$). Hal ini menegaskan bahwa akumulasi bahan organik tidak hanya meningkatkan kadar nutrisi, tetapi juga memicu pertumbuhan bakteri oportunistik yang berpotensi patogen. Penelitian Yaabari et al. (2024) menekankan bahwa *Vibrio* spp. berkembang lebih cepat pada lingkungan kaya bahan organik, terutama jika kualitas air tidak dikelola dengan baik. Dengan demikian, keterkaitan antarparameter kualitas air yang ditemukan dalam penelitian ini menggambarkan kompleksitas interaksi ekosistem tambak, di mana faktor fisik, kimia, dan biologi saling memengaruhi satu sama lain.

Hubungan Faktor Ekologis dan Strategi Pengelolaan Tambak

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kualitas air tambak sangat dipengaruhi oleh interaksi berbagai parameter fisika, kimia, dan biologi. Tingginya konsentrasi nutrisi anorganik (NH_4 , NO_2 , PO_4) yang berkorelasi dengan peningkatan bahan organik dan bakteri *Vibrio* menunjukkan adanya risiko eutrofikasi serta penyakit pada organisme budidaya. Kondisi ini memiliki implikasi ekologis serius karena tidak hanya menurunkan produktivitas tambak, tetapi juga berpotensi mencemari lingkungan pesisir. Menurut Tong et al. (2022) pengelolaan tambak yang tidak memperhatikan keseimbangan ekosistem dapat menyebabkan degradasi kualitas air yang berkelanjutan, mengurangi keanekaragaman hayati, dan memicu masalah lingkungan jangka panjang.

Salah satu strategi pengelolaan yang dapat diterapkan adalah penggunaan biofilter alami seperti vegetasi mangrove di sekitar tambak. Mangrove diketahui memiliki kemampuan menyerap nutrisi berlebih serta menstabilkan parameter lingkungan seperti pH dan salinitas. Hasil ini relevan dengan penelitian Palit et al. (2022), yang menunjukkan bahwa ekosistem mangrove mampu berfungsi sebagai penyangga (buffer zone) dalam menyerap nitrogen dan fosfor sebelum masuk ke perairan terbuka. Oleh karena itu, keberadaan mangrove di sekitar tambak tidak hanya mendukung stabilitas lingkungan, tetapi juga berperan sebagai mekanisme mitigasi alami terhadap pencemaran.

Selain itu, penerapan manajemen pakan yang efisien sangat penting untuk menekan akumulasi bahan organik dan nutrisi anorganik. Tingginya kandungan TOM dalam penelitian ini berkorelasi positif dengan peningkatan bakteri *Vibrio*, yang umumnya berasal dari sisa pakan dan feses ikan atau udang. Hal ini selaras dengan temuan Nuangjui et al. (2023) yang menekankan bahwa efisiensi konversi pakan tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga

mengurangi risiko penurunan kualitas air akibat akumulasi limbah organik. Dengan demikian, pengaturan jumlah dan kualitas pakan menjadi langkah kunci dalam menjaga keseimbangan ekosistem tambak.

Pengelolaan kualitas air secara rutin melalui pemantauan parameter utama (pH, salinitas, nitrogen, fosfor, TOM, dan populasi bakteri) juga perlu diintegrasikan dalam praktik budidaya. Monitoring berkala memungkinkan deteksi dini terhadap potensi permasalahan lingkungan sebelum berkembang menjadi krisis ekologi. Menurut Kopprio et al. (2020) sistem akuakultur berkelanjutan harus menggabungkan aspek monitoring, biosecurity, serta praktik manajemen adaptif agar mampu menjaga keseimbangan produksi dan kelestarian lingkungan. Dengan demikian, implikasi ekologis dari hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pendekatan holistik dalam pengelolaan tambak untuk memastikan keberlanjutan jangka panjang.

Implikasi Penelitian terhadap Keberlanjutan Akuakultur

Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting dalam mendukung praktik akuakultur berkelanjutan, yang dapat dijelaskan melalui beberapa aspek berikut:

1. Stabilitas Kualitas Air

Stabilitas kualitas air menjadi kunci keberlanjutan tambak karena parameter fisik dan kimia yang terjaga akan mendukung pertumbuhan organisme budidaya sekaligus menekan risiko penyakit. Dalam penelitian ini, perbedaan signifikan antara tambak dengan dan tanpa mangrove menegaskan bahwa keberadaan ekosistem alami dapat berfungsi sebagai penyeimbang lingkungan. Hal ini sejalan dengan Ghosh et al. (2022) yang menyatakan bahwa praktik akuakultur berkelanjutan menuntut adanya sistem pendukung ekologi untuk menjaga kondisi perairan tetap optimal.

2. Pengendalian Bakteri Patogen

Korelasi antara tingginya bahan organik dengan peningkatan bakteri *Vibrio* menunjukkan perlunya pengelolaan limbah secara ketat untuk menekan perkembangan patogen. Keberadaan bakteri *Vibrio* yang tinggi tidak hanya membahayakan organisme tambak, tetapi juga menimbulkan risiko bagi kesehatan masyarakat pesisir. Menurut Alsharif et al. (2024) strategi pengendalian bakteri patogen harus mencakup kombinasi manajemen kualitas air, penggunaan probiotik, serta biosecurity. Dengan demikian, hasil penelitian ini menguatkan urgensi penerapan pendekatan terpadu dalam mengendalikan patogen di akuakultur.

3. Efisiensi Produksi

Efisiensi produksi sangat dipengaruhi oleh interaksi antara kualitas air, ketersediaan nutrisi, dan populasi plankton. Temuan bahwa parameter seperti salinitas, fosfat, dan TOM berhubungan erat dengan dinamika plankton menunjukkan bahwa pengelolaan yang tepat dapat meningkatkan produktivitas alami tambak sekaligus mengurangi biaya operasional. Hasil ini konsisten dengan Underwood et al. (2022) yang menekankan bahwa bioflok dan manajemen pakan efisien berkontribusi terhadap produksi yang lebih ramah lingkungan.

4. *Perlindungan Ekosistem Pesisir*

Keberadaan mangrove yang terbukti memengaruhi kualitas air tambak menunjukkan peran vital ekosistem ini dalam melindungi pesisir dari degradasi akibat aktivitas budidaya intensif. Selain menyerap nutrisi berlebih, mangrove juga berfungsi sebagai habitat biota lain yang mendukung keseimbangan ekosistem. Penelitian Puthusseri et al. (2021) menegaskan bahwa konservasi mangrove harus diintegrasikan ke dalam praktik akuakultur modern untuk memastikan keberlanjutan jangka panjang. Dengan demikian, hasil penelitian ini menekankan pentingnya sinergi antara konservasi ekosistem dan produksi perikanan.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini menunjukkan bahwa keberadaan ekosistem mangrove di sekitar tambak memiliki peran signifikan dalam menjaga kualitas air, menekan akumulasi bahan organik, serta memengaruhi dinamika mikrobioma dan plankton. Hasil uji statistik mengungkapkan adanya perbedaan nyata pada beberapa parameter penting, termasuk salinitas, TOM, alkalinitas, dan total bakteri *Vibrio*, antara tambak dengan dan tanpa mangrove. Selain itu, korelasi antarvariabel memperlihatkan hubungan yang erat antara nutrisi, kualitas air, dan keberadaan bakteri patogen. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa integrasi ekosistem mangrove dalam zona penyangga biosfer dapat mendukung keberlanjutan akuakultur sekaligus berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim melalui penyerapan karbon.

Berdasarkan temuan ini, disarankan agar pengelolaan akuakultur di kawasan pesisir mempertahankan dan memperluas area mangrove sebagai penyangga alami tambak, serta menerapkan strategi manajemen kualitas air yang terpadu untuk mengendalikan nutrisi dan bakteri patogen. Penelitian lanjutan perlu dilakukan dengan menambahkan variabel-variabel lain, seperti konsentrasi oksigen terlarut dan fluktuasi suhu harian, guna memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai interaksi ekosistem mangrove dengan produktivitas tambak. Selain itu, keterlibatan masyarakat pesisir dalam konservasi mangrove harus diperkuat sebagai bagian dari strategi pengelolaan akuakultur berkelanjutan.

PENELITIAN LANJUTAN

Penelitian lanjutan disarankan dilakukan dengan cakupan lokasi dan periode pengamatan yang lebih luas serta menambahkan parameter lingkungan, seperti oksigen terlarut, suhu, dan kandungan karbon sedimen. Selain itu, perlu dikaji efektivitas pengelolaan mangrove dalam meningkatkan produktivitas tambak dan mendukung keberlanjutan akuakultur di kawasan pesisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Tarshi, M., Dobretsov, S., & Al-Belushi, M. (2024). Bacterial Communities across Multiple Ecological Niches (Water, Sediment, Plastic, and Snail Gut) in Mangrove Habitats. *Microorganisms*, 12(8), 1561.
- Alsharif, S. M., Ismaeil, M., Saeed, A. M., & El-Sayed, W. S. (2024). Metagenomic 16S rRNA analysis and predictive functional profiling revealed intrinsic

- organohalides respiration and bioremediation potential in mangrove sediment. *BMC microbiology*, 24(1), 176.
- Behera, P., Mohapatra, M., Kim, J. Y., Adhya, T. K., Pattnaik, A. K., & Rastogi, G. (2019). Spatial and temporal heterogeneity in the structure and function of sediment bacterial communities of a tropical mangrove forest. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 3893-3908.
- Das, B. K., Chakraborty, H. J., Kumar, V., Rout, A. K., Patra, B., Das, S. K., & Behera, B. K. (2024). Comparative metagenomic analysis from Sundarbans ecosystems advances our understanding of microbial communities and their functional roles. *Scientific Reports*, 14(1), 16218.
- Deris, Z. M., Iehata, S., Gan, H. M., Ikhwanuddin, M., Najiah, M., Asaduzzaman, M., ... & Wong, L. L. (2022). Understanding the effects of salinity and *Vibrio harveyi* on the gut microbiota profiles of *Litopenaeus vannamei*. *Frontiers in Marine Science*, 9, 974217.
- Ghosh, A., Saha, R., & Bhadury, P. (2022). Metagenomic insights into surface water microbial communities of a South Asian mangrove ecosystem. *PeerJ*, 10, e13169.
- Hassard, F., Gwyther, C. L., Farkas, K., Andrews, A., Jones, V., Cox, B., & Malham, S. K. (2016). Abundance and distribution of enteric bacteria and viruses in coastal and estuarine sediments—A review. *Frontiers in microbiology*, 7, 1692.
- Hebbar, P., Han, O. B., Yan, N. X., Kay, D., Chu, K. Y., Woon, J. S. K., & Mascarenhas, R. (2025). Characterization of microbiome diversity unveils substantial microbial variation in mangrove soil sediments from coastal regions of Malaysia. *Access Microbiology*, 7(6), 000902-v3.
- James, G., Radhakrishnan, V., Marathippallam Jamal, J., Prasannan Geetha, P., Pillai, D., & Vattiringal Jayadrathan, R. K. (2025). Exploring the probiotic potential of *B. cereus* and *B. velezensis* associated with mangrove sediments in aquaculture. *Discover Oceans*, 2(1), 15.
- Kopprio, G. A., Neogi, S. B., Rashid, H., Alonso, C., Yamasaki, S., Koch, B. P., ... & Lara, R. J. (2020). *Vibrio* and bacterial communities across a pollution gradient in the bay of Bengal: unraveling their biogeochemical drivers. *Frontiers in microbiology*, 11, 594.
- Lai, J., Cheah, W., Palaniveloo, K., Suwa, R., & Sharma, S. (2022). A systematic review of the physicochemical and microbial diversity of well-preserved, restored, and disturbed mangrove forests: What is known and what is the way forward?. *Forests*, 13(12), 2160.
- Lim, S. J., Davis, B. G., Gill, D. E., Walton, J., Nachman, E., Engel, A. S., ... & Campbell, B. J. (2019). Taxonomic and functional heterogeneity of the gill microbiome in a symbiotic coastal mangrove lucinid species. *The ISME journal*, 13(4), 902-920.
- Ma, X. X., Jiang, Z. Y., Wu, P., Wang, Y. F., Cheng, H., Wang, Y. S., & Gu, J. D. (2021). Effect of mangrove restoration on sediment properties and bacterial community. *Ecotoxicology*, 30(8), 1672-1679.
- Nuangjui, M., Pimpang, B., Chulalaksananukul, W., & Glinwong, C. (2023). Biomonitoring by using rapid-read pathogenic bacteria indicator in

- sediments and bivalve mollusks: southern Gulf of Thailand, a mangrove area case study. *Trends in Sciences*, 20(4), 4682-4682.
- Ohimain, E. I., Ada, Y. N., & Kendabie, P. (2024). Physicochemical Properties and Bacterial Population in the Rhizosphere of Mangrove Plant Species at the Upper Reaches of Santa Barbara River, Central Niger Delta, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 28(11), 3601-3610.
- Palit, K., Rath, S., Chatterjee, S., & Das, S. (2022). Microbial diversity and ecological interactions of microorganisms in the mangrove ecosystem: Threats, vulnerability, and adaptations. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32467-32512.
- Potipat, J., Somnuek, C., & Mekprayoon, S. (2024). Water pollution influencing contamination of *Vibrio* bacteria in the coastal aquaculture area of Chanthaburi and Trat Provinces. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, 23(3), 255295-255295.
- Puthusseri, R. M., Nair, H. P., Johny, T. K., & Bhat, S. G. (2021). Insights into the response of mangrove sediment microbiomes to heavy metal pollution: Ecological risk assessment and metagenomics perspectives. *Journal of Environmental Management*, 298, 113492.
- Sánchez-Gallego, J., Atencio, L., Pérez, J., Dupuy, O., Díaz-Ferguson, E., & Godoy-Vitorino, F. (2023). Assessment of *Vibrio* populations in a transect of *Rhizophora* mangle in Punta Galeta, Panamá: culture-dependent analyses reveal biotechnological applications. *Revista de biología tropical*, 71(1).
- Tong, F., Chen, G., Feng, X., Liu, Y., & Chen, P. (2022). The effect of the artificial reef on the structure and function of sediment bacterial community. *Sustainability*, 14(22), 14728.
- Torres, G. G., Figueroa-Galvis, I., Muñoz-García, A., Polanía, J., & Vanegas, J. (2019). Potential bacterial bioindicators of urban pollution in mangroves. *Environmental Pollution*, 255, 113293.
- Underwood, G. J., Dumbrell, A. J., McGenity, T. J., McKew, B. A., & Whitby, C. (2022). The microbiome of coastal sediments. *The marine microbiome*, 479-534.
- Vázquez-Rosas-Landa, M., Pérez-Ceballos, R., Zaldívar-Jiménez, A., Hereira-Pacheco, S. E., Perez-Gonzalez, L. D., Prieto-Davó, A., & Canales-Delgadillo, J. C. (2024). Flooding patterns shape microbial community in mangrove sediments. *bioRxiv*, 2024-07.
- Yaabari, A., Ohimain, E. I., & Kendabie, P. (2024). Assessing Physicochemical Parameters, Microbial Density and Diversity in the Surface Water and Sediments of the Santa Barbara River Mangrove Ecosystem at Nembe, Bayelsa State, Nigeria. *Nigerian Journal of Oil and Gas Technology*, 5(1), 47-62.