

**HUBUNGAN KELIMPAHAN MIKROPLASTIK DENGAN KERUSAKAN
HISTOPATOLOGIS PADA INSANG DAN USUS UDANG VANAME
(*Litopenaeus vannamei*) YANG DIBUDIDAYAKAN DI TAMBAK DI PROBOLINGGO,
JAWA TIMUR, INDONESIA**

Andhika Farras Rahardian Putra*, Asus Maizar Suryanto Hertika, dan Yunita Maimunah

Departemen Manajemen Sumberdaya Perikanan dan Kelautan, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur,
Indonesia

(Naskah diterima: 20 Mei 2025; Revisi final: 16 Juni 2025; Disetujui publikasi: 16 Juni 2025)

ABSTRAK

Peningkatan kontaminasi mikroplastik di lingkungan tambak menjadi ancaman serius bagi kesehatan udang vaname (*Litopenaeus vannamei*). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kelimpahan mikroplastik pada insang dan usus dengan tingkat kerusakan histopatologis udang vaname yang dibudidayakan di tambak yang berlokasi di Probolinggo, Jawa Timur, Indonesia. Penelitian dilakukan secara deskriptif kuantitatif menggunakan analisis korelasi Spearman. Sampel udang diambil dari tiga lokasi tambak dan dianalisis secara histologis untuk menilai skor kerusakan jaringan. Hasil menunjukkan korelasi sangat kuat dan signifikan antara kelimpahan mikroplastik dengan skor kerusakan insang ($r = 0,815$; $p\text{-value} = 0,007$), degenerasi usus ($r = 0,885$; $p\text{-value} = 0,002$), nekrosis ($r = 0,804$; $p\text{-value} = 0,009$), dan inflamasi ($r = 0,688$; $p\text{-value} = 0,041$). Temuan ini menunjukkan bahwa mikroplastik berkontribusi besar terhadap kerusakan struktural organ respirasi dan pencernaan udang. Penelitian ini menegaskan pentingnya pengelolaan pencemaran mikroplastik dalam sistem budidaya berkelanjutan.

KATA KUNCI: histopatologi; insang; *Litopenaeus vannamei*; mikroplastik; usus

ABSTRACT: *Correlation between Microplastic Abundance and Histopathological Damage in Gills and Intestines of Whiteleg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Cultivated in Ponds in Probolinggo, East Java, Indonesia*

*The increasing presence of microplastics contamination in shrimp ponds poses a serious threat to the health of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). This study aimed to analyze the relationship between microplastic abundance in gills and intestines with the level of histopathological damage in whiteleg shrimp cultivated in ponds located in Probolinggo, East Java, Indonesia. A quantitative descriptive method was used with Spearman correlation analysis. Shrimp samples were collected from three pond locations and histologically examined to assess tissue damage scores. The results showed a very strong and significant correlation between microplastics abundance and gill damage ($r = 0.815$; $p\text{-value} = 0.007$), intestinal degeneration ($r = 0.885$; $p\text{-value} = 0.002$), necrosis ($r = 0.804$; $p\text{-value} = 0.009$), and inflammation ($r = 0.688$; $p\text{-value} = 0.041$). These findings indicated that microplastics*

*Korespondensi: Departemen Manajemen Sumberdaya Perikanan dan Kelautan
Universitas Brawijaya
Email: andhikafarras3@student.ub.ac.id

significantly contribute to structural damage in the respiratory and digestive organs of shrimp. This study highlighted the importance of effectively managing microplastic pollution in sustainable aquaculture systems.

KEYWORDS: *gills; histopathology; intestines; microplastic; Litopenaeus vannamei*

PENDAHULUAN

Udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) merupakan salah satu komoditas perikanan bernilai tinggi yang sangat potensial untuk dikembangkan di Indonesia. Keunggulan udang ini terletak pada ketahanannya terhadap penyakit, kemampuan beradaptasi dengan perubahan kualitas air, serta pertumbuhannya yang cepat dan kepadatan tebar yang tinggi, menjadikannya pilihan utama dalam budidaya perikanan (Anwar & Abdurrohman, 2020). Meski demikian, keberhasilan budidaya udang vaname sangat bergantung pada kondisi lingkungan, terutama kualitas air. Jika kualitas air tidak sesuai dengan standar yang dibutuhkan, maka akan terjadi berbagai masalah, seperti peningkatan risiko penyakit, penurunan performa udang, hingga kematian massal, yang dapat menimbulkan kerugian ekonomi.

Salah satu tantangan utama dalam budidaya udang vaname adalah peningkatan pencemaran mikroplastik di lingkungan. Mikroplastik, yaitu plastik yang berukuran < 5 mm (Ningrum *et al.*, 2022), semakin banyak ditemukan di ekosistem perairan, termasuk tambak budidaya. Mikroplastik ini dapat berasal dari berbagai sumber, seperti degradasi plastik yang digunakan dalam budidaya, misalnya pelapis dan jaring plastik, serta partikel plastik dari air limbah yang masuk ke tambak (Chen *et al.*, 2021; Timilsina *et al.*, 2023b). Akibatnya, mikroplastik dapat terakumulasi di tambak karena tambak merupakan ekosistem perairan yang umumnya tertutup atau semi-tertutup, sehingga mikroplastik cenderung menumpuk di dalamnya (Chen *et al.*, 2021).

Mikroplastik diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu mikroplastik primer dan mikroplastik sekunder. Mikroplastik primer

merupakan partikel plastik yang secara langsung diproduksi dalam ukuran kecil untuk digunakan dalam produk-produk konsumen seperti kosmetik, deterjen, dan bahan industri (Andrady, 2017). Mikroplastik sekunder berasal dari proses degradasi plastik berukuran besar akibat paparan sinar ultraviolet, abrasi fisik, dan aktivitas mikroorganisme di lingkungan perairan (Cole *et al.*, 2011). Karakteristik fisik dan kimiawi mikroplastik, seperti ukuran, bentuk (misalnya serat, pelet, dan fragmen), dan komposisi polimer, berperan penting dalam menentukan kemampuan bioakumulasi dan toksisitasnya pada organisme akuatik (Galloway *et al.*, 2017).

Di ekosistem tambak, mikroplastik dapat terakumulasi melalui berbagai mekanisme. Tambak semi-tertutup dengan sirkulasi air yang terbatas cenderung menjadi reservoir bagi partikel plastik, yang masuk dari penggunaan plastik dalam budidaya, seperti pelapis kolam dan jaring, serta limbah plastik yang terbawa oleh aliran air dari lingkungan sekitar (Chen *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2018). Karena ukurannya yang sangat kecil, mikroplastik mudah terdispersi dan dapat diserap oleh organisme tingkat trofik rendah seperti fitoplankton dan zooplankton. Organisme ini kemudian menjadi sumber makanan bagi udang vaname, menyebabkan akumulasi mikroplastik dalam jaringan udang dan meningkatkan risiko toksikologi pada kesehatannya (Kiran *et al.*, 2022). Proses transfer trofik ini menyebabkan peningkatan kadar mikroplastik dalam tubuh udang (Kiran *et al.*, 2022). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa paparan mikroplastik dapat menimbulkan dampak negatif pada udang, termasuk gangguan metabolisme, perubahan pada jaringan organ, gangguan reproduksi, dan peningkatan angka kematian (Timilsina *et*

al., 2023a). Mikroplastik juga diketahui dapat merusak organ, khususnya sistem pernafasan (insang) dan sistem pencernaan (usus), yang merupakan jalur utama masuknya partikel mikroplastik ke dalam tubuh udang.

Insang pada udang berfungsi tidak hanya sebagai organ pernafasan untuk pertukaran gas, tetapi juga berperan penting dalam regulasi osmotik, ekskresi amonia, dan pertahanan imun awal terhadap patogen dan partikel asing (Sousa *et al.*, 2021). Karena langsung berinteraksi dengan lingkungan eksternal, insang menjadi salah satu organ yang paling rentan terhadap kerusakan akibat kontaminan seperti mikroplastik, logam berat, dan bahan kimia toksik. Mikroplastik yang masuk melalui ventilasi insang dapat mengakibatkan lesi struktural seperti hiperplasia, fusi lamela sekunder, dan edema, yang pada akhirnya mengganggu proses respirasi dan menyebabkan stres oksidatif pada udang (Jovanovic, 2017; Silva *et al.*, 2021).

Selain insang, saluran pencernaan, terutama usus, juga memiliki peran sentral dalam kesehatan fisiologis udang. Usus berfungsi sebagai tempat utama penyerapan nutrisi dan menjadi barikade pertama terhadap zat asing yang masuk bersama pakan atau air. Ketika mikroplastik tertelan, partikel-partikel ini dapat berinteraksi dengan mukosa usus dan memicu peradangan, abrasi, serta degenerasi sel epitel yang mengganggu penyerapan nutrisi (Lee *et al.*, 2019). Selain itu, mikroplastik dapat bertindak sebagai vektor pembawa polutan organik persisten atau mikroorganisme patogen yang melekat pada permukaannya, sehingga meningkatkan risiko infeksi dan stres sistemik pada udang (Wright & Kelly, 2017). Dalam jangka panjang, kerusakan organ-organ ini berdampak signifikan terhadap pertumbuhan, efisiensi pakan, dan tingkat kelangsungan hidup udang, yang pada akhirnya akan memengaruhi produktivitas tambak secara keseluruhan.

Sejumlah studi telah melaporkan keberadaan mikroplastik dalam tubuh udang

dan potensi dampaknya terhadap kesehatan organisme, seperti gangguan fisiologis dan kerusakan jaringan. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya bersifat deskriptif atau terbatas pada deteksi mikroplastik, tanpa menganalisis keterkaitannya secara kuantitatif dengan kerusakan organ target. Padahal, organ insang dan usus merupakan pintu masuk utama partikel asing dan sangat rentan terhadap stresor lingkungan. Analisis hubungan langsung antara kelimpahan mikroplastik dan derajat kerusakan histopatologi pada organ-organ ini sangat penting untuk mengidentifikasi potensi toksisitas mikroplastik secara biologis. Dengan mempertimbangkan meningkatnya ancaman mikroplastik dalam sistem budidaya dan minimnya data korelatif yang menunjukkan dampak spesifiknya terhadap integritas jaringan udang. Penelitian ini menjadi relevan dan mendesak, karena kajian ini akan memberi dasar ilmiah untuk mitigasi risiko dan pengembangan sistem budidaya berkelanjutan di Indonesia.

Probolinggo, Jawa Timur, Indonesia, merupakan salah satu sentra utama budidaya udang vaname di Indonesia dengan tingkat produksi yang tinggi. Namun, hingga kini masih sangat terbatas penelitian yang secara langsung mengaitkan kelimpahan mikroplastik di tambak dengan tingkat kerusakan jaringan pada organ vital udang, seperti insang dan usus. Padahal, mikroplastik yang terakumulasi dalam sistem tambak semi-tertutup berpotensi menimbulkan gangguan fisiologis yang serius, termasuk stres oksidatif, kerusakan jaringan, dan penurunan daya tahan tubuh udang. Oleh karena itu, penelitian ini secara khusus dilakukan di tambak-tambak Probolinggo untuk menganalisis kelimpahan mikroplastik pada media air, insang, dan usus udang vaname, serta mengevaluasi hubungan kuantitatifnya terhadap kerusakan jaringan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang kuat bagi strategi mitigasi pencemaran mikroplastik dan pengembangan sistem budidaya yang lebih berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2024 hingga Februari 2025 di wilayah tambak udang vaname yang terletak di Probolinggo, Jawa Timur. Wilayah ini dipilih karena merupakan salah satu sentra utama budidaya udang di Indonesia dengan sistem tambak semi-intensif hingga intensif yang padat produksi. Selain itu, letak geografis Probolinggo yang berada di pesisir utara Pulau Jawa menjadikannya rentan terhadap paparan limbah plastik dari aktivitas domestik dan industri di sekitarnya, yang berpotensi memperburuk pencemaran mikroplastik di lingkungan tambak.

Pengambilan sampel dilakukan di tiga lokasi tambak berbeda yang mewakili variasi kondisi manajemen budidaya dan tingkat paparan

lingkungan. Lokasi-lokasi tersebut dipilih berdasarkan kemudahan akses, izin pemilik, serta riwayat penggunaan *input* budidaya berbasis plastik seperti jaring, penutup terpal, dan saluran distribusi air. Seluruh sampel udang yang diambil kemudian dianalisis secara *ex-situ* di Laboratorium Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya. Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengevaluasi parameter-parameter penting seperti kelimpahan mikroplastik dalam organ, serta tingkat kerusakan pada jaringan insang dan usus. Lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif, yaitu suatu metode yang bertujuan untuk menggambarkan secara sistematis, faktual, dan akurat mengenai fakta-



Gambar 1. Lokasi tambak udang vaname di Probolinggo, Jawa Timur, Indonesia, untuk analisis kelimpahan mikroplastik dan histopatologi insang serta usus pada udang vaname

Figure 1. Whiteleg shrimp pond locations in Probolinggo, East Java, Indonesia, for analysis of microplastic abundance and histopathology of whiteleg shrimp's gills and intestines

fakta serta hubungan antarfenomena yang diteliti berdasarkan data numerik. Metode ini memungkinkan peneliti untuk mengamati, mengukur, dan mendeskripsikan suatu gejala apa adanya, tanpa melakukan manipulasi atau intervensi terhadap variabel yang diteliti (Sulistiyawati *et al.*, 2022). Dengan pendekatan ini, data yang dikumpulkan dianalisis secara statistik untuk memberikan gambaran yang obyektif mengenai kondisi yang terjadi di lapangan.

Dalam penelitian ini, metode deskriptif kuantitatif digunakan untuk mengevaluasi kelimpahan mikroplastik pada organ insang dan usus udang vaname, serta tingkat kerusakan histopatologis pada jaringan tersebut. Data yang diperoleh dari hasil pengamatan mikroskopis dan analisis laboratorium dinyatakan dalam bentuk angka (seperti jumlah partikel per gram jaringan dan skor kerusakan jaringan), yang selanjutnya dianalisis menggunakan uji korelasi Spearman untuk mengetahui adanya hubungan antara dua variabel. Metode ini dianggap sesuai karena tidak hanya mampu memberikan informasi kuantitatif mengenai kondisi aktual di lapangan, tetapi juga memungkinkan eksplorasi awal terhadap potensi hubungan antara paparan mikroplastik dan dampaknya terhadap struktur jaringan organ vital udang.

Metode Sampling

Menurut Sugiyono (2012), *simple random sampling* adalah metode pengambilan sampel secara acak sederhana, di mana setiap anggota populasi memiliki peluang yang sama untuk terpilih sebagai sampel. Teknik ini digunakan ketika populasi dianggap homogen atau memiliki karakteristik yang relatif seragam, sehingga tidak diperlukan stratifikasi atau klasifikasi lanjutan. Kelebihan dari metode ini adalah menghindari bias dalam pemilihan sampel, serta memungkinkan generalisasi hasil penelitian secara lebih obyektif terhadap populasi yang diteliti.

Dalam penelitian ini, *simple random sampling* diterapkan untuk mengambil sampel udang vaname dari tiga lokasi tambak berbeda di wilayah Probolinggo. Dari setiap lokasi, pengambilan sampel dilakukan sebanyak tiga kali (triplo), dengan rentang waktu antarpengambilan selama 2 minggu (14 hari), untuk mengakomodasi variasi temporal yang mungkin memengaruhi paparan mikroplastik. Pengambilan sampel udang dilakukan menggunakan alat bantu anco (Hariri, 2021), yaitu jaring serok yang digunakan untuk menangkap udang secara acak dari kolam budidaya. Udang yang tertangkap kemudian dipilih secara acak berdasarkan ukuran yang relatif seragam guna menghindari perbedaan fisiologis yang ekstrem akibat variasi umur atau biomassa. Setelah dikumpulkan, seluruh sampel dimasukkan ke dalam *cool box* berisi air kolam dan aerator untuk menjaga kesegaran dan mencegah degradasi jaringan sebelum dilakukan analisis laboratorium serta mencegah terjadinya stres terhadap udang yang telah diambil. Penanganan sampel yang cepat dan steril sangat penting dalam penelitian ini agar hasil identifikasi mikroplastik dan observasi histopatologis mencerminkan kondisi aktual jaringan udang di lapangan.

Analisis Sampel

Prosedur preparasi sampel udang untuk identifikasi mikroplastik (Chairrany & Sa'adah, 2021) diawali dengan mengukur bobot udang, panjang udang, dan bobot organ udang. Organ yang akan dianalisis, seperti usus dan insang, diambil dan dimasukkan ke dalam *beaker glass*. *Beaker glass* kemudian ditutup dengan *aluminium foil* dan dimasukkan ke dalam *oven* pada suhu 75°C selama 24 jam untuk mengeringkan sampel. Setelah itu, bobot kering sampel ditimbang. Selanjutnya, 20 mL larutan Fe(II) 0,05 M dan 20 mL H₂O₂ 30% (dengan rasio 1 g bobot kering : 20 mL H₂O₂ 30%) ditambahkan ke dalam *beaker glass* yang berisi sampel. Larutan Fe(II) diperoleh

dengan melarutkan 7,5 g Fe dan 2 mL H₂SO₄ ke dalam 500 mL air deionisasi. Sampel didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang. Kemudian, sampel dipanaskan di *hotplate* pada suhu 40-60°C hingga tidak ada reaksi atau gelembung yang terlihat. Jika gelembung muncul hingga tumpah keluar, air deionisasi dapat ditambahkan untuk memperlambat reaksi. Setelah sampel didinginkan, proses penyaringan dilakukan menggunakan *vacuum pump set* dan kertas saring Whatman No. 41. Kelimpahan mikroplastik pada organ dihitung dengan rumus (1) (Arisanti *et al.*, 2023).

$$\text{Kelimpahan Mikroplastik} = \frac{\text{Jumlah Partikel Mikroplastik}}{\text{Bobot Sampel (g)}} \dots\dots\dots(1)$$

Proses preparasi histologi jaringan usus dan insang udang vaname dilakukan melalui tiga tahap, yaitu pembuatan blok parafin, pemotongan jaringan, dan pewarnaan (Apriani *et al.*, 2023). Jaringan terlebih dahulu difiksasi dalam larutan formalin 10% selama 24 jam, kemudian mengalami dehidrasi bertahap menggunakan alkohol 70% hingga 100%, serta larutan campuran alkohol dan xylol, sebelum direndam dalam xylol murni. Parafinasi dilakukan dalam *oven* bersuhu 50–60°C dengan beberapa tahapan parafin, dilanjutkan proses *embedding* dalam cetakan berisi parafin cair dan didinginkan hingga mengeras. Blok jaringan kemudian dipotong setebal 5 mikron menggunakan mikrotom, lalu diletakkan di atas *object glass* dan dikeringkan. Deparafinasi dilakukan melalui perendaman bertahap dalam xylol dan alkohol menurun hingga 70%, kemudian jaringan dibilas dalam akuades. Pewarnaan dilakukan dengan mencelupkan preparat dalam larutan hematoksilin dan eosin, lalu dilanjutkan rehidrasi dengan alkohol meningkat secara bertahap dan xylol (Sukarni *et al.*, 2012). Preparat ditutup menggunakan media perekat *distyrene plasticizer xylene* (DPX) dan kaca penutup (*cover glass*), kemudian dikeringkan dan diamati di bawah mikroskop dengan perbesaran 40–1000 kali. Indikator pewarnaan hematoksilin eosin yang berhasil adalah inti sel berwarna ungu tua dan

sitoplasma berwarna merah (Das *et al.*, 2002).

Analisis Data

Dalam penelitian ini, digunakan analisis korelasi *rank* Spearman untuk mengevaluasi hubungan antara dua variabel ordinal, yaitu kelimpahan mikroplastik pada organ insang dan usus dengan tingkat kerusakan jaringan tersebut. Korelasi *rank* Spearman merupakan metode statistik non-parametrik yang digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan antara dua variabel yang berjenjang (ordinal), tanpa mengasumsikan distribusi normal pada data (Mustofani, 2022).

Metode ini dipilih karena data yang diperoleh berupa skor atau tingkat kerusakan jaringan (misalnya degenerasi, nekrosis, dan inflamasi) dan jumlah partikel mikroplastik yang tidak selalu terdistribusi secara normal atau berskala interval. Keunggulan dari uji Spearman adalah fleksibilitasnya dalam menganalisis data dengan distribusi tidak normal dan skala data ordinal, serta kemampuannya dalam mengidentifikasi korelasi monotonik antara dua variabel. Dengan demikian, analisis ini sangat relevan untuk menguji sejauh mana peningkatan jumlah mikroplastik dalam jaringan udang berkorelasi dengan tingkat kerusakan jaringan yang diamati secara histologis. Koefisien korelasi *rank* Spearman dihitung menggunakan rumus (2) dan diinterpretasikan ke dalam hubungan antarvariabel dari sangat lemah hingga sangat kuat yang diuraikan pada Tabel 1.

$$r = \frac{n \sum X_i Y_i - (\sum X_i) (\sum Y_i)}{\sqrt{(n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2) (n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2)}} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

r : Koefisien korelasi Spearman

n : Jumlah pasangan data (banyaknya sampel atau ulangan)

X_i : Nilai peringkat pada variabel X (kelimpahan mikroplastik)

Y_i : Nilai peringkat pada variabel Y (kerusakan jaringan)

Tabel 1. Tingkat hubungan antarvariabel uji berdasarkan interval koefisien korelasi Spearman
Table 1. Correlation levels between tested variabels based on Spearman's correlation coefficient intervals

Interval koefisien korelasi Spearman (<i>r value</i>) <i>Intervals of Spearman's correlation coefficient (r value)</i>	Tingkat hubungan <i>Correlation levels</i>
0,00-1,199	Sangat lemah <i>Very weak</i>
0,20-0,399	Lemah <i>Weak</i>
0,40-0,599	Sedang <i>Moderate</i>
0,60-0,799	Kuat <i>Strong</i>
0,800-1,000	Sangat kuat <i>Very strong</i>

Sumber: Mustofani (2022)
Reference: Mustofani (2022)

HASIL DAN BAHASAN

Kelimpahan Mikroplastik pada Organ Udang Vaname

Tabel 2 menyajikan data kelimpahan mikroplastik pada dua organ utama udang vaname, yaitu insang dan usus, yang diperoleh dari tiga lokasi tambak berbeda. Data diambil dari tiga individu (repetisi) pada masing-masing lokasi untuk mengevaluasi variasi kelimpahan partikel mikroplastik (partikel g⁻¹) pada tiap organ. Informasi ini penting untuk mengidentifikasi potensi akumulasi mikroplastik di organ-organ target yang berperan penting dalam fungsi respirasi dan pencernaan.

Kelimpahan mikroplastik (Tabel 2) pada organ insang udang vaname menunjukkan adanya variasi antarlokasi dan individu yang cukup mencolok. Rata-rata jumlah partikel mikroplastik tertinggi ditemukan pada Tambak 1 dengan kisaran 77,05–93,88 partikel g⁻¹, diikuti oleh Tambak 2 (71,43–85,81 partikel g⁻¹), dan terendah pada Tambak 3 (55,56–91,27 partikel g⁻¹). Hasil ini mengindikasikan bahwa insang sebagai organ respirasi utama memiliki

potensi tinggi untuk menangkap mikroplastik dari lingkungan perairan. Lamela insang menjadi titik masuk potensial mikroplastik karena fungsinya dalam menyaring air saat respirasi.

Insang udang vaname yang berfungsi sebagai organ respirasi utama terbukti sangat rentan terhadap paparan mikroplastik. Partikel-partikel kecil ini tidak hanya menghambat fungsi filtrasi dan pertukaran gas, tetapi juga membawa senyawa toksik yang teradsorpsi dari lingkungan perairan, sehingga meningkatkan risiko kerusakan jaringan. Kelimpahan mikroplastik yang cukup tinggi pada organ insang di semua lokasi *sampling* menunjukkan adanya interaksi langsung antara insang dengan mikroplastik di lingkungan budidaya (Timilsina *et al.*, 2023b). Penurunan efisiensi asupan oksigen akibat obstruksi fisik oleh mikroplastik berpotensi menimbulkan stres fisiologis, menurunkan laju pertumbuhan, gangguan metabolisme serta meningkatkan risiko infeksi sekunder (Hsieh *et al.*, 2021). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa akumulasi mikroplastik dapat menyebabkan deformasi jaringan insang serta menurunnya ekspresi gen yang berkaitan dengan metabolisme dan detoksifikasi (Xing

Tabel 2. Kelimpahan mikroplastik pada organ insang dan usus udang vaname hasil budidaya dari Probolinggo, Jawa Timur, Indonesia

Table 2. Abundance of microplastics in the gills and intestines of farmed whiteleg shrimp from Probolinggo, East Java, Indonesia

Lokasi <i>Location</i>	Sampling	Kelimpahan mikroplastik (partikel g ⁻¹) <i>Microplastic abundance (particles g⁻¹)</i>	
		Insang <i>Gills</i>	Usus <i>Intestines</i>
Tambak 1 <i>Pond 1</i>	1	77,05	1736,43
	2	86,35	1987,95
	3	93,88	2075,42
Tambak 2 <i>Pond 2</i>	1	71,43	1359,29
	2	85,24	1711,06
	3	85,81	1834,67
Tambak 3 <i>Pond 3</i>	1	55,56	1497,84
	2	83,51	1558,65
	3	91,27	1931,08

et al., 2023). Dengan demikian, keberadaan mikroplastik di lingkungan budidaya dapat menjadi ancaman serius bagi kesehatan fisiologis udang vaname, khususnya melalui kerusakan jaringan insang.

Berdasarkan hasil penelitian dan literatur, dapat disimpulkan bahwa insang udang vaname merupakan salah satu organ yang paling rentan terhadap akumulasi mikroplastik akibat kontak langsung dengan lingkungan perairan. Tingginya kelimpahan mikroplastik pada insang di berbagai lokasi tambak menunjukkan bahwa proses respirasi berperan penting dalam masuknya partikel tersebut ke dalam tubuh udang. Akumulasi ini tidak hanya mengganggu fungsi fisiologis seperti pertukaran gas dan filtrasi, tetapi juga berpotensi menyebabkan kerusakan jaringan, gangguan metabolisme hingga peningkatan risiko infeksi. Oleh karena itu, mikroplastik di lingkungan budidaya menjadi ancaman nyata terhadap kesehatan dan kelangsungan hidup udang vaname.

Usus udang vaname juga menunjukkan tingkat kelimpahan mikroplastik (Tabel 2) yang tinggi, bahkan lebih tinggi dibanding insang pada masing-masing lokasi. Rata-

rata jumlah partikel mikroplastik tertinggi tercatat di Tambak 1 dengan kisaran 1736,43–2075,42 partikel g⁻¹, diikuti oleh Tambak 2 (1359,29–1834,67 partikel g⁻¹), dan Tambak 3 (1497,84–1931,08 partikel g⁻¹). Hal ini mengindikasikan bahwa jalur pencernaan menjadi rute utama masuknya mikroplastik ke dalam tubuh udang, kemungkinan melalui konsumsi pakan atau partikel tersuspensi di air. Temuan ini memperkuat anggapan bahwa usus berperan penting dalam proses akumulasi mikroplastik akibat interaksi langsung dengan bahan makanan dan lingkungan budidaya yang tercemar.

Berdasarkan nilai rata-rata, kontaminasi mikroplastik dalam tubuh udang dari tiga lokasi tambak menunjukkan bahwa Tambak 1 memiliki tingkat kontaminasi tertinggi dibanding dua lokasi lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa Tambak 1 kemungkinan berada lebih dekat dengan sumber mikroplastik potensial, seperti saluran masuk air dari pemukiman, aktivitas industri sekitar atau penggunaan material berbahan plastik dalam kegiatan budidaya. Faktor kedekatan geografis terhadap sumber pencemar dapat menjadi determinan penting dalam akumulasi mikroplastik pada organisme

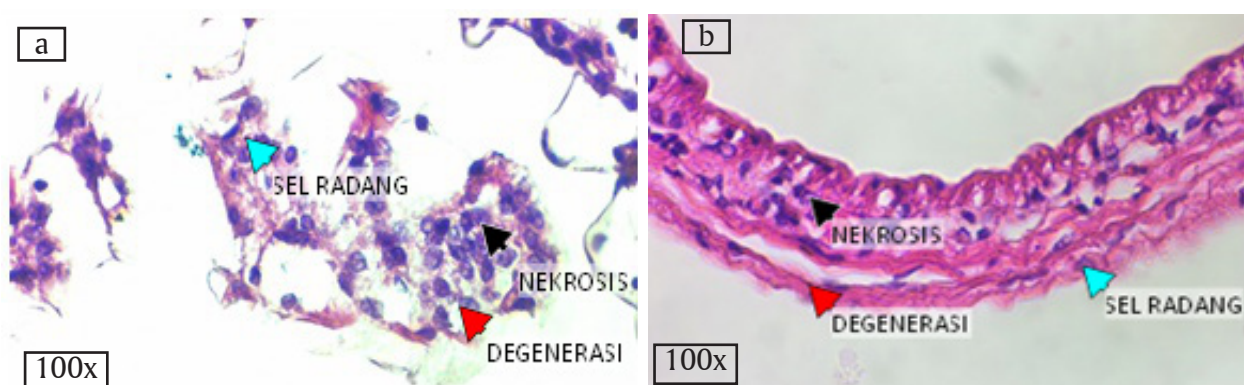
akuatik. Tingginya akumulasi mikroplastik pada organ usus ini mengindikasikan bahwa partikel mikroplastik kemungkinan besar tertelan bersama pakan atau air yang tercemar selama proses makan. Berdasarkan temuan Bhuyan (2022) yang menyatakan bahwa partikel mikroplastik diserap melalui insang, mulut, dan kulit organisme akuatik. Dalam jangka panjang, akumulasi ini dapat memengaruhi fungsi fisiologis dan kesehatan udang, sebagaimana dilaporkan oleh Han *et al.* (2021), Hsieh *et al.* (2021), dan Sun *et al.* (2022), yang mengemukakan bahwa paparan mikroplastik dan nanoplastik pada krustasea dapat menyebabkan perubahan histologis, gangguan metabolisme, peningkatan toksisitas logam berat, serta penurunan produktivitas. Selain itu, menurut Duan *et al.* (2021) dan Yan *et al.* (2021), mikroplastik juga dapat mengganggu komunitas mikroba usus, yang berpotensi menurunkan imunitas dan keseimbangan fisiologis udang. Oleh karena itu, usus memainkan peran penting dalam menunjukkan tingkat kontaminasi mikroplastik dan dapat dijadikan indikator bioakumulasi dalam ekosistem perairan.

Berdasarkan hasil penelitian dan literatur, dapat disimpulkan bahwa usus udang vaname

menunjukkan tingkat akumulasi mikroplastik yang lebih tinggi dibanding insang, dengan jumlah partikel tertinggi tercatat di Tambak 1. Temuan ini mengindikasikan bahwa saluran pencernaan merupakan jalur utama masuknya mikroplastik, terutama melalui konsumsi pakan atau air yang tercemar. Akumulasi mikroplastik dalam usus tidak hanya mencerminkan tingginya tingkat kontaminasi lingkungan, tetapi juga berpotensi menyebabkan gangguan fisiologis, perubahan histologis, gangguan metabolisme, peningkatan toksisitas logam berat serta menurunnya imunitas dan keseimbangan mikrobiota usus. Oleh karena itu, usus berperan penting sebagai indikator bioakumulasi mikroplastik dalam tubuh udang dan kondisi pencemaran perairan budidaya.

Kerusakan Organ

Untuk mengetahui dampak mikroplastik terhadap integritas jaringan udang vaname, dilakukan analisis histopatologi pada dua organ utama yang berperan penting dalam fisiologi udang, yaitu insang dan usus. Kedua organ ini dipilih karena merupakan jalur utama masuknya partikel asing ke dalam tubuh dan sangat sensitif terhadap stresor lingkungan.



Gambar 2. Histopatologi udang vaname hasil budidaya dari Probolinggo, Jawa Timur, Indonesia yang mengakumulasi mikroplastik. a) Histopatologi kerusakan insang dan b) Histopatologi kerusakan usus

Figure 2. Histopathology of farmed whiteleg shrimp from Probolinggo, East Java, Indonesia, accumulating microplastics. a) Histopathology of gills damage and b) Histopathology of intestinal damage

Insang berfungsi sebagai organ respirasi dan ekskresi, sementara usus memiliki peran utama dalam penyerapan nutrisi dan imunitas lokal. Paparan mikroplastik yang bersifat toksik dan abrasif diduga dapat memicu respons imun, inflamasi, dan perubahan struktural pada jaringan organ tersebut. Oleh karena itu, pengamatan mikroskopis jaringan dilakukan untuk mengidentifikasi jenis dan tingkat kerusakan yang terjadi sebagai akibat dari akumulasi mikroplastik.

Hasil pengamatan histopatologi (Gambar 2) menunjukkan bahwa baik insang maupun usus udang vaname mengalami kerusakan jaringan yang ditandai dengan infiltrasi sel radang, degenerasi, dan nekrosis. Infiltrasi sel radang merupakan respons imun non-spesifik terhadap paparan zat asing seperti mikroplastik atau polutan lainnya yang masuk melalui air atau tertelan bersama pakan (Roberts, 2012). Proses degenerasi yang terlihat pada jaringan insang dan usus mengindikasikan adanya disfungsi seluler yang kemungkinan dipicu oleh stres oksidatif akibat akumulasi mikroplastik. Nekrosis mencerminkan tahap kerusakan jaringan yang lebih berat, ditandai dengan kematian sel dan pelepasan zat toksik (Esch & Hazen, 1978; Kumar *et al.*, 2014).

Kerusakan pada insang secara langsung dapat mengganggu proses respirasi dan osmoregulasi, mengingat insang merupakan organ utama pertukaran gas dan keseimbangan ionik dalam tubuh udang. Sementara itu, kerusakan jaringan pada usus berpotensi menyebabkan gangguan penyerapan nutrisi, disbiosis mikrobiota usus, dan penurunan respons imun mukosa saluran pencernaan. Beberapa studi terdahulu bahkan menyebutkan bahwa mikroplastik dapat menembus *barrier* epitel usus dan memicu ekspresi gen proinflamasi, sehingga memperburuk kerusakan jaringan secara sistemik (Li *et al.*, 2021; Xing *et al.*, 2023).

Literatur sebelumnya juga mendukung bahwa insang dan usus merupakan organ yang sangat sensitif terhadap perubahan kualitas lingkungan, dan kerusakan pada kedua organ ini dapat dijadikan sebagai indikator

biologis penting dalam evaluasi dampak pencemaran di sistem budidaya (Hinton, 1993; Jovanovic, 2017). Oleh karena itu, keberadaan mikroplastik yang terakumulasi pada jaringan insang dan usus bukan hanya berperan sebagai kontaminan fisik, tetapi juga sebagai pemicu stres seluler yang dapat menurunkan performa fisiologis dan daya tahan udang secara keseluruhan.

Tingkat Kerusakan Organ

Data pada Tabel 3 menunjukkan tingkat kerusakan organ insang dan usus udang vaname dari tiga lokasi tambak yang berbeda berdasarkan hasil observasi histopatologi. Skor insang mencerminkan tingkat kerusakan jaringan akibat paparan stresor lingkungan, sedangkan parameter degenerasi, nekrosis, dan inflamasi mencerminkan tingkat kerusakan jaringan usus.

Pada Tambak 1, skor kerusakan insang berkisar antara 1,0 hingga 1,8 dengan rerata sekitar 1,4, mengindikasikan adanya kerusakan ringan hingga sedang pada struktur lamela insang. Sementara itu, organ usus menunjukkan kerusakan yang lebih serius, dengan nilai degenerasi mencapai 3,0 pada pengambilan sampel ketiga, serta nilai tertinggi untuk nekrosis dan inflamasi sebesar 2,6. Temuan ini menunjukkan bahwa lingkungan Tambak 1 kemungkinan memberikan tekanan fisiologis yang lebih tinggi terhadap udang, diduga akibat paparan cemaran lingkungan seperti mikroplastik, bahan organik berlebih atau senyawa toksik yang teradsorpsi pada permukaan partikel mikroplastik. Akumulasi stresor ini dapat menyebabkan kerusakan jaringan melalui jalur oksidatif dan inflamasi kronis.

Tambak 2 menunjukkan skor kerusakan insang yang lebih bervariasi (0,8–2,8), dengan nilai tertinggi pada pengambilan sampel ketiga. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas air atau beban pencemaran di tambak ini tidak konsisten antarwaktu, namun tetap menimbulkan efek yang cukup signifikan terhadap integritas jaringan respirasi. Organ

Tabel 3. Tingkat kerusakan organ pada insang dan usus udang vaname hasil budidaya dari Probolinggo, Jawa Timur, Indonesia, yang mengakumulasi mikroplastik

Table 3. Level of organ damage to gills and intestines of farmed whiteleg shrimp from Probolinggo, East Java, Indonesia, accumulating microplastics

Tambak <i>Pond</i>	Sampling	Skor insang <i>Gills score</i>	Skor Usus <i>Intestines score</i>		
			Degenerasi <i>Degeneration</i>	Nekrosis <i>Necrosis</i>	Inflamasi <i>Inflammation</i>
1	1	1	1,6	1	1,4
	2	1,8	2,2	2,2	1,4
	3	1,4	3	2,6	2,6
2	1	0,8	1,6	1,4	1,4
	2	1,4	1,8	1,6	1,6
	3	2,8	2,2	2,2	1,8
3	1	0,8	1,2	1,4	1
	2	1,2	1,4	1,6	1,4
	3	2,2	2,2	2,2	2,2

usus juga mengalami kerusakan sedang, dengan nilai degenerasi dan nekrosis berkisar antara 1,6–2,2, yang mengindikasikan paparan partikel asing yang tidak ekstrem namun berlangsung cukup konsisten selama masa pemeliharaan. Pola ini memperkuat anggapan bahwa gangguan histologis tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya paparan sesaat, tetapi juga oleh lamanya *exposure* terhadap kontaminan.

Sebaliknya, Tambak 3 menunjukkan tingkat kerusakan organ yang paling rendah. Skor insang berada pada kisaran 0,8 hingga 2,2, sedangkan skor kerusakan usus sebagian besar di bawah 2,2. Tingkat inflamasi pun cenderung lebih rendah dibanding dua tambak lainnya. Kondisi ini mencerminkan lingkungan budidaya yang lebih stabil dan minim polusi, baik dari sisi kualitas air, pakan, maupun penggunaan material berbasis plastik. Stabilitas parameter lingkungan ini sangat berkontribusi terhadap integritas jaringan dan ketahanan fisiologis udang.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa paparan mikroplastik secara kronis dapat menyebabkan berbagai perubahan histopatologis, termasuk degenerasi jaringan, nekrosis, dan infiltrasi

inflamasi pada krustasea dan ikan. Sebagai contoh, studi oleh Hsieh *et al.* (2021) menunjukkan bahwa paparan polietilen mikroplastik pada *Litopenaeus vannamei* menginduksi stres oksidatif dan kerusakan jaringan insang yang signifikan. Sementara itu, penelitian oleh Han *et al.* (2021) mengemukakan bahwa mikroplastik tidak hanya mengganggu struktur usus, tetapi juga berdampak pada gangguan metabolisme dan keseimbangan mikrobiota usus. Studi lainnya oleh Sun *et al.* (2022) juga melaporkan bahwa akumulasi mikroplastik dalam jaringan pencernaan dapat memicu gangguan fisiologis sistemik, termasuk penurunan respons imun dan efisiensi pertumbuhan. Penelitian oleh Putri *et al.* (2022) menunjukkan kelompok dengan konsentrasi tertinggi, skor yang tercatat mencapai 3 hingga 4, yang menggambarkan kerusakan jaringan berat, peningkatan skor kerusakan seiring dengan meningkatnya konsentrasi mikroplastik dalam pakan. Dengan demikian, temuan pada Tambak 3 yang menunjukkan skor kerusakan jaringan lebih rendah dapat mencerminkan pentingnya kualitas lingkungan dalam menekan dampak toksik partikel mikroplastik.

Secara keseluruhan, variasi skor kerusakan

jaringan antartambak dan antarperiode sampling menunjukkan bahwa kualitas lingkungan memiliki pengaruh langsung terhadap status histopatologi udang. Kerusakan insang lebih merefleksikan paparan akut melalui media air, sedangkan kerusakan usus menggambarkan akumulasi jangka panjang dari polutan yang tertelan. Kerusakan ini dapat menurunkan metabolisme, menghambat pertumbuhan, dan melemahkan imun, sehingga meningkatkan risiko infeksi dan kematian. Temuan ini memperkuat literatur terdahulu yang menyatakan bahwa organ insang dan usus merupakan indikator sensitif terhadap perubahan lingkungan dalam sistem budidaya intensif (Hinton, 1993; Roberts, 2012), sekaligus menekankan pentingnya manajemen kualitas air dan kontrol polusi partikel dalam tambak berkelanjutan.

Hubungan Kelimpahan Mikroplastik dengan Histopatologi Organ Udang Vaname

Untuk mengetahui hubungan antara kelimpahan mikroplastik dengan tingkat kerusakan jaringan pada insang dan usus udang vaname, dilakukan analisis korelasi menggunakan uji Spearman. Uji ini dipilih karena sesuai untuk data berdistribusi non-parametrik dan berskala ordinal. Hasil analisis disajikan dalam Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4, hasil analisis korelasi menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kelimpahan mikroplastik dan kerusakan jaringan insang dan usus udang vaname. Korelasi tertinggi tercatat pada hubungan antara kelimpahan mikroplastik di usus dengan derajat degenerasi jaringan usus, dengan nilai koefisien korelasi Spearman sebesar $r = 0,885$ dan $p\text{-value} = 0,002$. Nilai ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi akumulasi partikel

Tabel 4. Hasil analisis korelasi Spearman terhadap kelimpahan mikroplastik dan histopatologi udang vaname hasil budidaya dari Probolinggo, Jawa Timur, Indonesia

Table 4. Spearman correlation analysis results on microplastics abundance and histopathology offarmed whiteleg shrimp from Probolinggo, East Java, Indonesia

Hubungan Correlation	Spearman's ρ (r)	p-value	Interpretasi Interpretation
Kelimpahan mikroplastik pada insang dengan skor insang <i>Microplastics abundance in gills with gills score</i>	0,815	0,007	Korelasi sangat kuat dan signifikan <i>Very strong correlation and significant</i>
Kelimpahan mikroplastik pada usus dengan degenerasi <i>Microplastics abundance in intestines with degeneration</i>	0,885	0,002	Korelasi sangat kuat dan signifikan <i>Very strong correlation and significant</i>
Kelimpahan mikroplastik pada usus dengan nekrosis <i>Microplastics abundance in intestines with necrosis</i>	0,804	0,009	Korelasi sangat kuat dan signifikan <i>Very strong correlation and significant</i>
Kelimpahan mikroplastik pada usus dengan inflamasi <i>Microplastics abundance in intestines with inflammation</i>	0,688	0,041	Korelasi kuat dan signifikan <i>Strong correlation and significant</i>

mikroplastik dalam usus, semakin berat tingkat degenerasi sel epitel saluran cerna yang terjadi. Degenerasi ini dapat mencerminkan stres fisiologis akibat iritasi mekanik oleh partikel asing serta kemungkinan gangguan biokimia seperti disbiosis mikrobiota usus dan peningkatan stres oksidatif. Selain itu, terdapat korelasi sangat kuat antara kelimpahan mikroplastik pada insang dengan skor kerusakan jaringan insang ($r = 0,815$; $p\text{-value} = 0,007$), serta antara mikroplastik usus dengan skor nekrosis ($r = 0,804$; $p\text{-value} = 0,009$). Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa partikel mikroplastik tidak hanya menyebabkan perubahan morfologi ringan, tetapi juga dapat menyebabkan kematian sel (nekrosis), yang merupakan indikator kerusakan jaringan yang parah. Kerusakan jaringan pada insang dapat berdampak langsung terhadap fungsi respirasi dan osmoregulasi, sedangkan kerusakan usus memengaruhi proses pencernaan dan penyerapan nutrisi. Korelasi antara kelimpahan mikroplastik dengan parameter inflamasi atau peradangan usus juga tergolong kuat dan signifikan ($r = 0,688$; $p\text{-value} = 0,041$), meskipun relatif lebih rendah dibanding parameter kerusakan struktural lainnya. Hal ini memperkuat hipotesis bahwa selain merusak jaringan secara fisik, mikroplastik juga mampu memicu respons imun non-spesifik, seperti infiltrasi sel radang. Kombinasi antara degenerasi, nekrosis, dan inflamasi ini mengindikasikan bahwa mikroplastik dapat mengganggu homeostasis jaringan dan menurunkan ketahanan fisiologis udang secara keseluruhan. Oleh karena itu, hasil ini memperkuat pentingnya pengendalian cemaran mikroplastik dalam sistem budidaya intensif untuk menjaga kesehatan organ-organ vital udang dan menjamin keberlanjutan produksi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan korelasi sangat kuat antara kelimpahan mikroplastik di insang dengan tingkat kerusakan jaringan pada udang vaname. Mikroplastik menyebabkan kerusakan serius, khususnya pada usus, yang ditandai

dengan skor tinggi degenerasi dan nekrosis, serta berdampak pada penurunan fungsi penyerapan, peningkatan stres oksidatif, dan penurunan respons imun. Secara ilmiah, studi ini memperkuat pemahaman bahwa jalur pencernaan merupakan rute utama masuknya mikroplastik dan menjadi dasar untuk deteksi dini kerusakan histologis akibat pencemaran. Hasil ini dapat dimanfaatkan pembudidaya untuk menerapkan sistem filtrasi air, menghindari penggunaan bahan plastik, dan rutin memantau kesehatan jaringan serta temuan ini mendukung penyusunan kebijakan pengelolaan limbah, sertifikasi tambak ramah lingkungan serta pengawasan mutu air budidaya secara lebih terarah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada ketiga pemilik tambak udang vaname yang telah membantu dan memberikan kesempatan untuk dilakukannya pengambilan sampel dan penelitian. Penulis juga mengapresiasi semua pihak yang telah membantu selama pelaksanaan penelitian.

KONTRIBUSI PENULIS

AFRP: konseptualisasi, metodologi, investigasi, analisis formal, penulisan draf orisinal, dan visualisasi; AMSH: supervisi, validasi, dan penulisan – *review* dan *editing*. YM: supervisi, validasi, dan penulisan – *review* dan *editing*.

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN DAN PENGGUNAAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI)

Penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan dalam penelitian ini. Selama penyusunan artikel ini, penulis menggunakan bantuan teknologi *artificial intelligence* (AI) (ChatGPT, OpenAI) untuk mendukung pengeditan bahasa dan penyelarasan format penulisan jurnal. Penulis meninjau dan mengedit seluruh konten yang dihasilkan serta bertanggung jawab penuh atas isi publikasi.

DAFTAR ACUAN

- Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Anwar, S., & Abdurrohman, A. (2020). Pemanfaatan teknologi *Internet of Things* untuk monitoring tambak udang vaname berbasis *smartphone* Android menggunakan NodeMCU Wemos D1 Mini. *Infotronik: Jurnal Teknologi Informasi dan Elektronika*, 5(2), 77-83.
- Apriani, A., Marisca, S., & Diana, P. (2023). Ez Prep Concentrate (Ez Prep) sebagai alternatif reagen deparafinasi pada pewarnaan hematoksin eosin. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(1), 96-102.
- Arisanti, G., Yona, D., & Kasitowati, R. D. (2023). Analisis mikroplastik pada saluran pencernaan ikan kembung (*Rastrelligae* sp.) di perairan Pelabuhan Perikanan Samudera Belawan, Sumatera Utara. *Water and Marine Pollution*, 1(1), 45-60.
- Chairrany, B., & Sa'adah, N. (2021). Identifikasi mikroplastik pada udang *Litopenaeus vannamei* di perairan Gunung Anyar Surabaya. *Environmental Pollution Journal*, 1(1), 24-33. <https://doi.org/10.58954/epj.v1i1.4>
- Chen, G., Li, Y., & Wang, J. (2021). Occurrence and ecological impact of microplastics in aquaculture ecosystems. *Chemosphere*, 274, 129989. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129989>
- Chen, Q., Gundlach, M., Yang, S., Luo, T., Lehmann, A., & Tuerk, J. (2021). Microplastic pollution in freshwater ecosystems: sources, fate and impacts. *Water Research*, 196, 116865. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116865>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Das, S. S., Hall, A. V., Wareham, D. W., & Britton, K. E. (2002). Infection imaging with radiopharmaceuticals in the 21st century. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 45, 25-37.
- Esch, G. W., & Hazen, T. C. (1978). Stress and body condition in helminth-infected fishes. *Science*, 199(4327), 1344-1346. <https://doi.org/10.1126/science.624458>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1(5), 0116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- Han, J., Li, J., Zhao, Y., Liu, X., & Zhang, L. (2021). Effects of polystyrene microplastics on the gut barrier, immune response and metabolism of shrimp. *Environmental Pollution*, 273, 116408. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116408>
- Hariri, A. (2021). Pembesaran udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*) secara intensif pada kolam bundar di CV. Tirta Makmur Abadi Desa Lombang, Kecamatan Batang-Batang, Sumenep, Jawa Timur. *Grouper: Jurnal Ilmiah Perikanan*, 12(2), 35-46.
- Hinton, D. E. (1993). Toxicologic histopathology of fishes: Review and evaluation of the toxicologic pathology of selected fish organs. *Proceedings of the American Fisheries Society Symposium*, 1, 194-211.
- Hsieh, S.-L., Wu, Y.-C., Xu, R.-Q., Chen, Y.-T., Chen, C.-W., Singhanian, R. R., & Dong, C.-D. (2021). Effect of polyethylene microplastics on oxidative stress and histopathology damages in *Litopenaeus vannamei*. *Environmental Pollution*, 288, 117800. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117800>
- Jovanović, F. (2017). Ingestion of microplastics by fish and its potential consequences from a physical perspective. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(3), 510-515. <https://doi.org/10.1002/ieam.1913>

- Kiran, B. R., Kopperi, H., & Venkata Mohan, S. (2022). Micro/nano-plastics occurrence, identification, risk analysis and mitigation: Challenges and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 21(1), 169–203. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09601-2>
- Kiran, S., Gnanadurai, C., Rajesh, R., & Bharath, P. (2022). Transfer of microplastics in aquatic food chains: A review on bioaccumulation and biomagnification. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(10), 14528-14540. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19135-6>
- Kumar, V., Abbas, A. K., & Aster, J. C. (2014). *Robbins and Cotran pathologic basis of disease (9th ed.)*. Elsevier.
- Li, H., Chen, H., Wang, J., Li, J., Liu, S., Tu, J., Chen, Y., Zong, Y., Zhang, P., Wang, Z., & Liu, X. (2021). Influence of microplastics on the growth and the intestinal microbiota composition of brine shrimp. *Frontiers in Microbiology*, 12, 717272. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.717272>
- Li, J., Yang, D., Li, L., Jabeen, K., & Shi, H. (2018). Microplastics in commercial bivalves from China. *Environmental Pollution*, 207, 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.043>
- Mustofani, D. (2022). *Modul ajar statistika*. IIK Press.
- Putri, R. N., Widiyatmoko, W., Nugroho, R. A., Wardhana, W., Subandiyono, S., & Putri, R. D. (2022). Effect of microplastic-contaminated feed on hepatopancreas histopathological changes in whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Tropical Animal Science Journal*, 45(4), 377–386. <https://doi.org/10.5398/medpub.2022.45.4.377>
- Roberts, R. J. (2012). *Fish pathology (4th ed.)*. Wiley-Blackwell.
- Safitri, W. R. (2016). Analisis korelasi Pearson dalam menentukan hubungan antara kejadian demam berdarah dengue dengan kepadatan penduduk di Kota Surabaya pada tahun 2012–2014. *Jurnal Ilmiah Keperawatan*, 1(1), 21–29.
- Silva, D. C., Vieira, H. A. G., Rolim, V. S., Silva, W. F., Sousa, M. G., Paulino, M. G., & Mariano, W. S. (2021). Environmental contaminants: Effects of microplastics on aquatic and terrestrial organisms. *Research, Society and Development*, 10(7), e54310716761. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16761>
- Sugiyono. (2012). *Metode penelitian kombinasi (mixed methods)*. Alfabeta.
- Sukarni, Maftuch, & Nursyam, H. (2012). Kajian penggunaan Ciprofloxacin terhadap histologi insang dan hati ikan botia (*Botia macracanthus*, Bleeker) yang diinfeksi bakteri *Aeromonas hydrophila*. *The Journal of Experimental Life Science*, 2(2), 6–12.
- Sulistyawati, W., Wahyudi, & Trimuryono, S. (2022). Analisis (deskriptif kuantitatif) motivasi belajar siswa dengan model *blended learning* di masa pandemi Covid-19. *Jurnal Pendidikan dan Konseling*, 4(1), 68–73.
- Sun, X., Li, Q., Wang, H., Zhang, Q., & Wang, J. (2022). Chronic exposure to microplastics induces histological and functional damage to the gut and liver in marine crustaceans. *Science of the Total Environment*, 824, 153800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153800>
- Timilsina, A., Adhikari, K., Yadav, A. K., Joshi, P., Ramena, G., & Bohara, K. (2023a). Effects of microplastics and nanoplastics in shrimp: Mechanisms of plastic particle and contaminant distribution and subsequent effects after uptake. *Science of the Total Environment*, 894, 164999. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164999>
- Timilsina, H. S., Ferguson, M. W., & Snyder, S. A. (2023b). Microplastics in aquaculture: Sources, impacts, and mitigation strategies. *Aquaculture Reports*, 30, 101559. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101559>
- Xing, Y., Zhu, X., Duan, Y., Huang, J., Nan, Y., & Zhang, J. (2023). Toxic effects of nitrite and microplastics stress on histology, oxidative stress, and metabolic function in the gills of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Marine Pollution Bulletin*, 187, 114531. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114531>