



BAB I PENDAHULUAN UMUM

1.1. Latar Belakang

Efek samping kegiatan budidaya memberikan dampak negatif terhadap lingkungan yang tentunya dapat mengganggu keseimbangan ekosistem. Pendekatan dalam kegiatan budidaya yang perlu diperhatikan adalah *Ecosystem Approach to Aquaculture* (EAA) atau pendekatan ekosistem untuk budidaya perikanan (Staples & Funge-Smith, 2009). Implementasi dari manajemen ini adalah pengelolaan lingkungan yang mengarah pada pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*), artinya upaya pemenuhan kebutuhan manusia saat ini tidak mengorbankan kebutuhan generasi di masa akan datang. Dengan demikian inti pendekatannya adalah *sustainability* atau keberlanjutan kegiatan akuakultur (Lowanshi et al., 2023). *Sustainability* dapat tercapai jika seluruh pembudidaya dan *stakeholder* memahami dampak yang dapat ditimbulkan atas kegiatan budidaya, baik dari aspek teknis maupun non teknis. Dari aspek teknis, pemanfaatan air sebagai media budidaya mutlak dilakukan secara bertanggung jawab dengan terlebih dahulu melakukan pengelolaan air sisa kegiatan budidaya sebelum dibuang ke perairan umum. Hal ini dapat mempertahankan *carrying capacity* (daya dukung) ekosistem sekitar sehingga menunjang kegiatan budidaya selanjutnya. Dalam budidaya udang vannamei, perlu diperhatikan manajemen pakan berbasis kualitas air dan pengolahan limbah mengingat dampak yang dapat ditimbulkan antara lain, peningkatan keasaman air (*acidification*), eutrofikasi dan potensi *global warming* (Ma'in et al., 2013).

Dari aspek non teknis, masyarakat dapat merasakan prinsip kesinambungan sehingga dapat mampu meningkatkan pendapatan. Oleh karena itu, masyarakat hendaknya memiliki pemahaman tentang pentingnya keberlanjutan (*sustainability*) dalam kegiatan budidaya. Salah satu kegiatan budidaya yang banyak menjadi perhatian adalah budidaya udang vannamei dengan berbagai tingkatan sistemnya, mulai dari ekstensif (tradisional) sampai dengan super intensif. Intensifikasi merupakan salah satu alternatif dalam upaya meningkatkan produksi (Crab et al., 2012). Pemenuhan nutrisi dalam jumlah besar merupakan hal pokok yang tidak kalah pentingnya dalam budidaya intensif (Henriksson et al., 2018). Selama proses produksi, limbah dihasilkan mulai dari awal budidaya hingga panen, yang bersumber dari sisa pakan, feses, maupun organisme di dalam tambak yang mati (Ge et al., 2019). Selain itu, bahan kimia yang bertujuan untuk meningkatkan proses produksi juga menjadi sumber limbah lainnya (Tampangallo et al., 2020). Upaya peningkatan produksi diusahakan oleh pembudidaya melalui optimalisasi penggunaan pakan buatan. Dalam budidaya intensif, penggunaan pakan alami tidak lagi dibutuhkan, melainkan pakan buatan dengan kualitas yang tinggi untuk mencapai target produksi. Tingginya penggunaan pakan buatan menjadi penyumbang utama dalam limbah produksi. Selain feses dan sisa pakan yang tidak termakan, limbah kegiatan budidaya perikanan juga berupa sisa metabolisme atau sisa material,



maupun hasil dekomposisi bahan organik serta populasi plankton yang mati (Nguyen & Maeda, 2015). Sisa pakan akan menjadi sumber limbah utama bahan organik dan nutrisi ke lingkungan perairan. Pakan yang tidak termakan selanjutnya akan larut, mengendap dan menjadi potensi sumber bahan organik yang akan mempengaruhi kesuburan perairan (Syah et al., 2014).

Penerapan sistem intensif pada budidaya udang dengan memanfaatkan pakan buatan sebagai sumber nutrisi utama ternyata menimbulkan permasalahan, yaitu munculnya residu yang berasal dari feses dan pakan yang tidak termakan yang nantinya akan menjadi limbah. Produksi limbah ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya jenis pakan yang digunakan, kandungan nutrisi, metode produksi pakan, ukuran pakan, ukuran biota budidaya, jumlah dan metode pemberian pakan, serta metode penyimpanan (Dauda et al., 2019). Pakan udang umumnya terdiri atas beberapa kandungan, di antaranya protein, lemak, karbohidrat, mineral dan vitamin. Pada setiap tahapan pertumbuhan, bentuk atau ukuran pakan serta kandungan nutrisinya berbeda-beda, tergantung pada usia udang yang dipelihara. Pada awal pemeliharaan pakan yang digunakan ukurannya lebih kecil dibanding udang dewasa karena disesuaikan dengan ukuran bukaan mulut udang itu sendiri. Demikian pula dengan kandungan nutrisinya, udang yang masih kecil membutuhkan kandungan protein yang lebih banyak dibanding dengan udang dewasa karena akan digunakan untuk proses pertumbuhan dan pembentukan sel-sel baru. Meskipun udang dewasa membutuhkan kandungan protein yang lebih sedikit, namun jumlah pakan yang diberikan semakin banyak sesuai rasio konversi pakan sehingga tetap mengakibatkan akumulasi limbah di tambak.

Selain feses dan sisa pakan, organisme yang mati juga menjadi sumber utama limbah organik di tambak, yang kemudian terakumulasi dan mengendap di dasar perairan (Tangguda & Suryanti, 2017). Proses dekomposisi limbah ini dapat menurunkan kualitas sedimen dan mempercepat terjadinya eutrofikasi, yang berdampak negatif terhadap kesehatan ekosistem tambak (Bui et al., 2012). Pada praktik budidaya dengan pengelolaan pakan yang baik sekalipun, diperkirakan sekitar 30% dari total pakan yang diberikan akan menjadi limbah padat (Dauda et al., 2019). Hal ini terjadi karena tidak seluruh pakan dapat dikonsumsi atau diserap secara optimal oleh organisme budidaya, sehingga sebagian besar senyawa organik terbuang ke lingkungan. Selain berbentuk padatan, sisa pakan dan ekskresi organisme juga berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi nitrogen (N) dan fosfor (P) terlarut di perairan (Boyd & Massaut, 1999).

Lebih lanjut, meskipun pakan berhasil dicerna, tidak semua unsur nutrisinya digunakan untuk pertumbuhan atau disimpan dalam jaringan tubuh. Sebagian nutrisi dialokasikan untuk kebutuhan energi metabolisme seperti pergantian kulit (*moulting*), aktivitas ekskresi, dan produksi feses (Avnimelech, 2000; Boyd, 2003; Primavera, 1994), efisiensi retensi nutrisi pada organisme budidaya, khususnya udang, sangat bergantung pada kualitas pakan, kondisi lingkungan, serta tahap pertumbuhan organisme. Oleh karena itu, meskipun rasio konversi pakan (FCR) dapat ditekan melalui manajemen yang baik, produksi limbah tetap tidak dapat



dihindari dan menjadi faktor penting yang harus dikelola dalam sistem budidaya berkelanjutan.

Komponen limbah tambak intensif secara umum ada 2, yaitu limbah padat yang nantinya akan mengalami sedimentasi (pengendapan) dan limbah cair atau yang terlarut dalam air. Limbah padat itu sendiri dihasilkan oleh feses dan sisa pakan yang tidak termakan sedangkan limbah cair dihasilkan dari aktivitas metabolisme, pakan yang tidak termakan serta proses dekomposisi (Dauda et al., 2019). Adapun limbah padat sedimen tambak udang superintensif memiliki kandungan nutrisi (unsur hara) yang cukup tinggi seperti N total 0,67%, P_2O_5 4,78%, K_2O 1%, C-organik 17,84%, pH 6,25 dan kadar air 15,60% (Suwoyo et al., 2017). Limbah yang dibuang akan melewati vegetasi mangrove dan bermuara ke laut merupakan akumulasi bahan organik, padatan tersuspensi, maupun bakteri yang mati (Vinothkumar et al., 2021). Keberadaannya berdampak pada penurunan oksigen terlarut, eutrofikasi, *blooming* plankton, keseimbangan akuatik serta siklus biogeokimia (Jegatheesan et al., 2011; Wulandari et al., 2019) yang tergantung pada besarnya material dalam limbah yang ada di dalam air (Barraza-guardado et al., 2013). Karakteristik limbah setiap tambak akan berbeda, tergantung pada tingkat teknologi yang digunakan. Tambak intensif atau superintensif membutuhkan asupan nutrisi untuk udang yang lebih besar dibandingkan dengan tambak konvensional. Penggunaan pakan buatan yang semakin meningkat akan berpengaruh terhadap tingginya produksi limbah pada air media yang digunakan. Banyaknya pakan yang digunakan sebagai konsekuensi pemenuhan nutrisi bagi udang pada tambak dengan padat tebar tinggi akan meningkatkan sedimentasi, bahan organik total, Total P, Total N, kandungan C-organik, serta menurunkan pH (Suwoyo et al., 2015). Limbah tambak juga dapat menyebabkan hipernutifikasi yang diikuti oleh perubahan ekologi fitoplankton, peningkatan sedimentasi, hipoksia dan perubahan produktivitas. Meskipun limbah mengandung sejumlah unsur hara yang dapat dimanfaatkan oleh organisme dengan tingkat trofik yang lebih rendah, seperti *Chlorella sp* (Tangguda et al., 2015; Tangguda & Suryanti, 2017), namun jika tidak dikelola dengan baik akan merusak ekosistem perairan. Rusaknya ekosistem perairan tersebut akan berdampak terhadap kehidupan biota air seperti bentos di dasar perairan, dimana penurunan kelimpahan dan komposisi organisme tersebut merupakan indikator adanya gangguan ekologi yang terjadi pada suatu perairan (Ridwan et al., 2016).

Pada umumnya tambak yang dikelola secara mandiri oleh masyarakat belum dilengkapi dengan instalasi pengolahan limbah (IPAL). Selama pemeliharaan sampai panen, air media yang sudah tidak layak pakai akan dibuang ke saluran atau sungai dan bermuara di laut. Jika kemampuan asimilasi perairan lebih rendah dari jumlah limbah yang dibuang dapat menyebabkan penumpukan limbah sehingga memperburuk kualitas air. Tanpa disadari, pembuangan limbah yang tidak melalui pengolahan berakibat pada pengkayaan nutrisi (eutrofikasi) dan menjadi penyebab peningkatan populasi plankton yang sangat drastis (*blooming*) (Fahrur et al., 2015). *Blooming* plankton di perairan umum menyebabkan penetrasi sinar matahari ke dalam air dan terhambatnya difusi oksigen. Dalam mengatasi berbagai masalah



tersebut, organisme akuatik misal; rumput laut, kerang-kerangan atau mangrove dapat digunakan sebagai biofilter. Biofilter merupakan suatu mekanisme pengolahan air limbah yang memanfaatkan organisme di air sebagai penyaring. Biofilter juga diartikan sebagai suatu sistem pengolahan air limbah yang dengan cara mengalirkan air limbah ke dalam reaktor biologis yang berisi media filter yang dapat memacu pertumbuhan dan perkembangbiakan mikroorganisme pengurai, baik dengan aerasi maupun tanpa aerasi (Filliazati et al., 2013). Pemanfaatan jenis bivalvia sebagai biofilter bahan organik dalam proses filtrasi dan sedimentasi air limbah menunjukkan hasil positif mengingat daya serapnya yang tinggi (Achmadi et al., 2020; Nieves-Soto et al., 2011). Populasinya yang tersebar hampir di seluruh perairan Indonesia serta karakteristiknya yang memperoleh nutrisi dengan cara menyaring air menjadikan bivalvia populer digunakan sebagai hewan uji dalam penelitian bioremediasi limbah (Murtini et al., 2004; Rahmah et al., 2019).

Bioremediasi merupakan proses pengolahan secara alami yang memanfaatkan mekanisme biologis pada organisme untuk mengurangi, mendegradasi, mendetoksifikasi, atau mentransformasi konsentrasi polutan dalam air sehingga tidak lagi berbahaya bagi lingkungan dan dapat dimanfaatkan kembali oleh organisme lain (Abatenh et al., 2017; Azubuike et al., 2016; Mora-Ravelo et al., 2017). Keberadaan logam toksik di dalam air juga dapat direduksi melalui bioremediasi (Verma & Kuila, 2019). Proses ini dapat dilakukan oleh beberapa organisme yang bertindak sebagai agen bioremediasi antara lain, bakteri, makroalga, mikro krustasea, bivalvia (Nicholaus et al., 2019; Retnosari et al., 2020; Syahrir et al., 2021), rumput laut maupun ikan nila (Brito et al., 2018). Pada kegiatan budidaya udang intensif, bioremediasi diperuntukkan untuk air media pemeliharaan yang telah digunakan selama proses produksi sebelum dibuang ke perairan umum. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengkaji efektivitas organisme akuatik untuk meremediasi limbah. Dalam meremediasi, bivalvia tergantung pada suhu dan salinitas (Nieves-Soto et al., 2011; Wulandari et al., 2019) dan tingkat pencemaran yang nantinya menentukan laju filtrasi bivalvia dalam meremediasi limbah (Haeruddin et al., 2017). Kerang darah (*T. granosa*) sebagai salah satu bivalvia yang memiliki daya serap tinggi dan tersebar di seluruh perairan Indonesia, menjadikannya sebagai alasan pemilihan biota uji. Berdasarkan beberapa hal tersebut di atas, maka penulis akan mengkaji pemanfaatan kerang darah (*T. granosa*) sebagai bioremediator limbah tambak pemeliharaan udang vannamei secara intensif dalam upaya meremediasi limbah yang dihasilkan pada kegiatan budidaya.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini, antara lain:

1. Bagaimana efektivitas remediasi dan laju filtrasi kerang darah terhadap limbah tambak intensif udang vannamei pada ukuran dan kepadatan berbeda?
2. Bagaimana pengaruh limbah tambak intensif udang vannamei terhadap struktur histologis insang kerang darah pada ukuran dan kepadatan berbeda?



3. Bagaimana pengaruh limbah tambak intensif udang vannamei terhadap mortalitas kerang darah pada ukuran dan kepadatan berbeda?

1.3. Pendekatan Masalah

Efektivitas remediasi dan laju filtrasi kerang darah sebagai bioremediator limbah tambak intensif udang vannamei diteliti melalui pengamatan terhadap parameter kualitas air sebelum dan sesudah paparan limbah, dengan memperhatikan waktu paparan yang bervariasi. Perubahan struktur histologis insang kerang darah akibat terpapar limbah tambak intensif udang vannamei dianalisis melalui beberapa tahapan, antara lain: pengukuran parameter kualitas air, pengambilan sampel insang, serta pengamatan perubahan struktur mikroanatomi insang. Analisis ini dilakukan dengan membandingkan preparat histologi insang kerang darah yang diambil sebelum dan setelah terpapar limbah tambak. Mortalitas kerang darah juga diamati dengan memantau kondisi kesehatan dan tingkat kematian kerang darah secara periodik, mulai dari awal hingga akhir periode pemeliharaan. Beberapa pendekatan ini memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai potensi dan kelayakan kerang darah sebagai bioremediator yang efektif dan berkelanjutan, serta memberikan pemahaman mendalam mengenai dampak limbah tambak terhadap kerang darah. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan aplikasi bioremediasi berbasis kerang darah pada sistem akuakultur intensif.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis efektivitas remediasi dan laju filtrasi kerang darah terhadap limbah organik tambak intensif udang vannamei pada ukuran dan kepadatan berbeda;
2. Menganalisis pengaruh limbah tambak intensif udang vannamei terhadap struktur histologis insang kerang darah pada ukuran dan kepadatan berbeda;
3. Menganalisis pengaruh limbah tambak intensif udang vannamei terhadap mortalitas kerang darah pada ukuran dan kepadatan berbeda.

1.5. Kegunaan Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji potensi pemanfaatan kerang darah (*Tegillarca granosa*) sebagai agen bioremediasi limbah tambak intensif udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*). Dengan pendekatan yang fokus pada kajian pengaruh ukuran dan kepadatan kerang darah terhadap struktur histologis insang serta tingkat mortalitasnya, diperoleh informasi ilmiah yang komprehensif mengenai efektivitas kerang darah dalam meremediasi limbah tambak budidaya serta dampak fisiologis yang ditimbulkan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi studi lanjutan dan berkontribusi dalam pengembangan strategi pengelolaan limbah budidaya udang vannamei yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.



1.7. Kerangka Konseptual Penelitian

```

graph TD
    A[Produksi Udang Vannamei  
(Sistem Intensif)] --> B[Padat Tebar Tinggi]
    B --> C[Aplikasi Pakan Buatan]
    C --> D[/Pakan Tidak Termakan/]
    C --> E[/Sisa Metabolisme (feses)/]
    D --> F[/Limbah Tambak/]
    E --> F
    F -.-> G[Berbahaya Bagi Perairan]
    G -.-> H[Perlu Dilakukan Treatment]
    H --> I{Remediasi}
    I --> J[Layak Dibuang ke Perairan]
    I --> K[Filtrasi]
    K --> L[Fisika]
    K --> M[Biologi]
    K --> N[Kimia]
    M --> O[Organisme Filter Feeder  
(Tegillarca granosa)]
    O --> P[/Faktor Ukuran/]
    O --> Q[/Faktor Kepadatan/]
    P -.-> R[Pengaruhnya terhadap :]
    Q -.-> R
    R --> S[1 Efektivitas Filtrasi Limbah  
2 Histopatologi Insang T. Granosa  
3 Mortalitas T. granosa]
    S --> T[SUSTAINABLE AQUACULTURE]
    J --> T
  
```

Gambar 1.1. Kerangka konseptual penelitian



1.8. Referensi

- Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegaye, Z., & Wassie, M. (2017). The Role of Microorganisms in Bioremediation- A Review. *Open Journal of Environmental Biology*, 2(1), 038–046. <https://doi.org/10.17352/ojeb.000007>
- Achmadi, I., Setya, B., & Ahadi, A. (2020). Efektivitas Kombinasi Rumput Laut (*Gracillaria sp.*), Kerang Darah (*Anadara granosa*), dan Zeolit sebagai Biofilter dalam Penurunan Logam Berat Tembaga (Cu). *Jurnal of Marine and Cosal Science*, 9(September), 106–112. <http://dx.doi.org/10.20473/jmcs.v9i3.22293>
- Avnimelech, Y. (2000). Nitrogen Control and Protein Recycling: Activated Suspension Ponds. *The International Aquaculture Advocate*, April, 23–24. <https://www.globalseafood.org/advocate/nitrogen-control-and-protein-recycling-activated-suspension-ponds/>
- Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation Techniques–Classification Based On Site Of Application: Principles, Advantages, Limitations And Prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(11). <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>
- Barraza-guardado, H. R., Arreola-lizárraga, López-torres, J. A., A, M., Casillas-hernández, R., Miranda-baeza, A., Magallón-barrajas, F., & Ibarra-gámez, C. (2013). Effluents of Shrimp Farms and Its Influence on the Coastal Ecosystems of Bahía de Kino , Mexico. *The Scientific World Journal*, 2013, 1–8. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/306370>
- Boyd, C. E. (2003). Guidelines for Aquaculture Effluent Management At The Farm-Level. *Aquaculture*, 226(1–4), 101–112. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00471-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00471-X)
- Boyd, C. E., & Massaut, L. (1999). Risks Associated With The Use Of Chemicals In Pond Aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 20(2), 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(99\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(99)00010-2)
- Brito, L. O., Cardoso Junior, L. de O., Lavander, H. D., Abreu, J. L. de, Severi, W., & Gálvez, A. O. (2018). Bioremediation Of Shrimp Biofloc Wastewater Using Clam, Seaweed And Fish. *Chemistry and Ecology*, 34(10), 901–913. <https://doi.org/10.1080/02757540.2018.1520843>
- Bui, T. D., Luong-Van, J., & Austin, C. M. (2012). Impact Of Shrimp Farm Effluent on Water Quality in Coastal Areas of The World Heritage-Listed Ha Long Bay. *American Journal of Environmental Sciences*, 8(2), 104–116. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2012.104.116>
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc Technology In Aquaculture: Beneficial Effects And Future Challenges. *Aquaculture*, 356–357, 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.046>
- Dauda, A. B., Ajadi, A., Tola-Fabunmi, A. S., & Akinwole, A. O. (2019). Waste Production in Aquaculture: Sources, Components and Managements in Different Culture Systems. *Aquaculture and Fisheries*, 4(3), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.10.002>
- Fahrur, M., Makmur, & Undu, M. C. (2015). Karakteristik Air Buangan Limbah



Budidaya Udang Vaname Superintensif. *Prosiding Forum Inovasi Teknologi Akuakultur 2015*, 1015–1026.

- Filliazati, M., Aprianti, I., & Zahara, T. A. (2013). Pengolahan Limbah Cair Domestik dengan Biofilter Aerob Menggunakan Media Bioball dan Tanaman Kiambang. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.26418/jtlb.v1i1.4028>
- Ge, J., Zhang, Y., Heo, Y. J., & Park, S. J. (2019). Advanced Design and Synthesis of Composite Photocatalysts for The Remediation of Wastewater: A Review. In *Catalysts* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/catal9020122>
- Haeruddin, Suprpto, D., & Rudiyaniti, S. (2017). Analisis Mutu Sedimen Habitat Kerang Darah (*Anadara granosa*) dengan Reburial Test. *Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology*, 12(2), 81–85. <https://doi.org/10.14710/ijfst.12.2.81-85>
- Henriksson, P. J. G., Belton, B., Murshed-E-Jahan, K., & Rico, A. (2018). Measuring The Potential for Sustainable Intensification of Aquaculture In Bangladesh Using Life Cycle Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(12), 2958–2963. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716530115>
- Jegatheesan, V., Shu, L., & Visvanathan, C. (2011). Aquaculture Effluent: Impacts and Remedies for Protecting the Environment and Human Health. *Encyclopedia of Environmental Health*, 123–135. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00340-8>
- Lowanshi, A., Jamlwal, A., Kant, K. Y., & Singha, S. (2023). Sustainable Aquaculture. In *Innovation and Etchical Practise for Aquaculture Production*. Elite Publishing House. Elite Publishing House. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0796>
- Ma'in, Anggoro, S., & Sasongko, S. B. (2013). Kajian Dampak Lingkungan Penerapan Teknologi Bioflok pada Kegiatan Budidaya Udang Vaname Dengan Metode Life Cycle Assessment. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 11(2), 110–119. <https://doi.org/10.14710/jil.11.2.110-119>
- Mora-Ravelo, S. G., Alarcón, A., Rocandio-Rodríguez, M., & Vanoye-Eligio, V. (2017). Bioremediation of wastewater for reutilization in agricultural systems: A review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(1), 33–50. https://doi.org/10.15666/aeer/1501_033050
- Murtini, J. T., Januar, H. I., & Sugiyono. (2004). Upaya Pengurangan Cemarkan Logam Berat pada Daging Kerang Hijau (*Perna viridis*) dengan Larutan Kitosan. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 10(3), 7–10. <https://doi.org/10.15578/jppi.10.3.2004.7-10>
- Nguyen, H. Van, & Maeda, M. (2015). Nutrient Mass Balances in Intensive Shrimp Ponds with a Sludge Removal Regime: A Case Study in the Tam Giang Lagoon, Central Vietnam. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, 5(12), 538–547. <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.12.013>
- Nicholaus, R., Lukwambe, B., Zhao, L., Yang, W., Zhu, J., & Zheng, Z. (2019). Bioturbation of Blood Clam *Tegillarca granosa* on Benthic Nutrient Fluxes and Microbial Community in an Aquaculture Wastewater Treatment System.



International Biodeterioration and Biodegradation, 142(818), 73–82.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.004>

- Nieves-Soto, M., Enriquez-Ocaña, F., Piña-Valdez, P., Maeda-Martínez, A. N., Almodóvar-Cebreros, J. R., & Acosta-Salmón, H. (2011). Is the Mangrove Cockle *Anadara tuberculosa* a Candidate for Effluent Bioremediation? Energy Budgets Under Combined Conditions of Temperature and Salinity. *Aquaculture*, 318(3–4), 434–438. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.05.041>
- Primavera, J. H. (1994). Shrimp farming in the Asia-Pacific: Environmental and Trade Issues and Regional Cooperation. *Nautilus Institute Workshop on Trade and Environment in Asia-Pacific: Prospects for Regional Cooperation*, 23–25. <http://oldsite.nautilus.org/archives/papers/enviro/trade/shrimp.html>
- Rahmah, S., Maharani, H. W., & Efendi, E. (2019). Konsentrasi Logam Berat Pb dan Cu pada Sedimen dan Kerang Darah (*Anadara granosa* Linn, 1758) di Perairan Pulau Pasaran, Kota Bandar Lampung. *Acta Aquatica: Aquatic Sciences Journal*, 6(1), 22–27. <https://doi.org/10.29103/aa.v6i1.887>
- Retnosari, D., Rejeki, S., Susilowati, T., & Ariyati, R. W. (2020). Laju Filtrasi Bahan Organik oleh Kerang Hijau (*Perna viridis*) Sebagai Biofilter Serta Dampaknya Terhadap Pertumbuhan dan Kelulushidupan Udang Windu (*Penaeus monodon*). *Jurnal Sains Akuakultur Tropis*, 4(November 2018), 36–46. <https://core.ac.uk/download/pdf/304915044.pdf>
- Ridwan, M., Fathoni, R., Fatimah, I., & Pangestu, D. A. (2016). Struktur Komunitas Makrozoobentos di Empat Muara Sungai Cagar Alam Pulau Dua, Serang, Banten. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 9(1), 57–65. <https://doi.org/10.15408/kauniyah.v9i1.3256>
- Staples, D., & Funge-Smith, S. (2009). Ecosystem Approach to Fisheries and Aquaculture: Implementing the FAO Code of Conduct for Responsible Fisheries. In *RAP Publication*. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i0964e>
- Susetyaningsih, R., Suntoro, S., Gunawan, T., & Sri Budiastuti, M. T. (2020). Impact of shrimp pond waste on water quality (case study of trisik lagoon in Yogyakarta). *AIP Conference Proceedings*, 2296. <https://doi.org/10.1063/5.0030551>
- Suwoyo, H. S., Fahrur, M., Makmur, & Syah, R. (2017). Pemanfaatan Limbah Tambak Udang Super-Intensif Sebagai Pupuk Organik Untuk Pertumbuhan Biomassa Kelekap Dan Nener Bandeng. *Media Akuakultur*, 11(2), 97–110.
- Suwoyo, H. S., Tahe, S., & Fahrur, M. (2015). Karakterisasi Limbah Sedimen Tambak Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) Super Intensif dengan Kepadatan Berbeda. *Prosiding Forum Inovasi Teknologi Akuakultur*, 901–913.
- Syah, R., Makmur, M., & Undu, M. C. (2014). Estimasi Beban Limbah Nutrien Pakan dan Daya Dukung Kawasan Pesisir Untuk Tambak Udang Vaname Superintensif. *Jurnal Riset Akuakultur*, 9(3), 439. <https://doi.org/10.15578/jra.9.3.2014.439-448>
- Syahrir, M., Renitasari, D. P., Ihwan, & Saridu, S. A. (2021). Bioremediation of organic waste matter in white legs shrimp ponds using blood shells (*Anadara granosa*).



IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 860(1), 012097.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/860/1/012097>

- Tampangallo, B. R., Idra Jaya Asaad, A., Undu, M. C., Khairana Kadriah, I. A., & Anshary, H. (2020). Bacterial Diversity In Superintensive Vanname Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Plants in Barru and Takalar Regencies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 564(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/564/1/012007>
- Tangguda, S., Arfiati, D., & Ekawati, A. W. (2015). Karakterisasi Limbah Padat Tambak Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) untuk Kultur Murni *Chlorella* sp. *Proceedings Seminar Nasional FMIPA UNDIKSHA V*, 381–386.
<https://ejournal.undiksha.ac.id/index.php/semnasmipa/article/view/10310>
- Tangguda, S., & Suryanti, I. A. P. (2017). Pengaruh Limbah Cair Tambak Udang Terhadap Kepadatan Sel dan Laju Pertumbuhan Spesifik *Chlorella* sp. *Seminar Nasional Riset Inovatif. UNDIKSHA*, 171–176.
- Verma, S., & Kuila, A. (2019). Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology and Innovation*, 14, 100369.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>
- Vinothkumar, R., Dar, J. Y., Bharti, V. S., Singh, A., Vennila, A., Bhat, I. A., & Pandey, P. K. (2021). Heterotrophic Nitrifying and Aerobic Denitrifying Bacteria: Characterization and Comparison of Shrimp Pond and Effluent Discharge Channel in Aspects of Composition and Function. *Aquaculture*, 539 (March), 736659. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736659>
- Wulandari, W., Cokrowati, N., Astriana, B. H., & Diniarti, N. (2019). Penurunan Nilai Padatan Tersuspensi pada Limbah Tambak Udang Intensif Menggunakan Kerang Darah (*Anadara granosa*). *Jurnal Kelautan*, 12(2), 123–130.
<https://doi.org/10.21107/jk.v12i2.6346>



BAB II
EFEKTIVITAS REMEDIASI DAN LAJU FILTRASI KERANG DARAH
(*Tegillarca granosa*) TERHADAP LIMBAH TAMBAK INTENSIF UDANG
VANNAMEI (*Litopenaeus vannamei*)

ABSTRAK

Latar Belakang. Budidaya udang vannamei berkembang pesat namun menghasilkan limbah organik yang mencemari perairan. Limbah dari pakan, feses, dan bahan kimia berpotensi menurunkan kualitas air dan merusak ekosistem. Salah satu solusi bioremediasi adalah penggunaan kerang darah (*T. granosa*) sebagai filter feeder alami. Dengan mekanisme filtrasi biologis, kerang darah mampu menyerap bahan organik, meningkatkan kejernihan air, serta menjaga keseimbangan lingkungan tambak secara berkelanjutan. **Tujuan.** Menganalisis efektivitas kerang darah dengan mempertimbangkan variasi ukuran dan kepadatan yang berbeda dalam meremediasi limbah organik tambak intensif udang vannamei. **Metode.** Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental dengan rancangan acak lengkap (RAL) pola faktorial dengan 2 faktor, antara lain; ukuran kerang (A) dan kepadatan kerang (B). Masing-masing faktor terdiri atas 2 taraf yaitu A₁: 2-3 cm, A₂: 4-5 cm, B₁: 15 ekor/10 L dan B₂: 10 ekor/10 L, yang masing-masing diulang 3 kali. Parameter yang diamati adalah kualitas air. Efektivitas remediasi dan laju filtrasi selanjutnya dianalisis dengan uji ANOVA. **Hasil.** Ukuran kerang secara tunggal dan interaksinya dengan padat penebaran berpengaruh signifikan terhadap efektivitas remediasi. Efektivitas remediasi bahan organik total tertinggi pada perlakuan A₂B₂ (24,49%), sedangkan nitrit tertinggi pada perlakuan A₂B₁ (78,93%) dan A₂B₂ (73,12%). Faktor tunggal kepadatan dan ukuran kerang berpengaruh signifikan terhadap laju filtrasi bahan organik total, sedangkan pada laju filtrasi Nitrit, secara signifikan hanya dipengaruhi oleh kepadatan sebagai faktor tunggal. Laju filtrasi bahan organik total secara signifikan tertinggi pada perlakuan A₁B₂ yaitu, 3,69 mL/jam, 4,50 mL/jam dan 4,78 mL/jam pada hari ke-4, 5, dan 6, sedangkan laju filtrasi nitrit secara signifikan tertinggi pada perlakuan A₂B₂, terutama pada hari ke-3 4, 6 dan 7 yaitu 11,67 mL/jam, 11,19 mL/jam, 15,72 mL/jam, dan 21,48 mL/jam. Korelasi positif kuat antara laju filtrasi bahan organik total dan waktu paparan kerang darah dalam air limbah terlihat terlihat pada perlakuan A₁B₂ (R²=0,7961) dan A₂B₂ (R²=0,45520), sedangkan antara laju filtrasi Nitrit dan waktu paparan, korelasi positif yang kuat terlihat pada perlakuan A₁B₂ (R²=0,8629), A₂B₁ (R²=0,7448), dan A₂B₂ (R²=0,6941). **Kesimpulan.** Kerang darah efektif meremediasi nitrit dan bahan organik total pada limbah tambak intensif udang vannamei. Remediasi nitrit tertinggi pada kerang berukuran besar dengan kepadatan rendah, sedangkan remediasi bahan organik total tertinggi pada kerang berukuran besar dengan kepadatan tinggi. Laju filtrasi nitrit dan bahan organik total tertinggi ditemukan pada kerang berukuran kecil dengan kepadatan tinggi.

Kata kunci: kerang darah; bioremediasi; laju filtrasi; limbah organik;



2.1. Pendahuluan

Budidaya udang vannamei (*L. vannamei*) mengalami perkembangan yang signifikan dalam dekade terakhir, menjadikannya salah satu sektor akuakultur yang paling pesat berkembang di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Udang vannamei dikenal karena pertumbuhannya yang cepat, toleran terhadap kepadatan tinggi, dan tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan (Aparna et al., 2024; Han et al., 2018; Muchtar et al., 2021; Suwoyo & Hendrajat, 2021), sehingga menjadi pilihan utama bagi petambak udang. Produksi global udang vannamei meningkat secara substansial karena meningkatnya permintaan pasar internasional dan domestik (FAO, 2019). Indonesia, sebagai salah satu produsen utama udang vannamei, telah melihat ekspansi besar dalam budidaya udang ini. Upaya peningkatan produktivitas dan keberlanjutan budidaya udang di Indonesia melibatkan penggunaan teknologi canggih dan praktik budidaya yang lebih baik. Penerapan sistem budidaya intensif dengan manajemen kualitas air yang baik dan pakan yang berkualitas dapat meningkatkan hasil produksi udang vannamei secara signifikan (Renitasari & Musa, 2020). Teknologi seperti bioflok dan sistem resirkulasi air juga telah diadopsi untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan budidaya udang di Indonesia.

Upaya peningkatan produksi juga diusahakan oleh pembudidaya melalui optimalisasi penggunaan pakan buatan. Dalam budidaya intensif, penggunaan pakan buatan dengan kualitas yang tinggi mutlak dibutuhkan untuk mencapai target produksi. Namun demikian, pakan buatan menjadi sumber utama produksi limbah pada tambak berupa limbah organik yang dapat berdampak buruk terhadap kualitas air tambak dan lingkungan sekitarnya (Martins et al., 2010). Pakan yang tidak termakan selanjutnya akan larut, mengendap dan menjadi sumber bahan organik yang akan mempengaruhi kesuburan perairan (Syah et al., 2014). Selama proses produksi, limbah tidak hanya dihasilkan dari sisa pakan, feses maupun organisme yang mati di dalam tambak (Pędziwiatr et al., 2017), melainkan juga berasal dari sisa-sisa penggunaan bahan kimia untuk peningkatan produksi (Tampangallo et al., 2020).

Komponen limbah tambak intensif secara umum ada 2, yaitu limbah padat dan limbah cair. Limbah padat itu dihasilkan oleh feses dan sisa pakan yang tidak termakan, sedangkan limbah cair dihasilkan dari aktivitas metabolisme, pakan yang tidak termakan dan proses dekomposisi (Dauda et al., 2019). Limbah yang dibuang akan melewati vegetasi mangrove dan bermuara di laut hingga terakumulasi menjadi bahan organik, padatan tersuspensi, maupun bakteri yang mati (Vinothkumar et al., 2021). Keberadaannya akan mempengaruhi proses biogeokimia, keseimbangan akuatik serta memperburuk kondisi ekosistem (Jegatheesan et al., 2011) yang tergantung pada besarnya material dalam limbah yang ada di dalam air (Barrazaguardado et al., 2013). Limbah tambak dapat menyebabkan hipernutrifikasi yang diikuti oleh perubahan ekologi fitoplankton, peningkatan sedimentasi, hipoksia dan perubahan produktivitas. Meskipun limbah mengandung sejumlah unsur hara yang dapat dimanfaatkan oleh organisme dengan tingkat trofik yang lebih rendah, seperti



Chlorella sp (Tangguda et al., 2015; Tangguda & Suryanti, 2017), namun jika dibiarkan dan tidak dikelola dengan baik, akan merusak ekosistem perairan.

Salah satu pendekatan inovatif dalam mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan kerang darah sebagai agen bioremediasi alami (Renitasari et al., 2023; Syahrir et al., 2021). Kerang darah merupakan *filter feeder* yang efektif dalam menyaring bahan organik di air, sehingga berkontribusi dalam pengurangan beban limbah organik di tambak udang. Melalui filtrasi biologis, kerang darah dapat meningkatkan kualitas air tambak, mengurangi kekeruhan, dan mengurangi akumulasi bahan organik di dasar tambak (Ramli et al., 2014; Wulandari et al., 2019). Kerang darah memenuhi kebutuhan nutrisinya dengan cara menyaring air media hidupnya (*filter feeder*). Organisme ini sering membenamkan diri dalam sedimen dan menyaring air media di sekitarnya (Haeruddin et al., 2017). Meskipun demikian, terdapat perbedaan kemampuan filtrasi yang disebabkan oleh perbedaan ukuran dan berat kerang (Kusumawati et al., 2015). Selama kerang darah mengalami pertumbuhan, maka kemampuan untuk mengakumulasi bahan organik maupun logam toksik turut meningkat (Amriarni et al., 2011).

Kerang darah merupakan bivalvia yang memanfaatkan mekanisme penyaringan untuk memperoleh makanan (Gosling, 2003, 2015). Mereka menghisap air masuk melalui *sifon inhalant*, kemudian menyaring partikel makanan yang terkandung di dalam air melalui insang (Wong & Cheung, 2001). Partikel makanan seperti fitoplankton, detritus dan bahan organik terlarut tertangkap oleh insang dan diarahkan menuju mulut untuk dicerna (Hills et al., 2020). Kerang darah memiliki tingkat filtrasi yang tinggi, yang memungkinkan untuk memproses sejumlah besar air dan partikel makanan setiap saat (Kusumawati et al., 2015; Riisgård, 2001). Proses filtrasi yang dilakukan kerang darah tidak hanya berfungsi untuk pemenuhan nutrisi, tetapi juga berperan penting dalam menjaga kualitas air di lingkungan mereka. Kerang darah dapat mengurangi kandungan nitrogen dan fosfor dalam air, yang merupakan komponen utama yang berkontribusi terhadap eutrofikasi (Brito et al., 2018). Dengan demikian, keberadaan kerang darah dalam ekosistem perairan dapat membantu mengendalikan pertumbuhan alga yang berlebihan dan meningkatkan kondisi lingkungan perairan. Selain kemampuannya menyaring partikel makanan, kerang darah juga menunjukkan adaptabilitas tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan. Penelitian oleh (Mirsadeghi et al., 2013; Nuramira et al., 2021; Ramli et al., 2014; Zhan et al., 2022) mengungkapkan bahwa kerang darah mampu bertahan dan tetap aktif meskipun kondisi air sangat buruk. Adaptabilitas ini memungkinkan kerang darah untuk hidup di berbagai habitat, dari estuari hingga kawasan pesisir, dan berkontribusi terhadap stabilitas ekosistem dimana mereka berada.

Karakteristik filtrasi kerang darah melibatkan proses dimana kerang darah menyaring partikel makanan dari air melalui insang. Insangnya memiliki struktur yang kompleks yang memungkinkan untuk menyaring partikel-partikel kecil seperti fitoplankton, detritus, dan bahan organik terlarut dengan efisiensi tinggi menjadikannya efektif dalam mengurangi konsentrasi partikel tersuspensi dan meningkatkan kejernihan air di lingkungan perairan tempat mereka hidup (Abatenh



et al., 2017; Medler, 1998; Nicholaus et al., 2019). Penelitian lain menunjukkan bahwa laju filtrasi kerang darah optimum pada suhu 28-29°C, pH 7,2 dan salinitas 25 ppt (Kusumawati et al., 2015; Riisgård, 2001). Selain suhu, pH dan salinitas, faktor lain yang turut menentukan laju filtrasi adalah ukuran dan kepadatan kerang (Kusumawati et al., 2015; Retnosari et al., 2020; Wulandari et al., 2019). Hal inilah yang mendasari penelitian ini dilakukan dengan tujuan menganalisis efektivitas remediasi dan laju filtrasi kerang darah dengan mempertimbangkan faktor ukuran dan kepadatan yang berbeda dalam limbah tambak intensif udang vannamei.

2.2. Bahan dan Metode

a. Lokasi

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium di Politeknik Kelautan dan Perikanan Bone. Pengamatan secara *in situ* selama 7 (tujuh) hari untuk mengukur parameter kualitas air, antara lain; suhu, salinitas, pH, oksigen terlarut (DO), dan total padatan terlarut (TDS). Bersamaan dengan itu, pengamatan secara *ex situ* untuk nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-), fosfat (PO_4^{3-}), bahan organik total (BOT) dan total padatan tersuspensi (TSS) dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Balai Riset Perikanan Budidaya Air Payau dan Penyuluhan Perikanan (BRPBAP3) Maros.

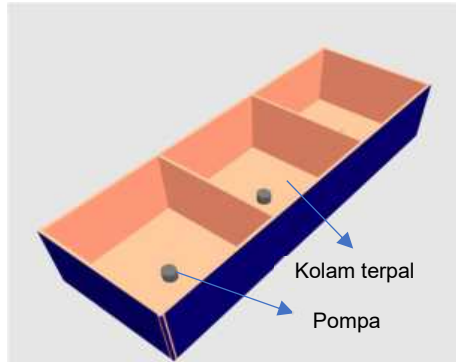


Gambar 2.1. Lokasi Penelitian



b. Wadah, Media dan Biota Uji

Penelitian menggunakan kolam terpal berukuran 50×50×30 cm dengan rangka PVC (Gambar 3.2). Pompa dipasang di dasar wadah untuk mengaduk air secara terus menerus agar homogenitas air terjaga dan mencegah sedimentasi. Air limbah berasal dari tambak intensif udang vannamei Politeknik Kelautan dan Perikanan Bone (Gambar 3.3) pada usia pemeliharaan 86 hari yang dipompa, ditampung dan didistribusikan ke setiap wadah uji sampai mencapai volume 50 L. Sirkulasi air dalam wadah diatur sedemikian rupa sehingga tidak terjadi difusi oksigen pada permukaan air yang dapat meningkatkan oksigen terlarut dalam media.



Gambar 2.2. Desain wadah uji



Gambar 2.3. Sumber air media

Kerang darah (*T. granosa*) yang digunakan sebagai biota uji (Gambar 3.4) diperoleh dari nelayan di Desa Patte'ne, Kabupaten Maros dan diangkut ke lokasi penelitian dengan menggunakan metode pengangkutan basah. Sebelum dimasukkan ke dalam wadah percobaan, kerang diaklimatisasi selama 24 jam dalam air laut steril tanpa pemberian pakan. Sesuai dengan tujuan penelitian, biota uji diklasifikasikan berdasarkan panjang cangkang yang diukur dengan menggunakan jangka sorong. Ada dua kategori ukuran yang diuji (Gambar 3.5), yaitu kecil (2-3 cm) dan besar (4-5 cm). Setiap ukuran dibagi menjadi dua padat penebaran, yaitu 15 dan 30 ekor per 10 liter air. Kerang darah kemudian didistribusikan ke dalam wadah percobaan sesuai dengan ukuran dan kepadatan yang telah ditentukan tanpa aerasi.



Gambar 2.4. Biota uji



Gambar 2.5. ukuran kerang darah
(a) ukuran kecil, (b) ukuran besar



c. Rancangan Penelitian

Penentuan tata letak wadah masing-masing perlakuan dilakukan secara acak dengan sistem undi. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) pola faktorial dengan 2 faktor, antara lain; ukuran kerang (A) dan kepadatan kerang (B). Masing-masing faktor terdiri atas 2 taraf yaitu A₁: 2-3 cm, A₂: 4-5 cm, B₁: 15 ekor/10 L dan B₂: 10 ekor/10 L yang masing-masing diulang 3 kali.

Tabel 2.1. Rancangan Penelitian

Perlakuan	Ulangan		
	1	2	3
A ₁ B ₁ (2-3cm, 15 ekor/10 L)	(A ₁ B ₁) ₁	(A ₁ B ₁) ₂	(A ₁ B ₁) ₃
A ₁ B ₂ (2-3cm, 30 ekor/10 L)	(A ₁ B ₂) ₁	(A ₁ B ₂) ₂	(A ₁ B ₂) ₃
A ₂ B ₁ (4-5cm, 15 ekor/10 L)	(A ₂ B ₁) ₁	(A ₂ B ₁) ₂	(A ₂ B ₁) ₃
A ₂ B ₂ (4-5cm, 30 ekor/10 L)	(A ₂ B ₂) ₁	(A ₂ B ₂) ₂	(A ₂ B ₂) ₃

d. Parameter Kualitas Air

Pengamatan parameter kualitas air dilakukan secara berkala selama tujuh hari berturut-turut, baik secara *in situ* maupun *ex situ*. Pengamatan *in situ* meliputi suhu, salinitas, pH, oksigen terlarut (DO) dan total padatan terlarut (TDS) diukur setiap 3 jam sekali (01:00, 04:00, 07:00, 10:00, 13:00, 16:00, 19:00, 22:00) dengan menggunakan alat pengukur kualitas air multiparameter. Parameter lainnya, yaitu nitrit (NO₂), nitrat (NO₃), fosfat (PO₄), bahan organik total (BOT), dan total padatan tersuspensi (TSS), dianalisis setiap hari pada pukul 10:00. Sampel air dikumpulkan dan kemudian dianalisis menggunakan metode spektrofotometrik dan gravimetrik di Laboratorium Kualitas Air Balai Riset Perikanan Budidaya Air Payau dan Penyuluhan Perikanan (BRPBAP3) di Maros.

e. Efektivitas Remediasi dan Laju Filtrasi

Efektivitas remediasi diukur berdasarkan persentase perubahan parameter kualitas air antara awal dan akhir masa pemeliharaan, yang mencerminkan kapasitas filtrasi kerang darah. Adapun laju filtrasi dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi bahan organik dalam volume air tertentu per satuan waktu, sebagai akibat dari proses penyerapan bahan organik oleh kerang darah.



f. Analisis Data

Efektivitas remediasi dihitung dengan menggunakan rumus berikut (McLeod et al., 2017);

$$P (\%) = \frac{K_0 - K_t}{K_0} \times 100$$

Keterangan:

- P : Persentase perubahan parameter kualitas air (%)
- K₀ : Konsentrasi awal
- K_t : Konsentrasi akhir

Laju filtrasi dihitung dengan menggunakan rumus berikut (Riisgård, 2001);

$$FR = \left(\frac{V}{nt} \right) \ln \left(\frac{C_0}{C_t} \right)$$

Keterangan:

- FR : laju filtrasi (mL/jam)
- V : volume media uji (mL)
- n : jumlah hewan uji (ekor)
- t : waktu (jam)
- C₀ : konsentrasi awal (mg/L)
- C_t : konsentrasi akhir (mg/L)

Hasil perhitungan efektivitas remediasi dan laju filtrasi dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA dengan taraf nyata kurang dari 5% (P<0,05) untuk mengetahui perbedaan hasil yang terjadi pada setiap perlakuan.

2.3. Hasil

a. Efektivitas Remediasi

Berdasarkan hasil pengamatan, terjadi penurunan konsentrasi oksigen terlarut yang signifikan, disertai peningkatan konsentrasi amonia dan nitrat, fosfat, dan TDS dan TSS yang cukup besar sebagaimana Tabel 2.2. Pada akhir penelitian, kerang darah menunjukkan kemampuan untuk meremediasi parameter kualitas air, khususnya nitrit dan bahan organik total. Analisis statistik menunjukkan bahwa ukuran kerang, sebagai faktor tunggal (P<0,05) dan interaksinya dengan padat pennebaran (P<0,05) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas remediasi air limbah tambak udang, yang dibuktikan dengan penurunan konsentrasi nitrit dan bahan organik total. Sebaliknya, padat tebar saja tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan (P>0,05) terhadap penurunan senyawa-senyawa tersebut, yang mengindikasikan bahwa padat tebar tidak memberikan kontribusi yang berarti terhadap perbaikan kualitas air.



Table 2.2. Parameter Kualitas Air dan Efektivitas Remediasi

Perlakuan	Waktu Pengamatan	Parameter Kualitas Air								
		pH	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	BOT (mg/L)	TSS (mg/L)
A ₁ B ₁	Awal (D0)	7,75	8,80	19,90	7,23	0,34	1,16	0,02	70,40	18,00
	Akhir (D7)	7,04	1,43	20,29	6,33	24,89	1,04	0,05	57,03	55,33
	Penurunan (%)	9,16 ^a	83,79 ^c	(1,95) ^a	12,48 ^c	(7.263,20) ^a	10,08 ^a	(123,62) ^b	18,99 ^a	(207,41) ^a
A ₁ B ₂	Awal (D0)	7,75	8,80	19,90	7,23	0,34	1,16	0,02	70,40	18,00
	Akhir (D7)	7,34	1,23	20,22	2,98	16,17	3,45	0,06	54,82	67,83
	Penurunan (%)	5,33 ^b	86,06 ^{bc}	(1,62) ^a	58,82 ^b	(4.685,22) ^a	(197,52) ^b	(213,37) ^a	22,14 ^a	(276,85) ^a
A ₂ B ₁	Awal (D0)	7,75	8,80	19,90	7,23	0,34	1,16	0,02	70,40	18,00
	Akhir (D7)	7,19	0,83	20,26	1,52	21,20	3,29	0,05	55,00	39,34
	Penurunan (%)	7,18 ^{ab}	90,53 ^b	(1,79) ^a	78,93 ^a	(6.172,12) ^a	(184,13) ^b	(150,49) ^b	21,87 ^a	(118,56) ^a
A ₂ B ₂	Awal (D0)	7,75	8,80	19,90	7,23	0,34	1,16	0,02	70,40	18,00
	Akhir (D7)	7,16	0,13	20,46	1,94	22,69	2,93	0,05	53,16	61,67
	Penurunan (%)	7,66 ^a	98,56 ^a	(2,79) ^b	73,12 ^{ab}	(6.612,11) ^a	(153,13) ^b	(153,40) ^b	24,49 ^a	(242,59) ^a

Berdasarkan hasil uji, efektivitas remediasi nitrit tertinggi terjadi pada perlakuan A₂B₁ dan Perlakuan A₂B₂. efektivitas remediasi nitrit tertinggi (78,93%) tercatat pada Perlakuan A₂B₁, yang secara statistik sebanding dengan 73,12% pada Perlakuan A₂B₂, tetapi secara signifikan lebih tinggi dari perlakuan A₁B₁ (12,48%) dan perlakuan A₁B₂ (58,82%) ($P < 0,05$). Meskipun perbedaannya tidak signifikan secara statistik dibandingkan dengan perlakuan lainnya, Perlakuan A₂B₂ menunjukkan efektivitas remediasi bahan organik total yang relatif lebih tinggi, yaitu mencapai 24,49%.

b. Laju Filtrasi

Laju filtrasi dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi limbah sejak pengambilan sampel awal hingga akhir pengamatan dengan mempertimbangkan waktu paparan. Data konsentrasi harian dan penurunan konsentrasi bahan organik total pada Tabel 2.3 selanjutnya dihitung dengan rumus (Riisgård, 2001) untuk menghasilkan data laju filtrasi sebagaimana pada Tabel 2.4. Dari hasil perhitungan tidak ditemukan adanya perbedaan yang signifikan di antara semua perlakuan dalam hal laju filtrasi bahan organik total sejak hari ke 1 sampai hari ke 3 sebagaimana Tabel 2.4.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor tunggal kepadatan dan ukuran kerang darah memiliki pengaruh yang signifikan ($P < 0,05$) terhadap laju filtrasi konsentrasi bahan organik total. Namun, tidak ada pengaruh interaksi yang signifikan antara kedua faktor tersebut terhadap laju filtrasi konsentrasi bahan organik total ($P > 0,05$). Pada hari ke-4, 5, dan 6, perlakuan A₁B₂ menunjukkan laju filtrasi tertinggi dengan nilai 3,69 mL/jam, 4,50 mL/jam dan 4,78 mL/jam yang secara signifikan berbeda dengan perlakuan lainnya ($P < 0,05$).



Tabel 2.3. Perubahan Konsentrasi Bahan Organik Total

Perlakuan	Konsentrasi BOT (mg/L)							
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
A ₁ B ₁	70,40	55,54	56,10	54,20	52,12	54,18	56,47	57,03
	Penurunan	14,86	14,30	16,20	18,28	16,22	13,93	13,37
A ₁ B ₂	70,40	66,75	58,18	54,51	57,10	54,70	54,82	54,76
	Penurunan	3,65	12,22	15,89	13,30	15,70	15,58	15,64
A ₂ B ₁	70,40	60,76	52,85	57,37	56,82	54,87	54,82	55,00
	Penurunan	9,64	17,55	13,03	13,58	15,53	15,58	15,58
A ₂ B ₂	70,40	61,03	57,82	60,49	56,17	56,32	54,39	53,16
	Penurunan	9,37	12,58	9,91	14,23	14,08	16,01	17,24

*) D0= awal pemeliharaan, D1= hari ke-1, D2= hari ke-2, D3= hari ke-3, D4= hari ke-4, D5= hari ke-5, D6= hari ke-6, D7= hari ke-7

Tabel 2.4. Laju Filtrasi Kerang Darah Terhadap Bahan Organik Total

Perlakuan	Laju Filtrasi (mL/jam)						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
A ₁ B ₁	4,43 ^a	3,17 ^b	2,97 ^b	3,33 ^a	2,62 ^a	2,13 ^a	1,88 ^a
A ₁ B ₂	1,51 ^a	1,35 ^a	1,56 ^a	3,69 ^b	4,50 ^b	4,78 ^b	4,19 ^b
A ₂ B ₁	2,08 ^a	4,02 ^b	2,09 ^{ab}	1,82 ^c	1,82 ^c	1,76 ^c	1,54 ^c
A ₂ B ₂	2,02 ^a	1,37 ^a	0,92 ^a	1,60 ^d	1,62 ^d	2,44 ^d	4,71 ^d

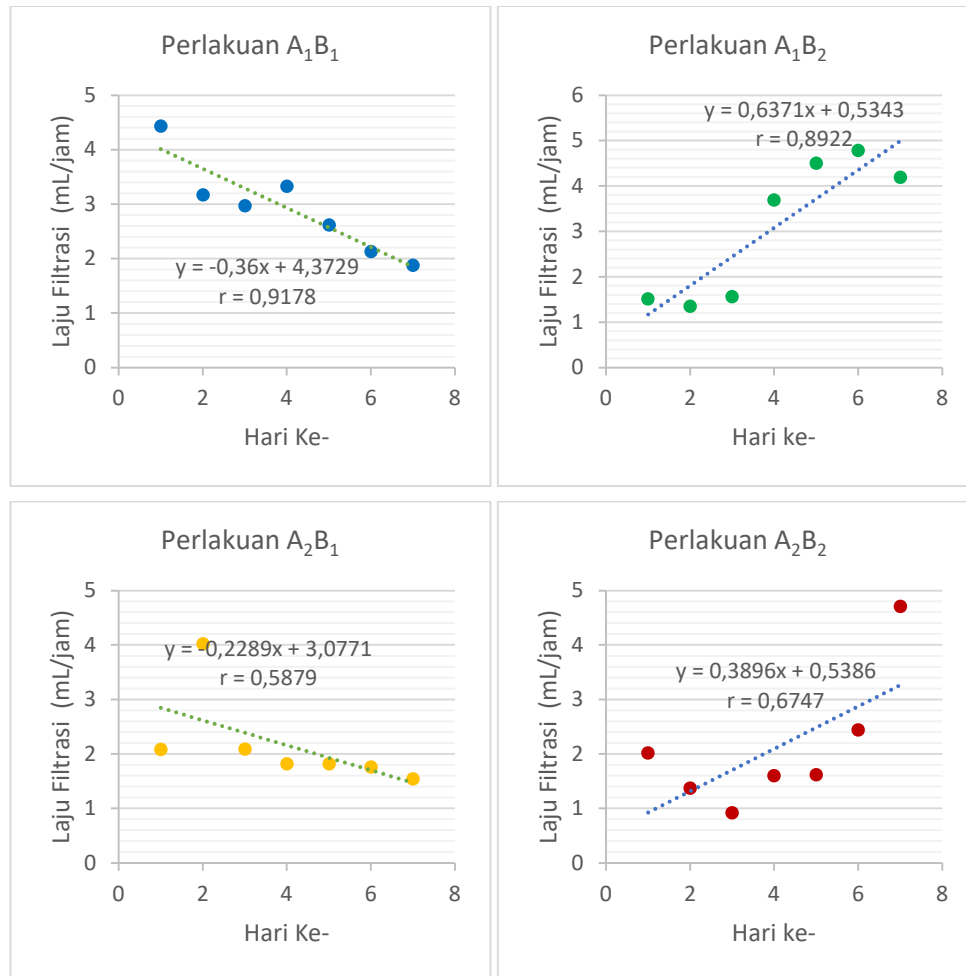
*) D1= hari ke-1, D2= hari ke-2, D3= hari ke-3, D4= hari ke-4, D5= hari ke-5, D6= hari ke-6, D7= hari ke-7

Ukuran kerang yang lebih kecil (2-3 cm) menunjukkan laju filtrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan ukuran kerang yang lebih besar (4-5 cm). Perlakuan A₁B₁ (2-3 cm, 15 ekor/10 L) menunjukkan laju filtrasi 2,13 mL/jam dan 1,88 mL/jam pada hari ke-6 dan ke-7, sedangkan perlakuan A₂B₁ (4-5 cm, 15 ekor/10 L) menunjukkan laju filtrasi 1,76 mL/jam dan 1,54 mL/jam pada hari ke-6 dan ke-7. Selain itu, kepadatan kerang memiliki dampak yang lebih besar pada laju filtrasi dibandingkan dengan ukuran kerang. Kepadatan kerang yang lebih tinggi (30 ekor/10 L) menghasilkan laju filtrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kepadatan yang lebih rendah (15 ekor/10 L). Laju filtrasi tertinggi diamati pada akhir penelitian, yaitu pada hari ke-6 dan ke-7. Perlakuan A₁B₂ (ukuran 2-3 cm dengan kepadatan 30 individu/10 L) menunjukkan laju filtrasi sebesar 4,78 mL/jam dan 4,19 mL/jam, sedangkan perlakuan A₂B₂ (ukuran 4-5 cm dengan kepadatan 30 individu/10 L) menunjukkan laju filtrasi sebesar 2,44 mL/jam dan 4,71 mL/jam pada hari ke-6 dan ke-7.

Perlakuan A₁B₂ dan A₂B₂, dimana keduanya memiliki kepadatan yang lebih tinggi, menunjukkan peningkatan laju filtrasi dari waktu ke waktu selama paparan air limbah yang menghasilkan penurunan yang signifikan dalam konsentrasi bahan organik total sejak hari pertama hingga akhir penelitian (Gambar 2.6). Korelasi positif yang kuat antara laju filtrasi bahan organik total dan waktu paparan kerang darah



dalam air limbah terlihat jelas dari koefisien korelasi, dengan nilai $r_{A_1B_2} = 0,8922$ dan $r_{A_2B_2} = 0,6747$. Sebaliknya, perlakuan dengan kepadatan rendah (A_1B_1 dan A_2B_1) menunjukkan korelasi negatif, dimana laju filtrasi menurun seiring berjalannya waktu sejak kerang berada di dalam air limbah.



Gambar 2.6. Pengaruh durasi paparan kerang darah terhadap laju filtrasi bahan organik total pada perlakuan A_1B_1 , A_1B_2 , A_2B_1 , dan A_2B_2

Data konsentrasi harian dan penurunan konsentrasi nitrit (Tabel 2.5) digunakan untuk menghitung laju filtrasi dengan menggunakan rumus Riisgård (2001), sebagaimana hasil pada Tabel 2.6.



Tabel 2.5. Perubahan Konsentrasi Nitrit

Perlakuan	Konsentrasi Nitrit (mg/L)							
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
A ₁ B ₁	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23
	Penurunan	3,26	1,50	1,01	0,69	1,49	0,61	0,90
A ₁ B ₂	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23
	Penurunan	1,58	1,31	3,91	3,71	4,65	3,79	4,25
A ₂ B ₁	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23
	Penurunan	1,53	0,33	1,83	1,38	4,66	5,93	5,71
A ₂ B ₂	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23	7,23
	Penurunan	0,50	3,54	6,18	5,65	3,28	5,88	5,29

*) D0= awal pemeliharaan, D1= hari ke-1, D2= hari ke-2, D3= hari ke-3, D4= hari ke-4, D5= hari ke-5, D6= hari ke-6, D7= hari ke-7

Perlakuan A₁B₂ menunjukkan laju filtrasi tertinggi di antara semua perlakuan pada hari ke-3, 4, 5, dan 6.

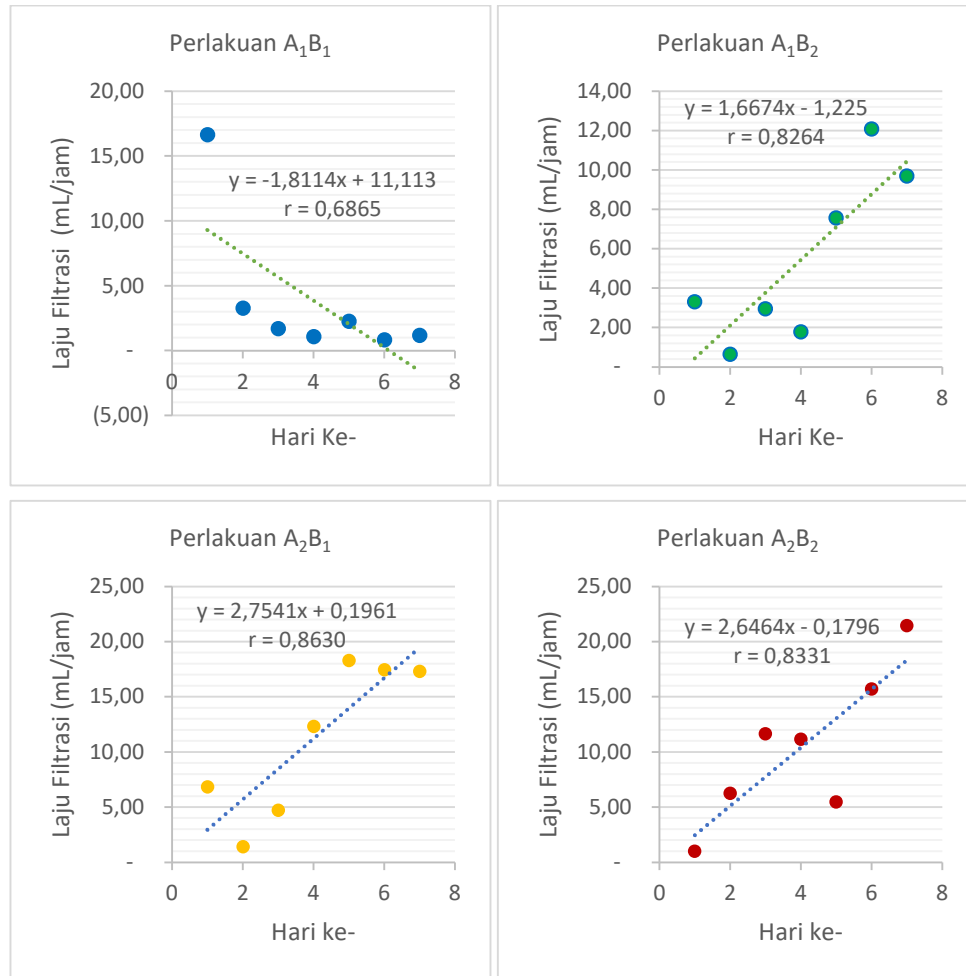
Tabel 2.6. Laju Filtrasi Kerang Darah terhadap Nitrit

Perlakuan	Laju Filtrasi (mL/jam)						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
A ₁ B ₁	16,65 ^a	3,29 ^a	1,72 ^a	1,11 ^b	2,27 ^b	0,85 ^b	1,19 ^b
A ₁ B ₂	6,85 ^b	1,43 ^a	4,74 ^b	12,35 ^a	18,32 ^a	17,48 ^a	17,32 ^{ab}
A ₂ B ₁	3,32 ^c	0,65 ^a	2,96 ^c	1,80 ^{bc}	7,58 ^{ab}	12,09 ^{ab}	9,71 ^{ab}
A ₂ B ₂	1,01 ^d	6,28 ^a	11,67 ^d	11,19 ^{ac}	5,49 ^{ab}	15,72 ^{ab}	21,48 ^a

Kepadatan kerang memberikan efek tunggal yang signifikan ($p < 0,05$) terhadap laju filtrasi nitrit, terlepas dari ukuran kerang. Ukuran kerang ($p > 0,05$), maupun interaksinya dengan kepadatan ($p > 0,05$) tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap laju filtrasi nitrit. Pengaruh signifikan kepadatan kerang terhadap laju filtrasi nitrit terlihat jelas dari hari ke-3 hingga hari ke-7. Berdasarkan hasil uji beda nyata terkecil, perlakuan dengan kepadatan kerang yang lebih tinggi (30 ekor/10 L) menunjukkan laju filtrasi yang lebih tinggi secara signifikan dibandingkan dengan perlakuan dengan kepadatan yang lebih rendah (15 ekor/10 L). Pada kerang ukuran kecil, perlakuan dengan kepadatan tinggi (A₁B₂) menunjukkan laju filtrasi yang lebih tinggi secara signifikan pada hari ke-3, 4, 6, dan 7 dengan nilai masing-masing 4,74 mL/jam, 12,35 mL/jam, 17,48 mL/jam, dan 17,32 mL/jam. Sebaliknya, perlakuan A₁B₁ menunjukkan laju filtrasi yang lebih rendah yaitu 1,72 mL/jam, 1,11 mL/jam, 0,85 mL/jam, dan 1,19 mL/jam pada hari yang sama. Demikian pula pada kerang ukuran besar, perlakuan dengan kepadatan tinggi (A₂B₂) menunjukkan laju filtrasi yang lebih tinggi secara signifikan pada hari ke-3, 4, 6, dan 7, dengan nilai masing-masing 11,67 mL/jam, 11,19 mL/jam, 15,72 mL/jam, dan 21,48 mL/jam. Sebaliknya, perlakuan A₂B₁ menunjukkan laju filtrasi yang lebih rendah yaitu 2,96 mL/jam, 1,80 mL/jam, 12,09 mL/jam, dan 9,71 mL/jam pada hari yang sama.



Perlakuan A_1B_2 , A_2B_1 , dan A_2B_2 menunjukkan peningkatan laju filtrasi yang signifikan dari waktu ke waktu selama paparan dalam air limbah yang menghasilkan penurunan yang signifikan dalam konsentrasi Nitrit dari hari pertama hingga akhir penelitian (Gambar 2.7). Korelasi positif antara laju filtrasi nitrit dan waktu paparan dalam air limbah sangat kuat, dengan koefisien korelasi $r = 0,8264$, $r = 0,8630$, dan $r = 0,8331$ untuk Perlakuan A_1B_2 , A_2B_1 , dan A_2B_2 , masing-masing. Perlakuan dengan kepadatan tinggi (A_1B_2 dan A_2B_2) secara konsisten menunjukkan korelasi positif yang kuat antara laju filtrasi nitrit dan waktu paparan. Sebaliknya, perlakuan kepadatan rendah dengan kerang berukuran kecil (Perlakuan A_1B_1) menunjukkan korelasi negatif, dimana terjadi penurunan laju filtrasi selama masa pemeliharaan.



Gambar 2.7. Pengaruh Durasi Paparan Kerang Darah terhadap Laju Filtrasi Nitrit pada Perlakuan A_1B_1 , A_1B_2 , A_2B_1 , dan A_2B_2



2.4. Pembahasan

a. Efektivitas Remediasi

Perubahan konsentrasi senyawa organik dan anorganik dalam air menunjukkan terjadinya proses dekomposisi yang melibatkan bahan organik terlarut dalam air limbah, termasuk sisa pakan, feses dan limbah metabolik lainnya yang dihasilkan selama proses budidaya. Akumulasi bahan organik menyebabkan berkurangnya konsentrasi oksigen terlarut, meningkatnya konsentrasi amonia dan nitrat yang berdampak negatif pada kesehatan dan pertumbuhan udang dan menimbulkan risiko terganggunya keseimbangan lingkungan, seperti eutrofikasi perairan (Akinawo, 2023; Singh et al., 2021). Amonia merupakan produk sampingan dari penguraian protein pakan yang tidak termakan atau tidak tercerna kemudian dilepaskan ke dalam air selama budidaya udang. Penurunan drastis konsentrasi amonia pada hari pertama dalam sistem yang menggunakan kerang darah sebagai bioremediator dapat diinterpretasikan sebagai respon awal terhadap tingginya konsentrasi limbah nitrogen. Proses nitrifikasi dimungkinkan berlangsung secara intensif pada tahap awal, ketika kondisi lingkungan masih mendukung aktivitas mikroorganisme nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*. Mikroorganisme ini mengoksidasi amonia menjadi nitrit dan kemudian menjadi nitrat. Proses ini dapat berlangsung cepat ketika tersedia substrat amonia dalam jumlah besar dan oksigen terlarut yang mencukupi (Wright & Lehtovirta-Morley, 2023). Selain itu, kerang darah juga berperan secara tidak langsung dengan meningkatkan kualitas air melalui filtrasi bahan organik, sehingga mendukung pertumbuhan komunitas nitrifikasi (Fillippini, et al., 2023). Namun, peningkatan kembali amonia sejak hari kedua menunjukkan bahwa laju ekskresi nitrogen dari kerang darah dan dekomposisi bahan organik melebihi kapasitas pengolahan oleh mikroorganisme nitrifikasi. Selain itu, dalam sistem tertutup dengan oksigen terlarut yang terus menurun, nitrifikasi dapat melambat atau bahkan terhenti sehingga menyebabkan akumulasi amonia (Wright & Lehtovirta-Morley, 2023).

Peningkatan konsentrasi nitrat sejak hari pertama menunjukkan bahwa proses nitrifikasi berlangsung secara aktif. Nitrifikasi melibatkan dua fase, yaitu oksidasi amonia ke nitrit oleh bakteri *Nitrosomonas*, kemudian oksidasi nitrit ke nitrat oleh *Nitrobacter*. Dalam kondisi lingkungan yang memiliki cukup oksigen terlarut dan tersedia substrat nitrogen (amonia), bakteri-bakteri ini mampu berkembang cepat dan mengonversi senyawa nitrogen tereduksi menjadi bentuk yang lebih stabil, yaitu nitrat (Keerio & Bae, 2020). Peningkatan nitrat dalam fase awal menunjukkan bahwa input amonia yang berasal dari ekskresi udang, dekomposisi pakan, dan aktivitas metabolik lainnya telah melalui proses konversi biologis, yang pada satu sisi mencerminkan efisiensi sistem dalam menurunkan senyawa amonia yang toksik. Namun, nitrat yang dihasilkan dari nitrifikasi ini tidak serta merta tereliminasi dari sistem apabila proses denitrifikasi tidak berlangsung secara optimal. Karbon organik merupakan fraksi dari bahan organik terlarut yang ketersediaannya dalam jumlah cukup sangat penting bagi proses denitrifikasi. Mikroorganisme denitrifikasi



menggunakan senyawa karbon sebagai donor elektron untuk mereduksi nitrat (NO_3^-) menjadi gas nitrogen (N_2). Jika bahan organik terurai atau tidak tersedia dalam jumlah cukup, maka proses ini akan terhambat meskipun nitrat tersedia (Rajta et al., 2020) hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa bahan organik total telah mengalami penurunan secara terus menerus.

Total Dissolved Solids (TDS) yang meningkat meskipun terdapat kerang darah sebagai biofilter menunjukkan bahwa mekanisme penyerapan dan filtrasi oleh kerang pada kondisi ini lebih dominan terhadap bahan organik total. Kerang darah secara biologis menyaring partikel organik, namun tidak secara langsung menyerap atau menghilangkan ion-ion terlarut seperti NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , dan mineral terlarut lain penyusun TDS. Selama proses biodegradasi bahan organik, terjadi mineralisasi, yaitu konversi bahan organik kompleks menjadi senyawa anorganik terlarut yang stabil, termasuk di antaranya ion-ion penyusun TDS. Dengan demikian hasil dekomposisi tersebut tetap berada dalam kolom air dan berkontribusi terhadap peningkatan TDS (Yoshikawa et al., 2012). Aktivitas metabolisme kerang sendiri juga menyumbangkan bahan terlarut melalui ekskresi, yang kemudian akan terakumulasi jika tidak ada proses selanjutnya seperti denitrifikasi atau asimilasi oleh tanaman air atau mikroba heterotrofik lainnya (Rong et al., 2021).

Demikian halnya dengan Total Suspended Solids (TSS) yang tidak mengalami penurunan selama pemeliharaan. Salah satu penyebab utama kondisi ini adalah ketiadaan sistem sedimentasi alami atau buatan, yang seharusnya memungkinkan partikel tersuspensi mengendap secara bertahap ke dasar media. Sebaliknya, penggunaan pompa aerasi secara terus-menerus menyebabkan terjadinya sirkulasi dan pengadukan air, yang tidak hanya mencegah proses pengendapan, tetapi juga dapat mengangkat kembali partikel halus dari dasar media ke kolom air. Pengadukan ini memperkuat keberadaan fraksi padat tersuspensi di seluruh kolom air, sehingga menjaga atau bahkan meningkatkan konsentrasi TSS (Soaudy, et al., 2023). Selain itu, aktivitas kerang darah turut memberikan kontribusi terhadap peningkatan TSS, terutama melalui produksi biodeposit, yaitu *fezes* dan *pseudofeces* yang dihasilkan dari proses penyaringan dan pencernaan. Biodeposit ini, bila tidak segera mengendap atau terperangkap dalam substrat dasar, akan tetap berada dalam air sebagai partikel tersuspensi. Bahkan dalam sistem akuakultur beraliran tinggi, keberadaan biodeposit yang belum sempat mengalami dekomposisi atau sedimentasi dapat menjadi sumber beban padatan tersuspensi sekunder (Chamberlain et al., 2001). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan organisme bioremediator seperti kerang darah perlu diimbangi dengan rekayasa yang mendukung sedimentasi agar efektivitasnya dalam mengurangi parameter pencemar tidak justru berbalik menjadi sumber pencemar baru.

Kerang darah, seperti *filter feeder* lainnya, tidak hanya menyerap, tetapi juga mengeluarkan senyawa metabolik, termasuk di antaranya adalah fosfat. Setelah menyerap materi organik, fosfor yang terkandung di dalamnya dan tidak digunakan untuk pertumbuhan akan diekskresikan kembali ke kolom air dalam bentuk *pseudofeces* yang di dalamnya juga mengandung ortofosfat (PO_4^{3-}) (Gosling, 2015).



Kondisi dasar media yang tidak memungkinkan pengendapan dan mineralisasi fosfat secara stabil akibat proses aerasi maupun sirkulasi, dapat menyebabkan fosfat yang seharusnya mengendap dapat kembali terlarut dalam air melalui proses desorpsi atau mineralisasi (Tu et al., 2023).

Saat kerang darah memperoleh makanan melalui proses filtrasi, mereka menyerap bahan organik terlarut dan nitrit ke dalam jaringannya yang mengakibatkan penurunan konsentrasi senyawa tersebut ini di dalam air. Kemampuan kerang darah untuk meremediasi limbah cair dikaitkan dengan peran ganda mereka dalam proses filtrasi (Fitriani et al., 2022) dan bioturbasi (Nicholaus et al., 2019). Melalui mekanisme makannya, kerang darah menyaring partikel tersuspensi dari air (Koo & Seo, 2020), menyerap air dan menjebak partikel terlarut di insang dan *labial palp*. Struktur-struktur ini memainkan peran penting dalam menyortir sejumlah besar materi partikulat (Rosa et al., 2018). Remediasi yang paling efektif, seperti yang ditunjukkan oleh pengurangan terbesar dalam konsentrasi bahan organik total terlihat pada perlakuan A₂B₂ yang menggunakan kerang berukuran besar. Sebaliknya, efektivitas remediasi nitrit tertinggi tercatat pada perlakuan A₂B₁ yang juga menggunakan kerang berukuran besar, meskipun terdapat perbedaan dalam kepadatan kerang.

Penurunan konsentrasi nitrit dapat dikaitkan dengan dua mekanisme yang terjadi. pertama, oksidasi nitrit menjadi nitrat terjadi selama proses nitrifikasi, khususnya pada fase nitrifikasi yang dimediasi oleh *Nitrobacter*. Kedua, nitrat digunakan untuk pembentukan protein biomassa pada kerang darah. Efektivitas remediasi nitrit tertinggi yang diamati pada perlakuan dengan kerang yang lebih besar menunjukkan bahwa kapasitas remediasi meningkat seiring dengan bertambahnya ukuran kerang, karena lebih banyak bahan organik total dan nitrit yang disaring dan dimasukkan ke dalam tubuhnya. Ini didukung oleh korelasi positif antara ukuran kerang dan ukuran insang yang memfasilitasi penyerapan bahan organik yang lebih besar (Gonzalez et al., 2019). Selain insang, organ lain seperti otot, kaki, dan mantel juga berkontribusi pada proses filtrasi dengan menghasilkan arus air yang kuat dari luar ke dalam tubuhnya (Meseck et al., 2020). Efektivitas remediasi kerang darah terkait dengan aktivitas bioturbasinya, dimana kerang yang lebih besar menunjukkan tingkat bioturbasi yang lebih tinggi dibandingkan yang lebih kecil (Gonzalez et al., 2019; Lukwambe et al., 2018, 2020). Bioturbasi yang dihasilkan dari aktivitas kerang darah yang mengaduk air dan sedimen melibatkan gerakan membuka dan menutup cangkang secara berulang sehingga menyebabkan pencampuran air dan meningkatkan efisiensi filtrasi (Nicholaus et al., 2019; Rosa et al., 2018).

Aktivitas bioturbasi kerang darah meningkatkan distribusi oksigen terlarut, mendorong pembentukan zona redoks di sekitar titik pencampuran. Zona-zona ini mendukung pertumbuhan bakteri dan meningkatkan aktivitas bakteri nitrifikasi, yang mengoksidasi amonia menjadi nitrit (Nicholaus et al., 2019). Akibatnya, bioturbasi memicu metabolisme kerang darah yang menyebabkan bakteri aerob menguraikan bahan organik (Ma et al., 2015). Penurunan konsentrasi nitrit akibat bioturbasi lebih



lanjut memicu nitrifikasi oleh *Nitrobacter* yang secara biologis mengoksidasi nitrit menjadi nitrat. Proses ini semakin intensif seiring dengan bertambahnya ukuran kerang. Dengan demikian, aktivitas bioturbasi kerang secara signifikan berkontribusi terhadap pengurangan limbah akuakultur (Lukwambe et al., 2018).

b. Laju Filtrasi

Faktor tunggal kepadatan dan ukuran kerang darah memiliki pengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap laju filtrasi konsentrasi bahan organik total. Kerang darah yang lebih besar (4-5 cm) menunjukkan kemampuan filtrasi yang lebih tinggi, menyaring air limbah dan menyerap bahan organik dalam volume yang lebih besar per satuan waktu. Kerang darah mengurangi kandungan bahan organik melalui pencernaan, asimilasi, dan dekomposisi (Lukwambe et al., 2018; Nicholaus et al., 2019). Kerang yang lebih besar menunjukkan kemampuan filtrasi yang lebih baik karena ukuran dan luas permukaan insangnya yang lebih besar. Ini memungkinkan penangkapan partikel makanan dan bahan organik yang terlarut dalam air menjadi lebih efisien (Rosa et al., 2018). Selain itu, peningkatan kepadatan kerang memfasilitasi penyerapan bahan organik total yang lebih besar, karena filtrasi yang dilakukan secara kolektif terhadap volume air yang lebih besar oleh semua individu sehingga menghasilkan pengurangan bahan organik yang lebih besar pula (Pouil et al., 2021).

Kepadatan kerang sebagai faktor tunggal, berdampak signifikan terhadap laju filtrasi nitrit di dalam air. Hal ini dikarenakan peningkatan kepadatan kerang menghasilkan volume total air yang disaring lebih besar. Adapun kerang ukuran kecil menunjukkan tingkat filtrasi bahan organik yang lebih rendah dibandingkan dengan kerang yang lebih besar, namun menunjukkan tingkat filtrasi yang lebih tinggi untuk nitrit. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh kemampuan kerang kecil yang lebih rendah dalam menyerap bahan organik sebagai sumber makanan, sehingga proporsi nitrit yang diserap lebih tinggi sebagai gantinya. Akibatnya, kerang kecil menunjukkan tingkat filtrasi nitrit yang lebih tinggi dibandingkan dengan kerang yang lebih besar.

2.5. Kesimpulan

Dari seluruh parameter kualitas air yang dianalisis, kerang darah (*T. granosa*) efektif meremediasi dan memfilter nitrit dan bahan organik total pada limbah tambak intensif udang vannamei. Efektivitas remediasi serta laju filtrasi nitrit dan bahan organik total tertinggi terjadi pada kepadatan kerang darah tertinggi, akibat peningkatan jumlah individu dengan insang yang berfungsi menyaring air dalam proses pengambilan pakannya. Efektivitas remediasi nitrit dan bahan organik total tertinggi diperoleh pada kerang darah berukuran besar, sebagai akibat permukaan dan volume insang yang lebih besar dengan kemampuan penyaringan air yang lebih banyak. Laju filtrasi nitrit dan bahan organik total tertinggi terjadi pada



kerang yang berukuran kecil yang menunjukkan tingginya frekuensi penyaringan air per satuan waktu.

2.6. Referensi

- Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegaye, Z., & Wassie, M. (2017). The Role of Microorganisms in Bioremediation- A Review. *Open Journal of Environmental Biology*, 2(1), 038–046. <https://doi.org/10.17352/ojeb.000007>
- Akinnawo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, Consequences, Physical, Chemical and Biological Techniques for Mitigation Strategies. *Environmental Challenges*, 12(May). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
- Amriarni, A., Hendarto, B., & Hadiyanto, A. (2011). Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) dan Seng (Zn) pada Kerang Darah (*Anadara granosa* L.) dan Kerang Bakau (*Polymesoda bengalensis* L.) DI Perairan Teluk Kendari. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 9(2), 45–50. <https://doi.org/10.14710/jil.9.2.45-50>
- Aparna, Y., Banafsha, S. H., & Reddy, M. S. (2024). Monoculture and Mixed Culture of Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei* and Tiger Shrimp *Penaeus monodon* in Biofloc System: A Comparative Study. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 26(3), 87–106. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2024/v26i3749>
- Barraza-guardado, H. R., Arreola-lizárraga, López-torres, J. A., A, M., Casillas-hernández, R., Miranda-baeza, A., Magallón-barrajas, F., & Ibarra-gámez, C. (2013). Effluents of Shrimp Farms and Its Influence on the Coastal Ecosystems of Bahía de Kino , Mexico. *The Scientific World Journal*, 2013, 1–8.
- Brito, L. O., Cardoso Junior, L. de O., Lavander, H. D., Abreu, J. L. de, Severi, W., & Gálvez, A. O. (2018). Bioremediation of Shrimp Biofloc Wastewater Using Clam, Seaweed And Fish. *Chemistry and Ecology*, 34(10), 901–913. <https://doi.org/10.1080/02757540.2018.1520843>
- Chamberlain, J., Fernandes, T.F., Read, P., Nickel, T.D., & Davies, I.M. (2001). Impacts of Biodeposits from Suspended Mussel (*Mytilus edulis* L.) Culture on the Surrounding Surficial Sediments. *ICES Journal of Marine Science*. 580(101): 411-416. <http://dx.doi.org/10.1006/jmsc.2000.1037>
- Dauda, A. B., Ajadi, A., Tola-Fabunmi, A. S., & Akinwale, A. O. (2019). Waste Production in Aquaculture: Sources, Components And Managements in Different Culture Systems. *Aquaculture and Fisheries*, 4(3), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.10.002>
- FAO. (2019). The State of World Fisheries and Aquaculture 2018-Meeting Sustainable Development Goals. In *Rome. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO* (Vol.61, Issue 1). <https://doi.org/10.6024/jmbai.2019.61.1.2053-01>
- Fillippini, G., Dafforn, K.A., & Bugnot, A.B. (2023). Shellfish as a Bioremediation Tool: A review and Meta-Analysis. *Environmental Pollutant*, 316(2), 120614. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120614>
- Fitriani, N., Ni'matuzahroh, O'Marga, T. T. N., Mohamed, R. M. S. R., Wahyudianto, F. E., Imron, M. F., Isnadina, D. R. M., & Soedjono, E. S. (2022). Optimization



of Slow Sand Filtration for the Raw Municipal Wastewater Treatment by Using the Blood Cockle (*Anadara granosa*) Shell as an Alternative Filter Media through the Response Surface Methodology. *Journal of Ecological Engineering*, 23(6), 100–111. <https://doi.org/10.12911/22998993/147833>

- Gonzalez, S. V., Johnston, E., Gribben, P. E., & Dafforn, K. (2019). The Application Of Bioturbators for Aquatic Bioremediation: Review and Meta-Analysis. *Environmental Pollution*, 250, 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.023>
- Gosling, E. (2003). Bivalve Molluscs : Biology, Ecology and Culture. In *Fishing News Books* (Vol. 01). Fishing News Books.
- Gosling, E. (2015). Marine Bivalve Molluscs. In *John Wiley & Sons, Ltd* (Third Edit). <https://doi.org/10.1002/9781119045212>
- Haeruddin, Suprpto, D., & Rudiyaniti, S. (2017). Analisis Mutu Sedimen Habitat Kerang Darah (*Anadara granosa*) dengan Reburial Test. *Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology*, 12(2), 81–85. <https://doi.org/10.14710/ijfst.12.2.81-85>
- Han, S. yin, Wang, M. qiang, Wang, B. jie, Liu, M., Jiang, K. yong, & Wang, L. (2018). A Comparative Study on Oxidative Stress Response in The Hepatopancreas and Midgut of the White Shrimp *Litopenaeus Vannamei* Under Gradual Changes to Low or High ph Environment. *Fish and Shellfish Immunology*, 76(December 2017), 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.02.001>
- Hills, A., Pouil, S., Hua, D., & Mathews, T. J. (2020). Clearance Rates of Freshwater Bivalves Corbicula Fluminea and Utterbackia Imbecillis in the Presence and Absence of Light. *Aquatic Ecology*, 54(4), 1059–1066. <https://doi.org/10.1007/s10452-020-09793-7>
- Jegatheesan, V., Shu, L., & Visvanathan, C. (2011). Aquaculture Effluent: Impacts and Remedies for Protecting the Environment and Human Health. *Encyclopedia of Environmental Health*, 123–135. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00340-8>
- Keerio, H. A., & Bae, W. (2020). Experimental Investigation of Substrate Shock and Environmental Ammonium Concentration on the Stability of Ammonia-Oxidizing Bacteria (AOB). *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010223>
- Koo, B. J., & Seo, J. (2020). Filtration Rates of the Manila Clam (*Ruditapes Philppinarum*), in Tidal Flats with Different Hydrographic Regimes. *PLoS ONE*, 15(2), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228873>
- Kusumawati, L.A., Haeruddin, & Suprpto, D. (2015). Filtration Rate Kerang Darah dan Kerang Hijau dalam Memfiltrasi Bahan Organik Tersuspensi Limbah Tambak Udang Intensif. *Diponegoro Journal of Maquares*, 4(1), 131–137. <https://doi.org/10.14710/marj.v4i1.7824>
- Lukwambe, B., Nicholaus, R., Yang, W., & Zheng, Z. (2020). Blood Clams (*Tegillarca granosa*) Bioturbation Alter Succession of Bacterioplankton Community and Nutrient Removal Performance in an Aquaculture Wastewater Bioremediation System. *Aquaculture*, 516, 734520. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734520>



- Lukwambe, B., Yang, W., Zheng, Y., Nicholas, R., Zhu, J., & Zheng, Z. (2018). Bioturbation by the Razor Clam (*Sinonovacula constricta*) on the Microbial Community and Enzymatic Activities in the Sediment of an Ecological Aquaculture Wastewater Treatment System. *Science of the Total Environment*, 643(818), 1098–1107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.251>
- Ma, Y., Hu, A., Yu, C. P., Yan, Q., Yan, X., Wang, Y., Deng, F., & Xiong, H. (2015). Response of Microbial Communities to Bioturbation by Artificially Introducing macrobenthos to Mudflat Sediments for in situ Bioremediation in a Typical Semi-Enclosed Bay, Southeast China. *Marine Pollution Bulletin*, 94(1–2), 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.03.003>
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C. J., Heinsbroek, L. T. N., Schneider, O., Blancheton, J. P., d'Orbcastel, E. R., & Verreth, J. A. J. (2010). New Developments in Recirculating Aquaculture Systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>
- Medler, S. (1998). *Comparative Structure and Function of Intrinsic Gill Muscles in Freshwater Bivalve Molluscs*. LSU Historical Dissertations and Theses. 6689. https://doi.org/10.31390/gradschool_disstheses.6689
- Meseck, S. L., Sennefelder, G., Krisak, M., & Wikfors, G. H. (2020). Physiological Feeding Rates and Cilia Suppression in Blue Mussels (*Mytilus edulis*) with Increased Levels of Dissolved Carbon Dioxide. *Ecological Indicators*, 117(April), 106675. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106675>
- Mirsadeghi, S. A., Zakaria, M. P., Yap, C. K., & Gobas, F. (2013). Evaluation of the Potential Bioaccumulation Ability of the Blood Cockle (*Anadara granosa* L.) for Assessment of Environmental Matrices Of Mudflats. *Science of the Total Environment*, 454–455, 584–597. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.001>
- Muchtar, M., Farkan, M., & Mulyono, M. (2021). Productivity of Vannamei Shrimp Cultivation (*Litopenaeus vannamei*) in Intensive Ponds in Tegal City, Central Java Province. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 10(2), 147. <https://doi.org/10.20473/jafh.v10i2.18565>
- Nicholaus, R., Lukwambe, B., Zhao, L., Yang, W., Zhu, J., & Zheng, Z. (2019). Bioturbation of Blood Clam *Tegillarca granosa* on Benthic Nutrient Fluxes and Microbial Community in an Aquaculture Wastewater Treatment System. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 142(818), 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.004>
- Nuramira Syahira, S., Nithiyaa, N., Nooraini, I., & Aileen Tan, S. H. (2021). Preliminary Study on the Growth Development of Blood Cockle (*Tegillarca granosa*) by Using Different Substrates in the hatchery system. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 7(2), 71–78. <https://doi.org/10.18331/SFS2021.7.2.6>
- Pędziwiatr, P., Zawadzki, D., & Michalska, K. (2017). Aquaculture waste management. *Acta Innovations*, 22, 20–29. https://www.researchgate.net/publication/345177282_AQUACULTURE_WASTE_MANAGEMENT



- Pouil, S., Hills, A., & Mathews, T. J. (2021). The Effects of Food Quantity, Light, and Temperature on Clearance Rates in Freshwater Bivalves (*Cyrenidae* and *Unionidae*). *Hydrobiologia*, 848(3), 675–689. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04472-y>
- Rajta, A., Bhatia, R., Setia, H., & Pathania, P. (2020). Role of Heterotrophic Aerobic Denitrifying Bacteria in Nitrate Removal from Wastewater. *Journal of Applied Microbiology*, 128(5), 1261–1278. <https://doi.org/10.1111/jam.14476>.
- Ramli, M. F. S. bin, Hassan, F. R. bin A., & Rmachandran, P. (2014). Cockle (*Anadara granosa*) Tolerance to Ammonia Exposed to Various Concentrations. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(6), 43–47. <https://doi.org/10.9790/2402-08614347>
- Renitasari, D. P., Ihwan, I., & Syahrir, M. (2023). Minimaliser limbah N danP tambak udang vaname dengan memanfaatkan biofilter kerang darah (*Anadara granosa*). *Sains Akuakultur Tropis : Indonesian Journal of Tropical Aquaculture*, 7(1), 139–145. <https://doi.org/10.14710/sat.v7i1.17237>
- Renitasari, D. P., & Musa, M. (2020). Water Quality Management in The Intensive Culture of *Litopenaeus vannamei* with Hybrid System Method. *Jurnal Salamata*, 2(1), 7–12. <https://journal.poltekkpbone.ac.id/index.php/jsalamata/article/view/16>
- Retnosari, D., Rejeki, S., Susilowati, T., & Ariyati, R. W. (2020). Laju Filtrasi Bahan Organik oleh Kerang Hijau (*Perna viridis*) Sebagai Biofilter Serta Dampaknya Terhadap Pertumbuhan dan Kelulushidupan Udang Windu (*Penaeus monodon*). *Junal Sains Akuakultur Tropis*, 4(November 2018), 36–46. <https://core.ac.uk/download/pdf/304915044.pdf>
- Riisgård, H. U. (2001). On Measurement of Filtration Rates in Bivalves - The Stony Road to Reliable Data: Review and Interpretation. *Marine Ecology Progress Series*, 211(March), 275–291. <https://doi.org/10.3354/meps211275>
- Rong, Y., Tang, Y., Ren, L., Taylor, W. D., Razlutskiy, V., Naselli-Flores, L., Liu, Z., & Zhang, X. (2021). Effects of the Filter-Feeding Benthic Bivalve *Corbicula fluminea* on Plankton Community and Water Quality in Aquatic Ecosystems: A Mesocosm study. *Water (Switzerland)*, 13(13), 1–12. <https://doi.org/10.3390/w13131827>
- Rosa, M., Ward, J. E., & Shumway, S. E. (2018). Selective Capture and Ingestion of Particles by Suspension-Feeding Bivalve Molluscs: A Review. *Journal of Shellfish Research*, 37(4), 727–746. <https://doi.org/10.2983/035.037.0405>
- Singh, D. P., Saraswat, R., & Nigam, R. (2021). Untangling The Effect of Organic Matter and Dissolved Oxygen on Living Benthic *Foraminifera* in The Southeastern Arabian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 172(March), 112883. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112883>
- Soaudy, M.R, Ghonimy, A., Greco, L.S.L., Chen, S., Dyzenchouz, A., & Li, J. (2023). Total Suspended Solids and Their Impact in a Biofloc System: Current and Potentially New Management Strategies. *Aquaculture*, Vol 572. 739524. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739524>
- Suwoyo, H. S., & Hendrajat, E. A. (2021). High Density Aquaculture of White Shrimp



- (*Litopenaeus vannamei*) in Controlled Tank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 777(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/777/1/012022>
- Syah, R., Makmur, M., & Undu, M. C. (2014). Estimasi Beban Limbah Nutrien Pakan dan Daya Dukung Kawasan Pesisir Untuk Tambak Udang Vaname Superintensif. *Jurnal Riset Akuakultur*, 9(3), 439. <https://doi.org/10.15578/jra.9.3.2014.439-448>
- Syahrir, M., Renitasari, D. P., Ihwan, & Saridu, S. A. (2021). Bioremediation of Organic Waste Matter in White Legs Shrimp Ponds Using Blood Shells (*Anadara granosa*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 860(1), 012097. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/860/1/012097>
- Tampangallo, B. R., Idra Jaya Asaad, A., Undu, M. C., Khairana Kadriah, I. A., & Anshary, H. (2020). Bacterial Diversity In Superintensive Vanname Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Plants in Barru and Takalar Regencies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 564(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/564/1/012007>
- Tangguda, S., Arfiati, D., & Ekawati, A. W. (2015). Karakterisasi Limbah Padat Tambak Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) untuk Kultur Murni *Chlorella sp.* *Proceedings Seminar Nasional FMIPA UNDIKSHA V*, 381–386. <https://ejournal.undiksha.ac.id/index.php/semnasmipa/article/view/10310>
- Tangguda, S., & Suryanti, I. A. P. (2017). Pengaruh Limbah Cair Tambak Udang Terhadap Kepadatan Sel dan Laju Pertumbuhan Spesifik *Chlorella sp.* *Seminar Nasional Riset Inovatif. UNDIKSHA*, 171–176.
- Tu, C., Jin, Z., Che, F., Cao, X., Song, X., Lu, C., & Huang, W. (2022). Characterization of phosphorus Sorption and Microbial Community in Lake Sediments During Overwinter and Recruitment Periods of Cyanobacteria. *Chemosphere*.307(1).135777.<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135777>
- Vinothkumar, R., Dar, J. Y., Bharti, V. S., Singh, A., Vennila, A., Bhat, I. A., & Pandey, P. K. (2021). Heterotrophic Nitrifying and Aerobic Denitrifying Bacteria: Characterization and Comparison of Shrimp Pond and Effluent Discharge Channel in Aspects of Composition and Function. *Aquaculture*, 539(March), 736659. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736659>
- Wong, W. H., & Cheung, S. G. (2001). Feeding Rhythms Of The Green-Lipped Mussel, *Perna Viridis* (Linnaeus, 1758) (Bivalvia: *Mytilidae*) During Spring and Neap Tidal Cycles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 257(1), 13–36. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(00\)00327-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(00)00327-0)
- Wright, C. L., & Lehtovirta-Morley, L. E. (2023). Nitrification and Beyond: Metabolic Versatility of Ammonia Oxidising Archaea. *ISME Journal*, 17(9), 1358–1368. <https://doi.org/10.1038/s41396-023-01467-0>
- Wulandari, W., Cokrowati, N., Astriana, B. H., & Diniarti, N. (2019). Penurunan Nilai Padatan Tersuspensi pada Limbah Tambak Udang Intensif Menggunakan Kerang Darah (*Anadara granosa*). *Jurnal Kelautan*, 12(2), 123–130. <https://doi.org/10.21107/jk.v12i2.6346>



Yoshikawa, T., Kanemata, K., Nakase, G., & Eguchi, M. (2012). Microbial Mineralization of Organic Matter in Sinking Particles, Bottom Sediments and Seawater in a Coastal Fish Culturing Area. *Aquaculture Research*, 43(12), 1741–1755. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02978.x>

Zhan, Y., ZHa, S., Peng, Z., Lin, Z., & Bao, Y. (2022). *Hypoxia-mediated Immunotoxicity in the Blood Clam (Tegillarca granosa)*. *Marine Environmental Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105632>