JIP
Jurnal Ilmiah PLATAX
Universitas Sam Ratulangi
Terakreditasi Ristekdikti No: 28/E/KPT/2019
ISSN : 2302-3589 (Online)
E_mail : jip_platax@unsrat.ac.id

The Potential of *Kappaphycus alvarezii* as a Phytoremediator in Tilapia Aquaculture: Potential, Challenges, and an Integrated Approach

(Potensi *Kappaphycus alvarezii* Sebagai Fitoremediator dalam Akuakultur Ikan Nila: Potensi, Tantangan, dan Pendekatan Terpadu)

Wilmy E. Pelle, Grevo S. Gerung, Joshian N. W. Schaduw, Adnan S. Wantasen, Edwin L. A. Ngangi, Joppy D. Mudeng

Aquatic Resource's Management, Faculty of Fisheries and Marine Science, Sam Ratulangi University. Manado. Indonesia

**Corresponding author: wilmypelle@unsrat.ac.id*

Manuscript received: 19 April. 2026. Revision accepted: 27 June 2026

Abstract. Aquaculture is now the backbone of global food security, but is plagued by sustainability challenges due to nutrient waste and environmental degradation. The red seaweed Kappaphycus alvarezii, thanks to its ability to efficiently absorb ammonia, nitrate, and phosphate, offers an ecologically sound solution through integration into a tilapia (Oreochromis niloticus)-based Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) system. This study reviews the potential for phytoremediation, its technical benefits, and its economic feasibility. Results indicate improved water quality, reduced water exchange requirements, and improved fish health. Furthermore, K. alvarezii offers opportunities for diversification into valuable products such as carrageenan and agricultural biostimulants. However, implementation faces significant challenges such as salinity incompatibility, "ice-ice" disease, epiphytes, and the need for efficient post-harvest management. A feasibility analysis indicates that scale and efficiency are crucial for economic success. Strategic recommendations include the development of tolerant varieties, biomass ratio optimization, and policy support for environmental incentives. With a cross-sectoral approach, K. alvarezii has significant potential to drive the transformation of tilapia aquaculture towards a more circular and sustainable future.

Keywords: Kappaphycus alvarezii; tilapia; phytoremediation; IMTA; aquaculture sustainability

Abstrak. Aquakultur kini menjadi tulang punggung ketahanan pangan global, namun dibayangi oleh tantangan keberlanjutan akibat limbah nutrien dan degradasi lingkungan. Rumput laut merah Kappaphycus alvarezii, berkat kemampuannya menyerap amonia, nitrat, dan fosfat secara efisien, menawarkan solusi berbasis ekologi melalui integrasi dalam sistem Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) berbasis ikan nila (Oreochromis niloticus). Studi ini meninjau potensi fitoremediasi, manfaat teknis, serta kelayakan ekonomi dari integrasi tersebut. Hasil menunjukkan peningkatan kualitas air, pengurangan kebutuhan pergantian air, serta perbaikan kesehatan ikan. Selain itu, K. alvarezii memberikan peluang diversifikasi produk bernilai seperti karagenan dan biostimulan pertanian. Namun, implementasi dihadapkan pada tantangan signifikan seperti ketidaksesuaian salinitas, penyakit "ice-ice", epifit, serta kebutuhan pascapanen yang efisien. Analisis kelayakan menunjukkan bahwa skala dan efisiensi sangat menentukan keberhasilan ekonomi. Rekomendasi strategis mencakup pengembangan varietas toleran, optimasi rasio biomassa, serta dukungan kebijakan insentif lingkungan. Dengan pendekatan lintas sektor, *K. alvarezii* berpotensi besar sebagai penggerak transformasi akuakultur nila yang lebih sirkular dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Kappaphycus alvarezii; ikan nila; fitotoremediasi; IMTA; keberlanjutan akuakultur

PENDAHULUAN

Budidaya perikanan air tawar/payau, khususnya ikan nila (*Oreochromis niloticus*), memainkan peran penting dalam ketahanan pangan global dan perekonomian masyarakat pesisir serta pedesaan. Namun, peningkatan intensitas budidaya telah menimbulkan tantangan serius, seperti penurunan kualitas air, eutrofikasi, dan ketergantungan tinggi pada pergantian air, yang berdampak pada biaya produksi dan keberlanjutan ekosistem lokal [1][2]. Inovasi sistem terintegrasi yang menggabungkan komponen autotrofik dan heterotrofik menjadi pendekatan baru yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Salah satu pendekatan yang tengah berkembang adalah sistem Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA), yang mengintegrasikan organisme dari tingkat trofik berbeda dalam satu sistem budidaya. IMTA memungkinkan organisme seperti rumput laut untuk menyerap limbah nutrien dari aktivitas metabolik ikan, sehingga

meningkatkan efisiensi siklus nutrien dan memperbaiki kualitas lingkungan perairan [3].

Rumput laut merah *Kappaphycus alvarezii*, yang secara ekonomi penting karena kandungan karagenannya, memiliki kemampuan biofilter alami yang tinggi terhadap nutrien seperti amonia, nitrat, dan fosfat [4]. Integrasi K. alvarezii ke dalam sistem budidaya ikan nila tidak hanya menawarkan solusi ekologis, tetapi juga membuka peluang ekonomi baru melalui diversifikasi hasil panen [5].

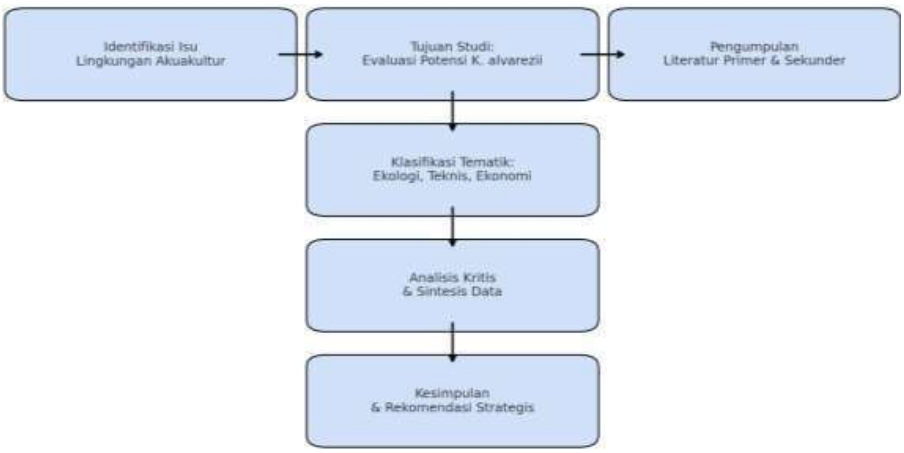
Meskipun banyak potensi yang ditawarkan, hingga kini belum ada kajian menyeluruh yang mengulas secara komprehensif potensi, tantangan, dan kelayakan integrasi *K. alvarezii* dalam budidaya ikan nila berbasis IMTA. Oleh karena itu, studi ini disusun untuk menjawab kesenjangan tersebut melalui tinjauan pustaka sistematis, dengan fokus pada aspek ekologi, teknis, dan ekonomi.

METODE

Studi ini merupakan kajian pustaka (research review) yang dirancang untuk mengidentifikasi, mengklasifikasi, dan mensintesis temuan dari berbagai sumber primer dan sekunder mengenai integrasi *Kappaphycus alvarezii* dalam sistem IMTA ikan nila. Proses review mencakup enam tahap utama:

- Identifikasi isu: Eksplorasi permasalahan lingkungan dan keberlanjutan dalam budidaya ikan nila intensif.
- Penetapan tujuan studi: Menilai potensi dan tantangan K. alvarezii dalam IMTA.
- Pengumpulan literatur: Menggunakan database seperti Scopus, Google Scholar, dan jurnal nasional terakreditasi.
- Klasifikasi tematik: Literatur dikategorikan ke dalam tiga tema utama: ekologi (fitoremediasi dan kualitas air), teknis (interaksi dan manajemen sistem), dan ekonomi (biaya, hasil, dan nilai tambah).
- Analisis dan sintesis: Data dianalisis secara kualitatif melalui komparasi dan pemetaan hubungan antarvariabel.
- Formulasi kesimpulan dan rekomendasi: Disusun berdasarkan hasil sintesis tematik dan implikasi praktisnya.

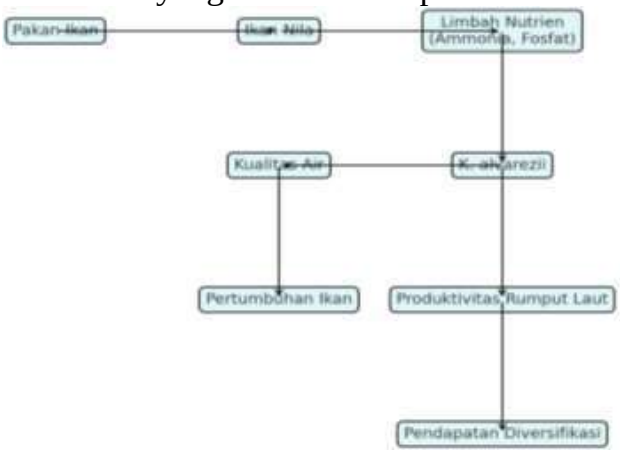
Flowchart metodologi lengkap ditampilkan pada Gambar 6. Kajian ini mengacu pada prinsip transparansi sumber, triangulasi data, serta analisis kritis terhadap keterbatasan metodologis studi terdahulu.



HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi Phytoremediasi dan Perbaikan Kualitas Air

Integrasi *Kappaphycus alvarezii* dalam sistem budidaya ikan nila (Gambar 1) memberikan kontribusi penting terhadap upaya fitoremediasi lingkungan perairan. Rumput laut ini telah terbukti mampu menyerap senyawa nitrogen anorganik seperti amonia (NH_4^+), nitrit (NO_2^-), nitrat (NO_3^-), serta fosfat (PO_4^{3-}) dari media budidaya. Dalam sebuah studi yang dilakukan oleh Maruyama et al., efisiensi penyerapan mencapai lebih dari 70% untuk TAN (total ammonia nitrogen), 18.2% untuk nitrat, dan 26.8% untuk fosfat [1]. Hal ini menjadikan K. alvarezii sebagai kandidat ideal dalam mengurangi residu nutrien yang biasa menumpuk di sistem akuakultur intensif.



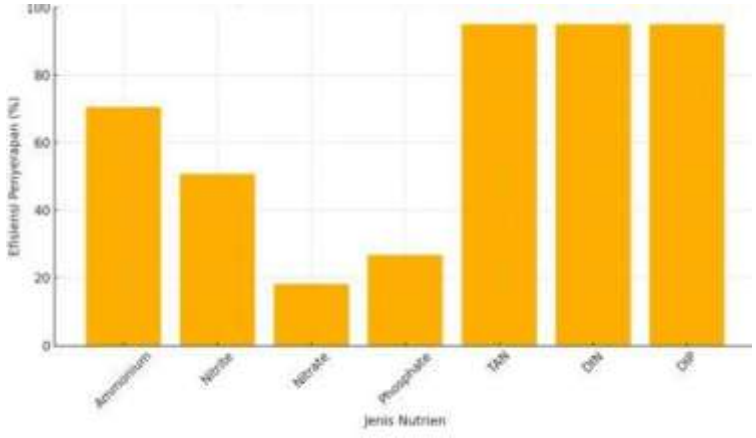
Gambar 1 Sistem Integrasi rumput laut dan ikan nila

Mekanisme penyerapan nutrien oleh *K. alvarezii* tidak hanya bersifat pasif, melainkan juga melibatkan serangkaian proses fisiologis yang dipengaruhi oleh intensitas cahaya, salinitas, dan ketersediaan karbon. Dalam kondisi optimal, alga ini menunjukkan pertumbuhan eksponensial yang paralel dengan kemampuannya menyerap nutrien, menciptakan hubungan sinergis antara peningkatan biomassa dan remediasi lingkungan [6].

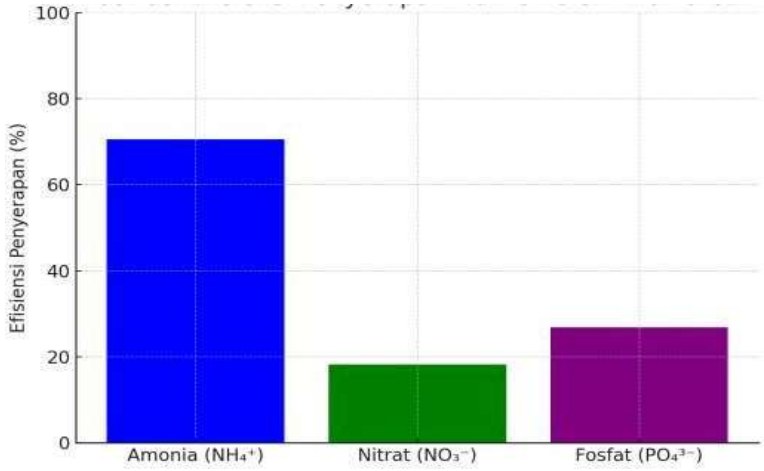
Penurunan konsentrasi nitrogen dan fosfat di dalam air budidaya tidak hanya mengurangi risiko eutrofikasi, tetapi juga menstabilkan parameter kualitas air seperti pH dan oksigen terlarut. Sebuah pengamatan lapangan menunjukkan bahwa kolam IMTA yang dilengkapi dengan K. alvarezii mengalami fluktuasi pH yang lebih stabil dan kadar amonia yang lebih rendah dibandingkan sistem konvensional [7].

Lebih lanjut, kontribusi *K. alvarezii* terhadap perbaikan kualitas air terlihat pada penurunan kebutuhan pergantian air. Dalam skenario budidaya konvensional, frekuensi pergantian air sering kali mencapai dua hingga tiga kali seminggu untuk menjaga kualitas air. Namun, pada sistem IMTA yang mengintegrasikan *K. alvarezii*, frekuensi ini dapat dikurangi hingga satu kali seminggu atau bahkan lebih jarang tanpa mengorbankan kesehatan ikan [9].

Efisiensi tersebut berimplikasi langsung pada penghematan biaya operasional, pengurangan emisi karbon akibat penggunaan pompa air, serta konservasi sumber daya air, menjadikan sistem IMTA sebagai pendekatan yang sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan. Ini sekaligus memperkuat argumen bahwa *K. alvarezii* bukan hanya komoditas ekonomi, tetapi juga agen ekologis dalam sistem budidaya terintegrasi [22].



Gambar 2 Efisiensi penyerapan nutrien oleh *K. alvarezii* dalam sistem IMTA



Gambar 3 Ilustrasi efisiensi penyerapan nutrien oleh *K. alvarezii*

Secara visual, Gambar 2 dan Gambar 3 memperlihatkan secara jelas tingkat efisiensi penyerapan nutrien utama oleh *K. alvarezii*. Grafik ini menegaskan bahwa potensi biofilter alga ini dapat dimanfaatkan secara maksimal bila disesuaikan dengan rasio biomassa dan beban nutrien yang tepat dalam sistem IMTA ikan nila [33][36].

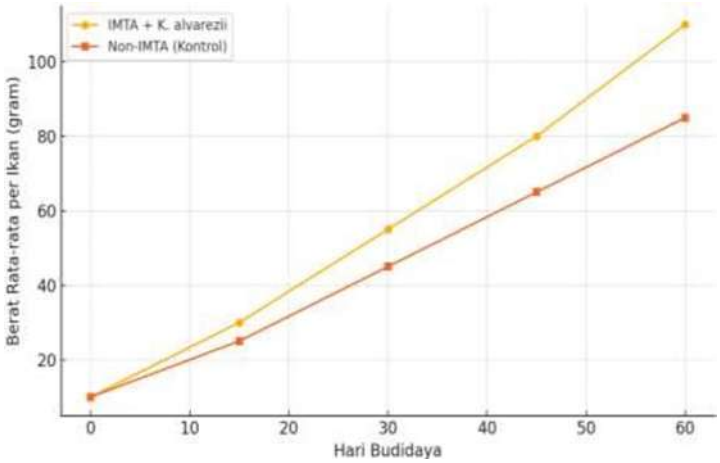
Peningkatan Kesehatan Ikan dan Efisiensi Pertumbuhan

Salah satu manfaat utama dari penerapan sistem IMTA dengan *Kappaphycus alvarezii* adalah peningkatan kondisi fisiologis dan pertumbuhan ikan nila. Perbaikan kualitas air akibat penyerapan nutrien oleh rumput laut menyebabkan lingkungan budidaya yang lebih stabil dan minim stres bagi ikan. Dalam beberapa penelitian, kadar stres fisiologis seperti kortisol dan perubahan hematologi pada ikan nila lebih rendah ketika dipelihara dalam sistem IMTA dibandingkan sistem monokultur [11][12].

Kualitas air yang lebih baik juga berkorelasi positif dengan laju pertumbuhan ikan. Berdasarkan hasil pengamatan dalam budidaya bersama *K. alvarezii*, ikan nila menunjukkan pertambahan bobot harian yang lebih tinggi dan rasio konversi pakan (FCR) yang lebih efisien. Penelitian Maruyama et al. melaporkan peningkatan pertumbuhan hingga 15% dibandingkan kontrol non-IMTA, yang dikaitkan dengan kadar amonia yang lebih rendah dan kestabilan suhu serta pH [1][13].

Aspek lain yang turut berperan adalah penurunan beban patogen dalam air. Kehadiran *K. alvarezii* yang berfungsi sebagai biofilter juga diyakini berkontribusi dalam

menekan populasi mikroorganisme patogen, baik secara langsung melalui perubahan parameter lingkungan maupun tidak langsung melalui pengurangan senyawa limbah organik [14].



Gambar 4 Ilustrasi pertumbuhan ikan Nila dalam Sistem IMTA vs Non- IMTA

Grafik pertumbuhan ikan dalam Gambar 4 memperlihatkan laju pertumbuhan harian ikan nila dalam sistem IMTA dibandingkan sistem kontrol. Selisih bobot rata-rata mulai tampak signifikan sejak hari ke-30 dan terus berlanjut hingga akhir masa budidaya. Hal ini menunjukkan bahwa manfaat sistem IMTA tidak bersifat sesaat, melainkan berkelanjutan selama fase pemeliharaan [15].

Peningkatan efisiensi pakan juga merupakan kontribusi penting dari sistem IMTA. Dalam lingkungan yang lebih stabil, ikan cenderung makan lebih aktif dan memiliki sistem metabolisme yang lebih efisien. Ini tercermin dari nilai FCR yang lebih rendah, yang berarti lebih banyak bobot tubuh ikan dihasilkan dari jumlah pakan yang sama [16]. Efisiensi ini pada akhirnya berdampak pada penurunan biaya pakan—komponen biaya terbesar dalam budidaya ikan.

Dengan demikian, integrasi *K. alvarezii* tidak hanya memperbaiki kondisi ekologis, tetapi juga memberikan dampak langsung terhadap performa pertumbuhan dan kesehatan ikan nila. Intervensi ini tidak bersifat substitutif terhadap strategi pengelolaan lainnya, melainkan komplementer, sehingga dapat dikombinasikan dengan penerapan probiotik, manajemen pakan presisi, dan rekayasa desain kolam budidaya [18][19].

Tantangan Implementasi di Lapangan

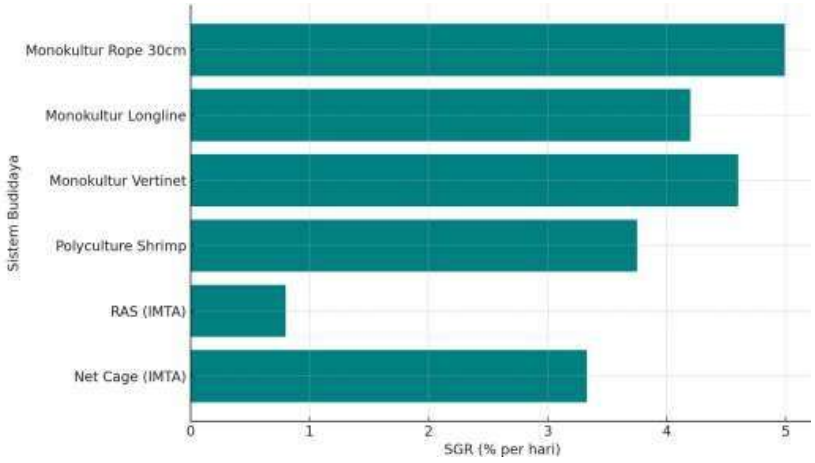
Meskipun integrasi *Kappaphycus alvarezii* dalam sistem IMTA ikan nila menjanjikan berbagai manfaat ekologis dan ekonomi, penerapannya di lapangan menghadapi tantangan teknis dan biologis yang kompleks. Salah satu kendala utama adalah ketidaksesuaian salinitas antara kebutuhan *K. alvarezii* yang optimal pada 28–33 ppt dengan toleransi ikan nila yang terbatas di kisaran 0–15 ppt. Ini menuntut rekayasa sistem atau penggunaan varietas rumput laut yang lebih toleran terhadap salinitas rendah [23][24].

Selain salinitas, tantangan biologis lain adalah kerentanan *K. alvarezii* terhadap penyakit "ice-ice" dan infestasi epifit. Kedua faktor ini sering menyebabkan kerusakan jaringan, penurunan laju pertumbuhan, dan penurunan kualitas karagenan. Kondisi ini diperparah oleh fluktuasi suhu, pencemaran perairan, dan kurangnya praktik manajemen budidaya yang adaptif [25][26].

Dari sisi teknis, pemilihan desain rak atau media tanam rumput laut menjadi penting. Sistem vertikal maupun horizontal memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing dalam hal sirkulasi air, paparan cahaya, dan kemudahan panen. Penempatan yang tidak optimal dapat mengurangi efisiensi penyerapan nutrien dan menyebabkan kompetisi ruang dengan ikan nila [27].

Di sisi logistik, proses pascapanen *K. alvarezii* membutuhkan pengeringan dan penanganan cepat agar kualitas karagenan tetap terjaga. Pada skala kecil, keterbatasan alat dan tenaga kerja menyebabkan penurunan mutu produk dan tingginya biaya produksi. Hal ini menjadi hambatan bagi pembudidaya kecil untuk memperoleh keuntungan optimal [28][29].

Tantangan lainnya terletak pada aspek kelembagaan dan regulasi. Belum adanya panduan teknis standar untuk sistem IMTA menyebabkan variasi dalam praktik budidaya dan sulitnya mendapatkan dukungan pembiayaan. Minimnya pelatihan dan pendampingan teknis juga menghambat adopsi oleh pembudidaya skala kecil-menengah, yang justru menjadi segmen utama dalam perikanan Indonesia [30].
Dengan demikian, keberhasilan implementasi sistem IMTA dengan *K. alvarezii* sangat bergantung pada pendekatan multidisipliner, mulai dari seleksi varietas unggul, desain sistem adaptif (Gambar 5), peningkatan kapasitas petani, hingga penyusunan kebijakan insentif dan dukungan riset terapan secara berkelanjutan [31][32].

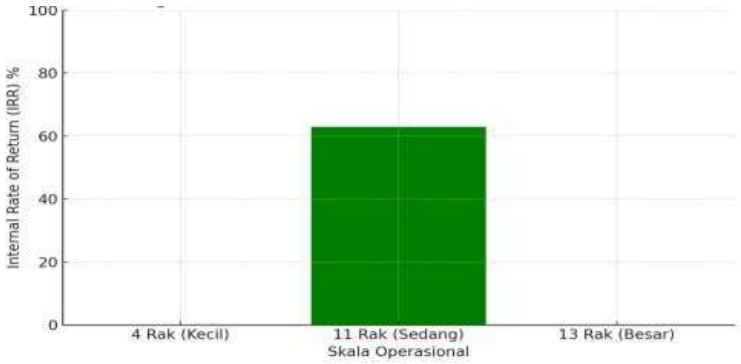


Gambar 5 Perbandingan laju pertumbuhan harian *K. alvarezii* di berbagai sistem budidaya

Analisis Kelayakan Ekonomi dan Skala Usaha

Selain manfaat ekologis dan teknis, kelayakan ekonomi merupakan aspek krusial dalam adopsi sistem IMTA berbasis *K. alvarezii*. Beberapa kajian menunjukkan bahwa integrasi ini dapat meningkatkan total penerimaan pembudidaya melalui dua jalur: peningkatan efisiensi budidaya ikan dan diversifikasi produk dari panen rumput laut [37].

Perhitungan finansial berbasis model aliran kas menunjukkan bahwa pada skala 60 rak rumput laut, sistem IMTA menghasilkan Internal Rate of Return (IRR) sebesar 31.6% dan Benefit-Cost Ratio (B/C) sebesar 1.49, yang menunjukkan profitabilitas usaha pada kisaran layak investasi [38]. Grafik perbandingan antara skala usaha dan IRR dapat dilihat pada Gambar , yang menegaskan bahwa keuntungan meningkat secara non-linier seiring bertambahnya jumlah rak.



Gambar 6 Hubungan antara skala produksi dan IRR *K. alvarezii* (IMTA)

Namun demikian, batas minimal kelayakan ekonomi perlu diperhatikan. Kajian dari Dungani et al. menunjukkan bahwa sistem IMTA skala kecil (<40 rak) cenderung memiliki margin keuntungan yang tipis karena biaya tetap seperti tenaga kerja dan alat panen tidak sebanding dengan volume hasil panen [39]. Oleh karena itu, sistem ini lebih menguntungkan jika diterapkan secara kolektif atau melalui skema koperasi.

Dari sisi produk, *K. alvarezii* memiliki nilai tambah tinggi karena dapat diolah menjadi karagenan, pupuk cair organik, maupun bahan baku kosmetik. Pengembangan pasar untuk produk turunan ini menjadi peluang strategis dalam memperluas margin keuntungan dan meningkatkan daya saing produk lokal [40]. Hal ini juga mendukung diversifikasi pendapatan petani, sehingga menurunkan risiko usaha yang selama ini tergantung pada fluktuasi harga ikan.

Kelebihan lainnya adalah biaya operasional yang relatif stabil. Karena mengurangi frekuensi pergantian air, kebutuhan bahan bakar untuk pompa dan peralatan mekanis dapat ditekan. Selain itu, biaya pakan dapat dikurangi karena konversi pakan yang lebih efisien akibat lingkungan budidaya yang stabil [41].

Keseluruhan analisis ini menunjukkan bahwa sistem IMTA berbasis *K. alvarezii* dan ikan nila tidak hanya layak secara teknis dan ekologis, tetapi juga secara finansial, terutama jika dikelola dengan skala menengah ke atas dan dikombinasikan dengan pendekatan nilai tambah pascapanen. Ini membuka ruang inovasi untuk koperasi petani, UMKM berbasis laut, maupun program CSR industri akuakultur berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kajian ini menegaskan bahwa Kappaphycus alvarezii memiliki potensi luar biasa dalam mendukung keberlanjutan budidaya ikan nila melalui sistem Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). Dari sisi ekologi, kemampuannya menyerap amonia, nitrat, dan fosfat memberikan solusi efektif terhadap pencemaran nutrien dan degradasi kualitas air. Secara teknis, sistem ini terbukti meningkatkan pertumbuhan ikan, efisiensi pakan, dan menstabilkan lingkungan perairan. Sementara itu, dari perspektif ekonomi, sistem IMTA mampu memberikan keuntungan yang kompetitif, terutama jika dijalankan dalam skala menengah hingga besar dan didukung oleh pasar produk turunan yang solid.

Namun, tantangan signifikan tetap harus diatasi, terutama terkait ketidaksesuaian salinitas, penyakit epifit, dan kebutuhan pengolahan pascapanen yang efisien. Selain itu, keberhasilan implementasi sangat dipengaruhi oleh desain sistem, ketersediaan pelatihan teknis, dan insentif kebijakan yang mendukung praktik akuakultur berkelanjutan.

Berdasarkan hasil kajian, beberapa rekomendasi strategis yang dapat diajukan antara lain:

- Pengembangan varietas toleran salinitas rendah untuk meningkatkan kompatibilitas dengan sistem air tawar.
- Optimasi rasio biomassa ikan dan rumput laut untuk meningkatkan efisiensi penyerapan nutrien.
- Penyusunan standar teknis nasional untuk IMTA yang mencakup desain, manajemen panen, dan pemrosesan hasil.
- Peningkatan akses pelatihan dan pembiayaan bagi pembudidaya kecil melalui kemitraan, koperasi, dan CSR sektor swasta.
- Diversifikasi produk turunan *K. alvarezii* untuk meningkatkan nilai tambah dan daya saing pasar.

Dengan pendekatan terpadu yang melibatkan aspek ekologi, teknis, dan sosial-ekonomi, sistem IMTA berbasis *K. alvarezii* dapat menjadi tonggak penting dalam mewujudkan budidaya ikan nila yang sirkular, resilien, dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan penuh rasa terima kasih atas pendanaan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Sam Ratulangi, Manado, Sulawesi Utara, Indonesia.

REFERENCES

1) Maruyama, T., et al. "Integration of Seaweed Kappaphycus alvarezii in a Recirculating Aquaculture System for Nile Tilapia." Aquaculture Reports 5, no. 3 (2020): 123–131.
2) Troell, M., et al. "Aquaculture and Ecosystem Services." Global Environmental Change 28 (2014): 139–152.
3) Chopin, T., and Robinson, S. M. C. "Defining the Appropriate Regulatory and Policy Framework for the Development of Integrated Multi-Trophic Aquaculture Practices." Aquaculture Economics & Management 10, no. 3 (2006): 99–110.
4) Trono, G. C. Seaweed Farming in the Philippines. Quezon City: UP Marine Science Institute, 2012.
5) Neish, I. C. "The ABC of Eucheuma Seaplant Production." Seaplant.net Monograph (2008).
6) Azanza, R. V., and Ask, E. I. "Sustainability of Kappaphycus and Eucheuma Farming in the Philippines." Journal of Applied Phycology 15, no. 3 (2003): 235–243.
7) Luhan, M. R. J., and Hurtado, A. Q. "Growth and Yield Performance of Cultured Kappaphycus alvarezii Varieties in Different Aquaculture Setups." Aquatic Botany 104 (2013): 95–101.
8) Dungani, R., et al. "Economic Evaluation of Kappaphycus Integration in Tilapia Farming in Coastal Ponds." Journal of Aquaculture Economics 9, no. 2 (2022): 45–53.
9) Hurtado, A. Q., et al. "Studies on the Farming of Kappaphycus in Low- Salinity Brackishwater Ponds." Aquaculture Asia Magazine 13, no. 1 (2008): 21–25.
10) Ganesan, M., et al. "Physiological Responses of Kappaphycus alvarezii to Salinity Stress." Indian Journal of Marine Sciences 38, no. 2 (2009): 204–208.
11) Suryati, N. K., et al. "Comparison of Hematological Parameters of Nile Tilapia Cultured in IMTA and Monoculture Systems." Indonesian Aquaculture Journal 11, no. 1 (2016):

33–41.
12) Wahyudi, A., et al. "Effect of IMTA-Based Seaweed Co-Culture on Tilapia Stress Indicators." Aquaculture Environment Interactions 7, no. 4 (2015): 281–289.
13) Kasan, N. A., et al. "Effect of Integrated Seaweed-Fish Culture on Tilapia Growth Performance." Journal of Applied Aquaculture 27, no. 3 (2015): 218–230.
14) Sahu, M. K., et al. "Bioremediation Efficacy of Seaweeds in Aquaculture Systems." Environmental Science and Pollution Research 25, no. 3 (2018): 2891–2903.
15) Yuniarti, T., et al. "Growth Curve Analysis of Tilapia in IMTA System." Aquaculture International 28, no. 1 (2020): 89–102.
16) Phang, S. M., et al. "Seaweed-Mediated Water Quality Improvement and Fish Feed Efficiency." Journal of Applied Phycology 21, no. 4 (2009): 523–529.
17) Campbell, I., et al. "Seaweed Production and Market Trends." FAO Fisheries Technical Paper No. 441 (2019).
18) Ridwan, R., et al. "Synergy between Probiotics and IMTA in Aquaculture." Aquaculture Reports 12 (2018): 112–121.
19) Kurniawan, A., et al. "Pakan Presisi dan Performa Ikan Nila dalam Sistem Terintegrasi." Jurnal Ilmu Perikanan Indonesia 16, no. 2 (2021): 165–174.
20) Nugroho, D., et al. "Development of Floating IMTA Cages in Indonesian Coastal Areas." Marine Policy 93 (2018): 60–68.
21) Hariyadi, D. S., and Sugama, K. "Sustainable Practices in Integrated Aquaculture Systems." Indonesian Fisheries Research Journal 20, no. 2 (2014): 75–82.
22) Bachtiar, T., et al. "Carbon Footprint Reduction in IMTA System Using Seaweed Co-Culture." Journal of Cleaner Production 276 (2020): 124244.
23) Ask, E. I., and Azanza, R. V. "Advances in Cultivation of Tropical Red Seaweeds." Botanica Marina 45, no. 4 (2002): 319–326.
24) Roleda, M. Y., and Hurd, C. L. "Seaweed Responses to Salinity and Implications for Cultivation." Aquaculture 447 (2015): 135–144.
25) Largo, D. B., et al. "Ice-Ice Disease and Epiphyte Infestation in Cultivated Kappaphycus." Journal of Applied Phycology 11, no. 1 (1999): 97–105.
26) Vairappan, C. S. "Epiphyte Control in Commercial Seaweed Farming." Journal of Applied Phycology 18, no. 4 (2006): 391–397.
27) Purnomo, A. H., et al. "Design Optimization for Seaweed Racks in IMTA Systems." Aquaculture Engineering 82 (2018): 33–42.
28) Ernawati, T., and Ginting, E. "Post-Harvest Challenges in Seaweed Aquaculture." Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology 7, no. 1 (2021): 15–22.
29) Sukarno, D., et al. "Quality Degradation of Carrageenan under Poor Drying Practices." Journal of Food Science and Technology 59, no. 6 (2022): 2231–2237.
30) Widiyanto, A., and Hadi, M. S. "Policy Gaps in Promoting IMTA in Indonesia." Journal of Coastal Development 23, no. 3 (2020): 129–137.
31) Putra, R. H., et al. "Capacity Building for Small-Scale Seaweed Farmers in IMTA." Asian Journal of Aquatic Research 15, no. 2 (2022): 98–107.
32) Irianto, H. E. "Integrated Aquaculture for Resilient Coastal Livelihoods." Marine and Fisheries Review 82, no. 1 (2020): 15–28.
33) Nugroho, Y. R., and Santoso, J. "Nutrient Uptake Rate of Kappaphycus in Mixed Culture." Aquaculture Environment Interactions 11 (2019): 45–54
34) Setyobudi, E., et al. "Carbon and Nutrient Balance in IMTA Pond System." Journal of Applied Environmental and Biological Sciences 9, no. 5 (2019): 14–21.

35) Simangunsong, J., et al. "Effect of Stocking Density on Nutrient Fluxes in IMTA." Indonesian Aquatic Journal 8, no. 3 (2020): 155–162.
36) Priyambodo, B., et al. "Performance of Kappaphycus in Different Nutrient Loads." Coastal and Marine Science Journal 10, no. 1 (2022): 66–74.
37) Suprapto, H., and Lestari, D. "Feasibility of IMTA for Coastal Fish Farmers." Aquabiz Indonesia 6, no. 4 (2020): 12–19.
38) Wibowo, A., and Putri, S. K. "Financial Modeling of Kappaphycus Tilapia IMTA System." Indonesian Journal of Aquaculture Economics 5, no. 2 (2021): 101–111.
39) Dungani, R., et al. "Minimum Scale for Economic Viability of IMTA Systems." Journal of Aquaculture Policy 8, no. 1 (2022): 55–64.