

Rekayasa Ekonomi Biru Pengelolaan Budidaya Rumput Laut Berwawasan Ekologis

Sucipto

¹Program Studi Akuakultur, Universitas Lambung Mangkurat, Lampung, Indonesia

Email: ¹*kacipto321@gmail.com

Abstract

*This study aimed to formulate a blue economy engineering model for seaweed cultivation (*Kappaphycus alvarezii*) by integrating water quality management, hydrodynamic regulation, planting distance optimization, and environmentally based business efficiency. A mixed-methods approach combined field true experimental design with quantitative descriptive analysis of marine economic performance. Variables included water quality, local current velocity, Daily Growth Rate (DGR), ice-ice disease prevalence, carrageenan yield and gel strength, and financial feasibility. Results showed that water conditions remained suitable for growth, with temperature of 27–30°C, salinity of 28–34 ppt, pH of 7.5–8.5, and dissolved oxygen above 5 mg/L. A planting distance of ± 50 cm increased local current velocity by 54.2%, from 19.2 ± 2.3 to 29.6 ± 2.7 cm s⁻¹, while reducing dissolved organic matter from 3.8 ± 0.6 to 2.7 ± 0.5 mg/L. These conditions increased DGR by 19.7%, from 2.74 ± 0.18 to $3.28 \pm 0.21\%$ day⁻¹, and reduced ice-ice prevalence from 18.7% to 8.7%. Carrageenan yield increased by 10.5% to $35.8 \pm 1.4\%$, while gel strength increased by 24.9% to 512 ± 27 g/cm². Financially, the R/C ratio increased from 1.28 to 1.51, while the Payback Period shortened from approximately 205 to 117 days. Thus, hydrodynamic-based planting distance optimization improved productivity, product quality, economic efficiency, and coastal cultivation sustainability. This strategy strengthens integration among microenvironmental management, disease risk reduction, carrageenan value addition, and investment efficiency within an adaptive blue economy framework, supporting sustainable coastal spatial utilization over the long term sustainably.*

Keywords: Blue Economy, Carrying Capacity, Hydrodynamics, Ice-Ice Disease, Seaweed Cultivation, Sustainability.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan merumuskan model rekayasa ekonomi biru pada budidaya rumput laut (*Kappaphycus alvarezii*) melalui integrasi pengelolaan kualitas perairan, hidrodinamika, jarak tanam, dan efisiensi usaha berbasis daya dukung ekologis. Penelitian menggunakan pendekatan *mixed methods* yang mengombinasikan *true experimental design* di lapangan dengan analisis deskriptif kuantitatif ekonomi kelautan. Variabel yang diamati meliputi kualitas air, kecepatan arus lokal, *Daily Growth Rate* (DGR), prevalensi penyakit *ice-ice*, rendemen dan *gel strength* karaginan, serta kelayakan finansial. Hasil menunjukkan bahwa kondisi perairan berada dalam kisaran mendukung pertumbuhan, dengan suhu 27–30°C, salinitas 28–34 ppt, pH 7,5–8,5, dan DO >5 mg/L. Jarak tanam ± 50 cm meningkatkan kecepatan arus lokal sebesar 54,2%, dari $19,2 \pm 2,3$ menjadi $29,6 \pm 2,7$ cm/detik, serta menurunkan bahan organik terlarut dari $3,8 \pm 0,6$ menjadi $2,7 \pm 0,5$ mg/L. Kondisi tersebut meningkatkan DGR sebesar 19,7%, dari $2,74 \pm 0,18$ menjadi $3,28 \pm 0,21\%$ /hari, dan menurunkan prevalensi *ice-ice* dari 18,7% menjadi 8,7%. Rendemen karaginan meningkat 10,5% menjadi $35,8 \pm 1,4\%$, sedangkan *gel strength* meningkat 24,9% menjadi 512 ± 27 g/cm². Secara finansial, *R/C ratio* meningkat dari 1,28 menjadi 1,51 dan *Payback Period* memendek dari ± 205 menjadi ± 117 hari. Dengan demikian, jarak tanam ± 50 cm berbasis optimalisasi hidrodinamika meningkatkan produktivitas, mutu, efisiensi ekonomi, dan keberlanjutan budidaya pesisir. Strategi ini memperkuat keterpaduan antara pengelolaan lingkungan mikro, pengendalian risiko penyakit, peningkatan nilai tambah karaginan, dan efisiensi investasi dalam kerangka ekonomi biru yang adaptif terhadap karakteristik oseanografi lokal serta mendukung pemanfaatan ruang pesisir secara berkelanjutan dalam jangka panjang.

Kata Kunci: Budidaya Rumput Laut, Daya Dukung Lingkungan, Ekonomi Biru, Hidrodinamika, Keberlanjutan, Penyakit Ice-Ice.

1. PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan ruang produksi yang sangat vital dalam mendukung pertumbuhan sektor kelautan melalui aktivitas akuakultur modern, khususnya budidaya rumput laut yang berkontribusi signifikan terhadap blue economy (Cottier-Cook et al., 2021). Namun, ekspansi lahan perairan budidaya yang tidak terkendali dan melebihi ambang batas carrying capacity lingkungan telah menyebabkan penurunan kualitas lingkungan akuatik secara drastis (van der Meer, 2023). Kepadatan unit budidaya yang terlalu rapat menghambat dinamika hidrodinamika perairan, memicu penumpukan sedimen organik dari biomassa mati, mempercepat penularan penyakit endemik makroalga seperti ice-ice, serta diperparah oleh masifnya penggunaan material sintetis tak terkelola yang berkontribusi pada akumulasi marine debris di wilayah pesisir yang berujung pada penurunan kualitas karaginan dan kegagalan panen massal (Ward et al., 2022). Oleh karena itu, solusi yang diharapkan adalah penerapan rekayasa lingkungan perairan berbasis pendekatan blue economy melalui manajemen ruang terpadu, manipulasi hidrodinamika arus secara proporsional, serta monitoring kualitas air secara berkala untuk menciptakan keselarasan seimbang antara produktivitas ekonomi masyarakat pembudidaya dengan kelestarian fungsi ekologis perairan pesisir (Byron et al., 2024).

Sejumlah penelitian sejenis telah dilakukan dalam kurun waktu lima tahun terakhir untuk mengatasi degradasi lingkungan akuakultur. Radiarta (2020) memfokuskan kajian pada pemetaan kesesuaian lahan menggunakan sistem informasi geografis untuk meminimalkan risiko penyakit makroalga di kawasan pesisir terbuka. Selanjutnya, UNEP (2021) mengkaji peran makroalga secara makro dalam kerangka ekonomi biru sebagai instrumen strategis untuk menciptakan lapangan kerja baru dan pemanfaatan laut berwawasan lingkungan. Di sisi lain, FAO (2022) mempublikasikan standar global mengenai *sustainable aquaculture* yang menekankan pentingnya pembatasan kepadatan tanam untuk mencegah penurunan sirkulasi air alami. Penelitian yang dilakukan oleh Troell et al., (2022) menguji efektivitas sistem *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (IMTA) dengan memanfaatkan rumput laut sebagai biofilter alami untuk menyerap kelebihan unsur hara nitrogen dan fosfor dari limbah budidaya ikan intensif. Terakhir, Duarte et al., (2021) mengevaluasi kontribusi biologis makroalga tropis dalam penyerapan karbon biru (*blue carbon*) sebagai bagian penting dari mitigasi perubahan iklim berbasis ekosistem kelautan.

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan konsep *blue economy*, masih terdapat kesenjangan (*gap analysis*) yang mencolok dalam literatur terkait integrasi aspek teknis dan ekonomi (Stacey et al., 2021). Sebagian besar studi terdahulu cenderung bersifat parsial, yakni hanya berfokus pada pemetaan geografis lahan pesisir, kajian biologis penyerapan karbon melalui ekosistem *blue carbon*, atau pembahasan teoritis kebijakan *blue economy* semata (Fujita et al., 2023). Hingga saat ini, belum ditemukan kajian yang mengintegrasikan secara komprehensif rekayasa infrastruktur fisik perairan, termasuk pengaturan hidrodinamika arus, optimasi zonasi jarak tanam, struktur biaya operasional, serta efisiensi rantai pasok industri hilir masyarakat pesisir dalam satu kerangka rekayasa ekonomi biru yang utuh (Beselly et al., 2025). Selain itu, hubungan kausal antara karakteristik hidrodinamika perairan dengan proses fisiologis budidaya masih belum dijelaskan secara memadai. Variasi kecepatan arus memengaruhi laju fluks hara menuju permukaan talus rumput laut sehingga menentukan efisiensi penyerapan nutrisi, proses

fotosintesis, dan pertumbuhan biomassa. Pada kondisi arus yang terlalu rendah, pertukaran massa air menjadi terbatas sehingga meningkatkan akumulasi bahan organik, menurunkan konsentrasi oksigen terlarut, dan menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi perkembangan mikroorganisme patogen. Sebaliknya, kecepatan arus yang berada pada kisaran optimum mampu meningkatkan suplai nutrisi sekaligus mengurangi peluang kolonisasi patogen melalui mekanisme pembilasan (*flushing*) alami. Dengan demikian, aspek hidrodinamika tidak hanya berpengaruh terhadap produktivitas budidaya, tetapi juga menentukan kualitas lingkungan perairan dan keberhasilan implementasi ekonomi biru yang berkelanjutan (Efani et al., 2025).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa peningkatan kecepatan arus hingga kisaran hidrodinamika optimum akan meningkatkan laju fluks hara menuju permukaan talus rumput laut ($J_n \propto v$), sehingga efisiensi penyerapan nutrisi dan pertumbuhan biomassa meningkat, sedangkan prevalensi infeksi patogen menurun akibat meningkatnya proses pertukaran massa air dan berkurangnya akumulasi bahan organik pada area budidaya. Sebaliknya, kondisi arus yang terlalu rendah diperkirakan menurunkan laju fluks hara, menghambat proses fisiologis rumput laut, serta meningkatkan risiko serangan penyakit akibat memburuknya kualitas lingkungan perairan. Hubungan fisiologis tersebut menjadi dasar dalam penyusunan model rekayasa ekonomi biru yang mengintegrasikan pengelolaan kualitas lingkungan dengan peningkatan efisiensi ekonomi budidaya.

Berdasarkan hipotesis tersebut, tujuan penelitian ini adalah merumuskan model rekayasa lingkungan perairan berbasis ekonomi biru yang mengintegrasikan penataan ruang unit budidaya, pengaturan hidrodinamika sirkulasi massa air, dan efisiensi tata kelola usaha budidaya rumput laut berwawasan ekologis. Model yang dihasilkan diharapkan menjadi dasar ilmiah sekaligus panduan aplikatif bagi pembudidaya dan pemangku kebijakan dalam mengoptimalkan kondisi hidrodinamika untuk meningkatkan kualitas karaginan, produktivitas dan nilai tambah ekonomi, menekan risiko serangan penyakit, serta meminimalkan dampak ekologis sehingga keberlanjutan ekosistem pesisir dapat terjaga dalam jangka panjang.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui pendekatan kombinasi (*mixed methods*) yang mengintegrasikan rekayasa teknis eksperimental lapangan (*true experimental design*) dengan analisis deskriptif kuantitatif ekonomi kelautan (Taherdoost, 2022). Alur pelaksanaan penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan setiap tahapan berjalan linier guna mencapai tujuan riset (Abdallah, 2025). Integrasi metode tersebut mendukung validitas internal dan eksternal dalam kajian yang melibatkan aspek teknis lapangan dan dimensi ekonomi kelautan secara komprehensif (Alhowaish, 2026). Secara visual, urutan dan tahapan dalam melakukan penelitian ini disajikan pada Gambar 1 (Fàbregues et al., 2022).

Alur pelaksanaan penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan setiap tahapan berjalan linier guna mencapai tujuan riset. Secara visual, urutan dan tahapan dalam melakukan penelitian ini disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Pelaksanaan Penelitian Rekayasa Ekonomi Biru Budidaya Rumput Laut

2.2 Penerapan Metode dalam Penelitian

Penerapan metode rekayasa ekonomi biru berwawasan ekologis pada penelitian ini bertumpu pada pengelolaan tiga variabel utama: rekayasa hidrodinamika ruang perairan, optimalisasi jarak tanam makroalga (*Eucheuma cottonii*), dan efisiensi manajemen operasional ekonomi.

Langkah awal penerapan metode dimulai dengan mengukur daya dukung perairan (*carrying capacity*) nyata di lokasi budidaya. Pengaturan tata ruang komoditas dilakukan dengan membagi blok budidaya ke dalam zonasi jarak tanam eksperimental. Spesifikasi variabel teknis ekologis dan indikator ekonomi yang diterapkan dan diamati dalam metode penelitian ini dirinci secara mendetail pada Tabel 1.

Tabel 1. Matriks Penerapan Metode dan Variabel Penelitian Kunci

No.	Dimensi Metode	Variabel yang Diukur	Parameter Pengukuran	Metode Pengumpulan/Penerapan	Instrumen/Alat	Teknik Analisis
1	Rekayasa Ekologis	Kecepatan arus perairan	Kecepatan arus (m/s)	Pengukuran langsung <i>in situ</i> pada setiap unit budidaya	Current meter	Analisis deskriptif dan perbandingan antar lokasi
2	Rekayasa Ekologis	Kualitas perairan	pH, salinitas, suhu, dissolved oxygen (DO)	Pengukuran berkala selama periode penelitian	Water quality checker dan DO meter	Analisis deskriptif serta dibandingkan dengan baku mutu budidaya rumput laut
3	Rekayasa Fisik	Zonasi dan jarak tanam	Jarak tanam (30 cm dan 50 cm), pola penempatan unit budidaya	Penerapan plot eksperimen pada lokasi budidaya	Tali ris nilon, meteran	Analisis komparatif terhadap pertumbuhan dan produktivitas
4	Rekayasa Fisik	Prevalensi penyakit <i>ice-ice</i>	Persentase thallus terserang (%)	Observasi visual secara berkala pada setiap plot	Kuadrat sampling dan lembar observasi	Analisis persentase kejadian penyakit dan perbandingan antar perlakuan
5	Manajemen Ekonomi	Biaya operasional dan investasi	Biaya tetap, biaya variabel, total biaya produksi	Wawancara terstruktur kepada pembudidaya dan pencatatan biaya usaha	Kuesioner tervalidasi dan lembar pencatatan biaya	Analisis biaya produksi, R/C Ratio, dan Payback Period (PP)

6	Manajemen Ekonomi	Nilai tambah karaginan	Rendemen karaginan (%), kualitas hasil ekstraksi	Analisis laboratorium terhadap sampel pasca-panen	Protokol ekstraksi karaginan, timbangan analitik, dan peralatan laboratorium	Analisis rendemen karaginan, nilai tambah produk, dan keterkaitannya dengan efisiensi ekonomi budidaya
---	-------------------	------------------------	--	---	--	--

Penerapan metode fisik dilakukan dengan memodifikasi kerapatan rakit apung (*floating raft design*) guna memberikan ruang bagi hidrodinamika arus alami laut untuk membersihkan sedimen organik secara mandiri (*self-cleaning mechanism*). Pembatasan kerapatan ini ditujukan untuk menjaga sirkulasi massa air agar suplai nutrisi (nitrogen dan fosfor) ke tanaman tetap optimal secara konstan.

2.3 Pengujian Metode dalam Mendapatkan Hasil

Untuk memastikan metode yang diterapkan menghasilkan data yang valid, akurat, dan sesuai dengan gambaran luaran yang diharapkan, dilakukan serangkaian prosedur pengujian ketat yang terbagi ke dalam tiga aspek pengujian:

1. Pengujian Kinerja Biologis dan Lingkungan: Pengujian laju pertumbuhan harian (*Daily Growth Rate / DGR*) rumput laut dihitung menggunakan formula penimbangan biomassa mingguan selama siklus 45 hari. Deteksi dini dan pengujian tingkat ketahanan terhadap infeksi bakteri penyebab *ice-ice* dihitung melalui indeks prevalensi serangan pada tiap-tiap plot jarak tanam eksperimental.
2. Pengujian Kualitas Produk Laboratorium: Hasil panen makroalga dari masing-masing perlakuan metode diuji secara laboratorium untuk mengetahui rendemen karaginan, tingkat kekuatan gel (*gel strength*), dan kadar airnya. Pengujian ini krusial karena ekonomi biru mensyaratkan peningkatan nilai tambah (*value-added*) ekonomi melalui standarisasi mutu industri hilir.
3. Pengujian Validitas Instrumen Sosial Ekonomi: Kuesioner finansial yang digunakan untuk mengukur efisiensi usaha dan profitabilitas diuji terlebih dahulu menggunakan uji validitas *Pearson Product Moment* dan uji reliabilitas *Cronbach's Alpha* untuk memastikan data finansial bebas dari bias pengukuran. Selanjutnya, kelayakan usaha diuji menggunakan formula ekonomi makro berupa analisis *Revenue-Cost Ratio* (R/C Ratio) dan *Payback Period* (PP) untuk membuktikan kelayakan ekonomi dari model rekayasa ekologis yang baru.

Melalui integrasi tahap pengujian ini, hasil akhir penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai jarak tanam dan tata letak perairan terbaik yang tidak hanya melipatgandakan keuntungan finansial para pembudidaya, melainkan secara aktif melestarikan daya dukung lingkungan pesisir dari ancaman degradasi ekologis berkepanjangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Kualitas Perairan dan Implikasinya terhadap Pertumbuhan Rumput Laut

Tabel 2. Hasil Pengukuran Parameter Kualitas Perairan dan Hidrodinamika pada Lokasi Budidaya

No.	Parameter	Hasil Pengukuran	Implikasi terhadap Budidaya Rumput Laut
1	Suhu perairan	27–30 °C	Mendukung proses metabolisme dan fotosintesis rumput laut.
2	Salinitas	28–34 ppt	Mendukung keseimbangan osmotik dan kestabilan fisiologis thallus.
3	pH	7,5–8,5	Menunjukkan kondisi perairan yang mendukung proses fisiologis organisme akuatik.

4	Oksigen terlarut (DO)	>5 mg/L	Mendukung proses respirasi dan menjaga kualitas lingkungan perairan.
5	Kecerahan	>3 m	Mendukung penetrasi cahaya yang diperlukan untuk proses fotosintesis.
6	Kecepatan arus	20–40 cm/detik	Mendukung pertukaran massa air, distribusi nutrien, serta mengurangi akumulasi bahan organik.

Sumber: Data primer penelitian

Berdasarkan Tabel 2, kondisi fisika-kimia dan hidrodinamika perairan di lokasi penelitian masih berada dalam kisaran yang mendukung pertumbuhan *Kappaphycus alvarezii*, dengan suhu 27–30°C, salinitas 28–34 ppt, pH 7,5–8,5, oksigen terlarut >5 mg/L, kecerahan >3 m, serta kecepatan arus 20–40 cm/detik. Kisaran tersebut mendukung proses metabolisme, fotosintesis, keseimbangan osmotik, dan pertukaran massa air di sekitar *thallus*. Effendi (2016) menegaskan bahwa suhu, salinitas, oksigen terlarut, dan kecerahan merupakan parameter penting dalam menentukan produktivitas perairan, sementara suhu yang melebihi 32°C berpotensi menimbulkan stres fisiologis dan menurunkan efisiensi fotosintesis (Hayashi et al., 2017). Stabilitas salinitas juga penting untuk mempertahankan keseimbangan osmotik, karena fluktuasi akibat masuknya air tawar dapat meningkatkan kerentanan *thallus* terhadap kerusakan dan infeksi penyakit (Hurtado et al., 2020).

Dari aspek hidrodinamika, kecepatan arus 20–40 cm/detik berperan dalam meningkatkan suplai nutrien, mempertahankan oksigen terlarut, mencegah pengendapan sedimen, serta mengurangi akumulasi bahan organik di sekitar tanaman. Temuan tersebut sejalan dengan Radiarta et al. (2021) yang menunjukkan bahwa pergerakan massa air yang memadai dapat meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi pemanfaatan nutrien pada budidaya laut. Dengan demikian, produktivitas *K. alvarezii* merupakan hasil interaksi antara faktor fisika, kimia, dan dinamika hidrodinamika perairan, sehingga pengelolaan budidaya perlu mempertahankan kestabilan lingkungan secara terpadu. Pendekatan berbasis ekosistem menjadi penting untuk menjaga produktivitas sekaligus mendukung keberlanjutan budidaya dalam kerangka ekonomi biru (Duarte et al., 2021; FAO, 2022).

3.2 Hubungan Kualitas Lingkungan dengan Munculnya Penyakit *Ice-Ice*

Pengamatan terhadap komponen biologi menunjukkan adanya peningkatan keberadaan organisme penempel (epifit) dan mikroorganisme oportunistik pada area budidaya yang memiliki kepadatan tanam tinggi. Gejala yang teramati berupa perubahan warna *thallus* menjadi putih, tekstur yang rapuh, serta pembusukan jaringan secara bertahap, yang merupakan karakteristik umum penyakit *ice-ice*.

Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa serangan penyakit *ice-ice* tidak hanya disebabkan oleh keberadaan bakteri patogen, tetapi juga berkaitan erat dengan perubahan kondisi lingkungan yang menyebabkan tanaman mengalami stres fisiologis. Largo et al., (2019) menjelaskan bahwa penyakit *ice-ice* merupakan penyakit oportunistik yang muncul ketika rumput laut mengalami gangguan fisiologis akibat fluktuasi suhu, salinitas, atau kualitas perairan. Kondisi stres tersebut menyebabkan penurunan daya tahan tanaman sehingga memudahkan kolonisasi bakteri patogen pada jaringan *thallus*.

Kepadatan tanam yang terlalu tinggi dapat menghambat sirkulasi air dan meningkatkan akumulasi bahan organik di sekitar lokasi budidaya. Akumulasi tersebut selanjutnya memicu pertumbuhan epifit dan mikroorganisme oportunistik yang berkompetisi dengan rumput laut dalam memperoleh cahaya dan nutrien. Penutupan permukaan *thallus* oleh epifit menyebabkan penurunan efisiensi fotosintesis dan mempercepat terjadinya kerusakan jaringan (Largo et al., 2019).

Selain itu, rendahnya sirkulasi massa air menyebabkan terjadinya kondisi stagnan yang meningkatkan konsentrasi limbah organik dan menurunkan kualitas lingkungan perairan. Alongi (2018) menyatakan bahwa akumulasi bahan organik yang berlebihan

dapat mengganggu keseimbangan ekosistem pesisir dan meningkatkan risiko proliferasi mikroorganisme patogen. Dengan demikian, penyakit *ice-ice* sesungguhnya merupakan manifestasi dari ketidakseimbangan ekologi yang terjadi pada sistem budidaya.

Temuan ini memperlihatkan bahwa pengendalian penyakit tidak dapat hanya dilakukan melalui pendekatan kuratif, melainkan harus diarahkan pada pengelolaan lingkungan secara preventif melalui pengaturan kepadatan tanam, peningkatan sirkulasi air, serta penerapan prinsip daya dukung ekosistem. Pendekatan tersebut sejalan dengan konsep budidaya berwawasan ekologis yang menempatkan kesehatan lingkungan sebagai fondasi keberlanjutan produksi (FAO, 2022).

3.3 Kesesuaian Metode Budidaya dan Daya Dukung Ekologis Perairan

Tabel 3. Hasil Pengamatan Kondisi Lingkungan dan Gejala Penyakit Ice-Ice pada Area Budidaya

Parameter pengamatan	Kondisi pada kepadatan tanam tinggi	Indikasi ekologis/biologis
Kepadatan tanaman	Tinggi	Ruang antarunit budidaya menjadi lebih terbatas sehingga berpotensi menghambat sirkulasi massa air
Sirkulasi massa air	Relatif terhambat	Pertukaran massa air dan proses pembilasan bahan organik menjadi kurang optimal
Akumulasi bahan organik	Meningkat di sekitar area budidaya	Menunjukkan adanya penurunan efisiensi pembuangan material organik oleh dinamika perairan
Organisme penempel (epifit)	Keberadaan meningkat	Menunjukkan perubahan kondisi mikrohabitat pada permukaan thallus
Mikroorganisme oportunistik	Keberadaan meningkat	Mengindikasikan kondisi lingkungan yang berpotensi mendukung kolonisasi mikroorganisme
Warna thallus	Berubah menjadi putih	Merupakan salah satu gejala yang diamati pada thallus yang mengalami ice-ice
Tekstur thallus	Menjadi rapuh	Menunjukkan terjadinya penurunan kondisi fisiologis dan integritas jaringan
Kondisi jaringan	Mengalami pembusukan secara bertahap	Menunjukkan perkembangan kerusakan jaringan yang berkaitan dengan gejala ice-ice
Risiko penyakit ice-ice	Meningkat pada kondisi kepadatan tinggi	Menunjukkan adanya keterkaitan antara kondisi lingkungan budidaya dan munculnya gejala penyakit

Sumber: Data hasil pengamatan penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 3, pemilihan metode budidaya menunjukkan keterkaitan erat dengan karakteristik oseanografi perairan, yaitu sistem lepas dasar lebih sesuai untuk perairan dangkal dengan arus relatif lemah, *long line* untuk perairan terbuka dengan kedalaman >2 m dan arus sedang hingga kuat, rakit apung untuk kawasan teluk yang terlindung, serta vertikultur untuk perairan lebih dalam dengan kejernihan tinggi. Kesesuaian metode dengan kondisi lingkungan berperan penting dalam mengoptimalkan produktivitas sekaligus efisiensi biaya operasional (Parenrengi et al., 2019). Sistem lepas dasar memiliki investasi relatif rendah, tetapi lebih rentan terhadap sedimentasi dan fluktuasi salinitas (Hurtado-Almonacid et al., 2024), sedangkan *long line* lebih adaptif terhadap dinamika pasang surut dan arus serta memungkinkan sirkulasi nutrisi yang lebih baik dan mengurangi sedimentasi pada *thallus* (Valderrama et al., 2015). Sementara itu, vertikultur dapat meningkatkan pemanfaatan ruang kolom air, tetapi keberhasilannya sangat bergantung pada penetrasi cahaya dan kedalaman penempatan karena penurunan intensitas cahaya dapat membatasi fotosintesis dan pertumbuhan (Radiarta, 2020).

Dalam perspektif ekonomi biru, pemilihan metode budidaya perlu mempertimbangkan produktivitas, efisiensi operasional, dan daya dukung ekosistem secara simultan. Pendekatan spasial berbasis GIS dapat mendukung penentuan zonasi budidaya yang sesuai, mengurangi konflik pemanfaatan ruang, dan mencegah degradasi ekosistem pesisir (Basyuni et al., 2021). Oleh karena itu, pengaturan jarak antarunit, pembatasan kepadatan, serta penyesuaian metode dengan kondisi oseanografi menjadi strategi penting untuk menciptakan budidaya rumput laut yang produktif dan berkelanjutan. Secara keseluruhan, keberhasilan budidaya ditentukan oleh interaksi

kualitas lingkungan, dinamika hidrodinamika, dan kesesuaian teknologi budidaya, yang sekaligus berperan dalam menekan risiko *ice-ice*, meningkatkan produktivitas, dan memperkuat penerapan prinsip ekonomi biru.

3.4 Karakteristik Kualitas Perairan dan Hidrodinamika

Tabel 4. Karakteristik Kualitas Perairan Dan Hidrodinamika Pada Berbagai Jarak Tanam

Parameter	Jarak tanam ke-1 ($\pm 25\text{cm}$)	Jarak tanam ke-2 ($\pm 50\text{cm}$)	Interpretasi
Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	$28,4 \pm 0,7$	$28,2 \pm 0,6$	Relatif stabil
Salinitas (ppt)	$31,2 \pm 1,4$	$31,5 \pm 1,2$	Sesuai untuk budidaya
pH	$8,0 \pm 0,2$	$8,1 \pm 0,2$	Relatif stabil
DO (mg/L)	$5,4 \pm 0,4$	$5,8 \pm 0,3$	Mendukung metabolisme
Kecerahan (m)	$3,2 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,3$	Penetrasi cahaya baik
Kecepatan arus lokal (cm/detik)	$19,2 \pm 2,3$	$29,6 \pm 2,7$	Lebih tinggi pada jarak 50 cm
Bahan organik terlarut (mg/L)	$3,8 \pm 0,6$	$2,7 \pm 0,5$	Lebih tinggi pada jarak 30 cm

Sumber: Data hasil pengamatan penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 4, kualitas perairan pada kedua perlakuan jarak tanam relatif stabil dan masih mendukung pertumbuhan *Kappaphycus alvarezii*, dengan suhu $28,4 \pm 0,7$ $^{\circ}\text{C}$ dan $28,2 \pm 0,6$ $^{\circ}\text{C}$, salinitas $31,2 \pm 1,4$ dan $31,5 \pm 1,2$ ppt, pH $8,0 \pm 0,2$ dan $8,1 \pm 0,2$, DO $5,4 \pm 0,4$ dan $5,8 \pm 0,3$ mg/L, serta kecerahan $3,2 \pm 0,3$ dan $3,4 \pm 0,3$ m pada jarak tanam ± 25 cm dan ± 50 cm. Perbedaan utama terdapat pada kondisi hidrodinamika, dengan kecepatan arus lokal lebih rendah pada jarak ± 25 cm ($19,2 \pm 2,3$ cm/detik) dibandingkan ± 50 cm ($29,6 \pm 2,7$ cm/detik), sementara bahan organik terlarut lebih tinggi pada jarak ± 25 cm ($3,8 \pm 0,6$ mg/L) dibandingkan ± 50 cm ($2,7 \pm 0,5$ mg/L). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa jarak tanam yang lebih rapat cenderung menghambat pertukaran massa air dan meningkatkan retensi bahan organik di sekitar *thallus*, sedangkan jarak ± 50 cm memberikan sirkulasi dan pembaruan massa air yang lebih efektif sehingga berpotensi mendukung ketersediaan oksigen dan nutrisi serta mengurangi kondisi lingkungan yang mendukung perkembangan *ice-ice*.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa parameter kualitas perairan seperti suhu, salinitas, pH, oksigen terlarut, dan kecerahan yang berada dalam kisaran optimal berperan penting dalam mendukung metabolisme serta fotosintesis *Kappaphycus alvarezii*, sehingga perbedaan respons pertumbuhan antarkelompok perlakuan lebih ditentukan oleh faktor hidrodinamika lokal daripada perubahan parameter kualitas perairan dasar (Ihsan et al., 2023). Jarak tanam yang lebih rapat cenderung menurunkan efektivitas pertukaran massa air di sekitar *thallus*, meningkatkan retensi bahan organik terlarut, serta menciptakan lingkungan mikro yang mendukung akumulasi bahan organik dan perkembangan mikroorganisme penyebab penyakit *ice-ice* (Palmi et al., 2025). Sebaliknya, jarak tanam yang lebih longgar menghasilkan kecepatan arus lokal yang lebih tinggi sehingga mendukung sirkulasi dan pembaruan massa air secara lebih efektif di sekitar *thallus* (Barillé et al., 2025). Temuan tersebut sejalan dengan tinjauan sistematis yang menegaskan bahwa densitas tanam dan konfigurasi sistem budidaya berfungsi sebagai pengatur mikro-lingkungan melalui pengaruhnya terhadap pertukaran air, distribusi nutrisi, dan tekanan biofouling pada budidaya *K. alvarezii*.

3.5 Perbandingan Kecepatan Arus Lokal dan Laju Pertumbuhan pada Berbagai Jarak Tanam

Tabel 5. Perbandingan kecepatan arus lokal dan laju pertumbuhan rumput laut

Indikator	Jarak tanam ke-1 ($\pm 25\text{cm}$)	Jarak tanam ke-2 ($\pm 50\text{cm}$)	Perubahan
Kecepatan arus lokal (cm/detik)	$19,2 \pm 2,3$	$29,6 \pm 2,7$	+54,2%
Bobot awal rata-rata (g)	100	100	-
Bobot akhir rata-rata (g)	344	434	+26,2%
DGR (%/hari)	$2,74 \pm 0,18$	$3,28 \pm 0,21$	+19,7%

Sumber: Data hasil pengamatan penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 5, peningkatan jarak tanam dari ± 25 cm menjadi ± 50 cm menghasilkan kondisi hidrodinamika dan pertumbuhan *Kappaphycus alvarezii* yang lebih baik, ditunjukkan oleh peningkatan kecepatan arus lokal sebesar 54,2% dari $19,2 \pm 2,3$ menjadi $29,6 \pm 2,7$ cm/detik, peningkatan bobot akhir rata-rata sebesar 26,2% dari 344 menjadi 434 g, serta peningkatan laju pertumbuhan harian (DGR) sebesar 19,7% dari $2,74 \pm 0,18$ menjadi $3,28 \pm 0,21\%$ /hari. Kondisi arus yang lebih tinggi pada jarak ± 50 cm diduga meningkatkan pertukaran massa air, suplai oksigen dan nutrisi, serta pengeluaran sisa metabolisme dan bahan organik di sekitar *thallus*, sedangkan jarak tanam ± 25 cm cenderung meningkatkan hambatan sirkulasi dan retensi bahan organik. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan jarak tanam berperan dalam menciptakan kondisi hidrodinamika mikrohabitat yang lebih mendukung pertumbuhan rumput laut, meskipun respons pertumbuhan tetap dapat dipengaruhi oleh faktor fisiologis *thallus*, ketersediaan nutrisi, intensitas cahaya, dan tekanan biotik.

Hasil penelitian terdahulu mendukung temuan bahwa peningkatan jarak tanam dari ± 25 cm menjadi ± 50 cm mampu meningkatkan kecepatan arus lokal serta laju pertumbuhan harian (daily growth rate/DGR) *Kappaphycus alvarezii* melalui perbaikan kondisi hidrodinamika mikrohabitat. Ihsan et al. (2023) melaporkan bahwa jarak tanam 30 cm menghasilkan pertumbuhan mutlak dan laju pertumbuhan spesifik tertinggi dibandingkan jarak yang lebih rapat, karena memfasilitasi sirkulasi air dan penyerapan nutrisi yang lebih optimal. Putri et al. (2022) menemukan bahwa jarak tanam 25 cm memberikan bobot mutlak dan DGR tertinggi pada metode bottom-off, yang dikaitkan dengan berkurangnya kompetisi ruang dan peningkatan pertukaran massa air di sekitar *thallus*. Fernando et al. (2022) menegaskan bahwa jarak tanam 25 cm menghasilkan laju pertumbuhan spesifik optimal pada metode off-bottom, sejalan dengan prinsip bahwa jarak yang lebih renggang mengurangi hambatan aliran air dan mendukung suplai oksigen serta nutrisi. Aslan et al. (2024) juga menunjukkan bahwa variasi jarak tanam memengaruhi DGR dan kualitas biomassa *K. alvarezii*, di mana konfigurasi jarak yang tepat mendukung efisiensi pertumbuhan melalui perbaikan lingkungan mikro budidaya.

3.6 Prevalensi Penyakit *Ice-Ice* dan Hubungannya dengan Kondisi Hidrodinamika

Tabel 6. Prevalensi Penyakit Ice-Ice Berdasarkan Jarak Tanam

Indikator	Jarak tanam ke-1 (± 25 cm)	Jarak tanam ke-2 (± 50 cm)
Jumlah unit diamati	150	150
Unit menunjukkan gejala ice-ice	28	13
Prevalensi (%)	18,7	8,7
Kecepatan arus lokal (cm/detik)	$19,2 \pm 2,3$	$29,6 \pm 2,7$
Akumulasi bahan organik (mg/L)	$3,8 \pm 0,6$	$2,7 \pm 0,5$
Epifit pada <i>thallus</i>	Relatif tinggi	Relatif rendah

Sumber: Data hasil pengamatan penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 6, prevalensi penyakit *ice-ice* lebih tinggi pada jarak tanam ± 25 cm, yaitu 18,7% (28 dari 150 unit), dibandingkan 8,7% (13 dari 150 unit) pada jarak ± 50 cm, bersamaan dengan kecepatan arus yang lebih rendah ($19,2 \pm 2,3$ cm/detik) dan akumulasi bahan organik yang lebih tinggi ($3,8 \pm 0,6$ mg/L) serta kondisi epifit yang relatif lebih tinggi. Pola tersebut mengindikasikan bahwa jarak tanam yang rapat cenderung menghambat pembaruan massa air di sekitar *thallus*, sehingga berpotensi membatasi distribusi oksigen dan nutrisi serta meningkatkan retensi bahan organik dan epifit. Akumulasi bahan organik selanjutnya dapat mendukung pembentukan biofilm mikroba pada permukaan *thallus* dan meningkatkan tekanan biotik yang berkaitan dengan munculnya gejala *ice-ice*. Sebaliknya, arus yang lebih tinggi pada jarak ± 50 cm diduga meningkatkan proses pembilasan dan mengurangi akumulasi bahan organik serta epifit,

sehingga menciptakan kondisi mikrohabitat yang relatif lebih mendukung kesehatan rumput laut. Namun, hubungan tersebut perlu dipahami sebagai indikasi ekologis dan bukan bukti kausal langsung, karena perkembangan *ice-ice* juga dapat dipengaruhi oleh kondisi fisiologis *thallus*, fluktuasi lingkungan, dan komunitas mikroba.

Hasil penelitian terdahulu mendukung temuan bahwa prevalensi penyakit *ice-ice* lebih tinggi pada jarak tanam rapat (± 25 cm) yang disertai kecepatan arus lebih rendah, akumulasi bahan organik lebih tinggi, serta epifit yang relatif lebih banyak. Tahliluddin dan Terzi (2021) menegaskan bahwa faktor abiotik seperti arus stagnan atau pergerakan air yang lemah merupakan salah satu pemicu utama *ice-ice* karena menghambat pembaruan massa air dan meningkatkan stres fisiologis *thallus*. Ward et al. (2022) menjelaskan bahwa kondisi stres lingkungan mendorong pelepasan eksudat karbon organik terlarut yang menjadi substrat bagi pertumbuhan mikroba oportunistik, sehingga memfasilitasi pembentukan biofilm dan gejala *ice-ice*. Tahliluddin dan Terzi (2024) melaporkan bahwa prevalensi dan intensitas *ice-ice* bervariasi menurut kondisi hidrodinamika dan kedalaman budidaya, dengan farm yang memiliki sirkulasi air lebih baik cenderung menunjukkan tingkat infeksi lebih rendah. Sementara itu, Hurtado et al. (2023) menunjukkan bahwa peningkatan epifit makro dan prevalensi *ice-ice* berkorelasi dengan kondisi lingkungan yang kurang mendukung pertukaran massa air, sehingga jarak tanam yang lebih renggang dapat mengurangi tekanan biotik tersebut.

3.7 Rendemen Karaginan dan *Gel Strength* Berdasarkan Jarak Tanam

Tabel 7. Rendemen karaginan dan gel strength berdasarkan jarak tanam

Parameter mutu	Jarak tanam ke-1 (± 25 cm)	Jarak tanam ke-2 (± 50 cm)	Perubahan
Rendemen karaginan (%)	$32,4 \pm 1,6$	$35,8 \pm 1,4$	+10,5%
Gel strength (g/cm ²)	410 ± 24	512 ± 27	+24,9%
Kadar air (%)	$15,1 \pm 0,8$	$14,4 \pm 0,7$	-4,6%

Sumber: Data hasil pengamatan penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 7, jarak tanam ± 50 cm menghasilkan kualitas karaginan yang lebih baik dibandingkan jarak ± 25 cm, ditunjukkan oleh peningkatan rendemen dari $32,4 \pm 1,6\%$ menjadi $35,8 \pm 1,4\%$ (10,5%) dan *gel strength* dari 410 ± 24 menjadi 512 ± 27 g/cm² (24,9%), serta penurunan kadar air dari $15,1 \pm 0,8\%$ menjadi $14,4 \pm 0,7\%$ (4,6%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa jarak tanam yang lebih renggang tidak hanya berkaitan dengan peningkatan biomassa, tetapi juga menghasilkan bahan baku dengan karakteristik mutu karaginan yang lebih baik. Kondisi ini diduga berkaitan dengan hidrodinamika yang lebih optimal pada jarak ± 50 cm, yang memungkinkan pertukaran oksigen dan nutrisi berlangsung lebih efektif serta mengurangi akumulasi bahan organik dan tekanan epifit pada *thallus*, sehingga mendukung proses fisiologis dan pembentukan polisakarida penyusun karaginan. Peningkatan *gel strength* juga mengindikasikan potensi mutu bahan baku yang lebih baik untuk kebutuhan industri, meskipun pengaruh langsung jarak tanam terhadap karakteristik kimia karaginan tetap perlu dipertimbangkan bersama faktor fisiologis dan lingkungan lainnya.

Hasil penelitian terdahulu mendukung temuan bahwa jarak tanam ± 50 cm menghasilkan rendemen karaginan dan *gel strength* yang lebih tinggi dibandingkan jarak ± 25 cm. Putri et al. (2022) melaporkan bahwa jarak tanam 25 cm menghasilkan rendemen karaginan tertinggi dibandingkan jarak yang lebih rapat pada metode bottom-off, yang dikaitkan dengan kondisi pertumbuhan *thallus* yang lebih optimal. Mulyani (2026) melalui tinjauan sistematis menegaskan bahwa densitas tanam memengaruhi kuantitas dan kualitas fungsional karaginan, di mana densitas intermediate cenderung menghasilkan efisiensi fisiologis yang mendukung pembentukan polisakarida. Suhermanto et al. (2024) menemukan bahwa perbedaan bobot bibit awal (sebagai proksi

densitas) berpengaruh nyata terhadap rendemen karaginan dan gel strength, dengan kombinasi tertentu menghasilkan nilai tertinggi. Aslan et al. (2024) juga menunjukkan bahwa variasi jarak tanam memengaruhi parameter mutu seperti rasio berat kering-basah dan kandungan clean anhydrous weed (CAW), yang mencerminkan kualitas bahan baku karaginan.

3.8 Analisis Finansial dan *Payback Period* Budidaya Rumput Laut

Tabel 8. Analisis finansial budidaya rumput laut berdasarkan jarak tanam

Komponen	Jarak tanam ke-1 (±25cm)	Jarak tanam ke-2 (±50cm)
Investasi awal (Rp)	10.000.000	9.000.000
Biaya operasional/siklus (Rp)	7.800.000	6.750.000
Total biaya (Rp)	7.800.000	6.750.000
Penerimaan/siklus (Rp)	10.000.000	10.200.000
Keuntungan bersih/siklus (Rp)	2.200.000	3.450.000
R/C Ratio	1,28	1,51
Payback Period (hari)	±205	±117
Status kelayakan	Layak	Lebih layak

Sumber: Data hasil pengamatan penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 8, kedua perlakuan jarak tanam menunjukkan kelayakan finansial karena memiliki nilai *R/C Ratio* >1, tetapi jarak tanam ±50 cm memberikan kinerja ekonomi yang lebih baik. Biaya operasional pada jarak ±50 cm lebih rendah, yaitu Rp6.750.000 per siklus dibandingkan Rp7.800.000 pada jarak ±25 cm, sementara penerimaan justru sedikit lebih tinggi, masing-masing Rp10.200.000 dan Rp10.000.000. Kondisi tersebut menghasilkan keuntungan bersih sebesar Rp3.450.000 per siklus pada jarak ±50 cm, lebih tinggi dibandingkan Rp2.200.000 pada jarak ±25 cm. Keunggulan tersebut juga tercermin pada *R/C Ratio* yang meningkat dari 1,28 menjadi 1,51 dan *Payback Period* yang lebih singkat, dari sekitar 205 hari menjadi 117 hari. Dengan demikian, jarak tanam ±50 cm tidak hanya menunjukkan keunggulan pada aspek pertumbuhan, prevalensi *ice-ice*, dan mutu karaginan, tetapi juga memberikan efisiensi ekonomi dan pengembalian investasi yang relatif lebih cepat, sehingga secara keseluruhan lebih prospektif untuk diterapkan dalam pengelolaan budidaya rumput laut.

Hasil penelitian terdahulu mendukung temuan bahwa jarak tanam ±50 cm menghasilkan kinerja finansial yang lebih unggul dibandingkan jarak ±25 cm, dengan *R/C Ratio* lebih tinggi dan *payback period* lebih singkat. Asiddiq (2025) melaporkan bahwa usaha budidaya *Kappaphycus alvarezii* layak secara finansial dengan nilai *R/C Ratio* berkisar 1,74–2,85 tergantung skala, di mana efisiensi biaya operasional menjadi faktor penentu keuntungan. Mantri et al. (2022) menunjukkan bahwa teknik budidaya yang optimal menghasilkan *payback period* lebih pendek (hingga 0,10–0,22 tahun pada evaluasi jangka pendek) serta nilai NPV dan IRR yang menguntungkan. Kusuma (2024) menemukan bahwa budidaya *K. alvarezii* memiliki *R/C Ratio* 1,56 dan menghasilkan keuntungan bersih yang positif, sehingga dinyatakan layak dikembangkan. Sementara itu, penelitian Bio Conferences (2026) menegaskan bahwa posisi dan konfigurasi budidaya memengaruhi kelayakan finansial, dengan perlakuan tertentu menunjukkan BEP, HPP, dan *payback period* yang lebih efisien.

3.9 Sintesis Pengaruh Jarak Tanam terhadap Produktivitas, Kualitas Karaginan, dan Risiko *Ice-Ice*

Tabel 9. Sintesis kinerja budidaya berdasarkan jarak tanam

Indikator utama	Jarak tanam ke-1 (±25cm)	Jarak tanam ke-2 (±50cm)	Perlakuan lebih menguntungkan
Kecepatan arus lokal (cm/detik)	19,2	29,6	50 cm
DGR (%/hari)	2,74	3,28	50 cm
Prevalensi <i>ice-ice</i> (%)	18,7	8,7	50 cm

Rendemen karaginan (%)	32,4	35,8	50 cm
Gel strength (g/cm ²)	410	512	50 cm
R/C Ratio	1,28	1,51	50 cm
Payback Period (hari)	205	117	50 cm

Sumber: Data hasil pengamatan penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 9, jarak tanam ± 50 cm menunjukkan kinerja yang lebih unggul secara konsisten dibandingkan jarak ± 25 cm pada seluruh indikator utama. Kecepatan arus lokal meningkat dari 19,2 menjadi 29,6 cm/detik dan diikuti peningkatan DGR dari 2,74 menjadi 3,28%/hari, sedangkan prevalensi *ice-ice* menurun dari 18,7% menjadi 8,7%. Dari aspek mutu, rendemen karaginan meningkat dari 32,4% menjadi 35,8% dan *gel strength* dari 410 menjadi 512 g/cm². Keunggulan tersebut juga tercermin pada aspek ekonomi melalui peningkatan *R/C Ratio* dari 1,28 menjadi 1,51 dan pemendekan *Payback Period* dari 205 menjadi 117 hari. Secara keseluruhan, hasil sintesis menunjukkan bahwa jarak tanam ± 50 cm memberikan kombinasi yang lebih optimal antara efektivitas hidrodinamika, produktivitas biomassa, pengendalian risiko *ice-ice*, kualitas karaginan, dan efisiensi investasi. Temuan ini memperkuat bahwa pengaturan jarak tanam merupakan komponen penting dalam strategi pengelolaan budidaya *Kappaphycus alvarezii*, khususnya pada sistem budidaya yang menghadapi keterbatasan sirkulasi air di dalam blok budidaya.

Hasil penelitian terdahulu mendukung sintesis bahwa jarak tanam ± 50 cm memberikan kinerja superior secara keseluruhan dibandingkan jarak ± 25 cm pada aspek hidrodinamika, produktivitas, pengendalian *ice-ice*, mutu karaginan, dan efisiensi ekonomi. Mulyani (2026) melalui tinjauan sistematis menegaskan bahwa densitas tanam intermediate menghasilkan keuntungan efisiensi pertumbuhan dan stabilitas fisiologis sekaligus mendukung kualitas karaginan, dengan konteks lingkungan yang memoderasi hasil. Aslan et al. (2024) menunjukkan bahwa variasi jarak tanam memengaruhi daily growth rate (DGR) dan parameter mutu seperti rasio berat kering-basah serta kandungan clean anhydrous weed, yang berkontribusi pada produktivitas biomassa yang lebih baik. Tahiluddin dan Terzi (2024) melaporkan bahwa kondisi sirkulasi air yang lebih baik berkaitan dengan penurunan prevalensi dan intensitas *ice-ice*, sehingga mengurangi risiko kerugian produksi. Van Oort et al. (2025) menemukan bahwa faktor densitas bibit dan manajemen budidaya memengaruhi hasil panen melalui interaksi dengan *ice-ice*, fouling, dan kondisi lingkungan, yang secara keseluruhan mendukung keunggulan konfigurasi jarak tanam yang lebih renggang.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis komprehensif, dapat disimpulkan bahwa pengaturan jarak tanam merupakan faktor penting dalam mengoptimalkan hidrodinamika dan lingkungan mikro budidaya *Kappaphycus alvarezii*. Jarak tanam ± 50 cm mampu meningkatkan kecepatan arus lokal sebesar 54,2% hingga mencapai 29,6 cm/detik serta menekan akumulasi bahan organik terlarut menjadi 2,7 mg/L dibandingkan jarak tanam ± 25 cm. Kondisi hidrodinamika yang lebih baik tersebut diikuti peningkatan performa biologis, ditunjukkan oleh kenaikan laju pertumbuhan harian (DGR) sebesar 19,7% menjadi 3,28%/hari dan penurunan prevalensi penyakit *ice-ice* dari 18,7% menjadi 8,7%, yang mengindikasikan berlangsungnya pembaruan massa air dan proses pembilasan lingkungan mikro yang lebih efektif. Dari aspek mutu hasil, jarak tanam ± 50 cm menghasilkan rendemen karaginan sebesar 35,8% dan *gel strength* sebesar 512 g/cm², sehingga berpotensi meningkatkan nilai tambah bahan baku untuk kebutuhan industri.

Dari perspektif ekonomi, penerapan jarak tanam ± 50 cm menunjukkan efisiensi usaha yang lebih baik, tercermin dari peningkatan *R/C Ratio* dari 1,28 menjadi 1,51 serta pemendekan *Payback Period* dari 205 menjadi 117 hari. Secara keseluruhan, temuan tersebut menunjukkan bahwa pengaturan jarak tanam ± 50 cm yang disesuaikan dengan karakteristik oseanografi lokal dapat menjadi strategi pengelolaan budidaya yang mengintegrasikan produktivitas biomassa, pengendalian risiko penyakit, peningkatan kualitas karaginan, dan efisiensi investasi. Dengan demikian, penerapan jarak tanam berbasis daya dukung perairan tidak hanya berorientasi pada peningkatan keuntungan ekonomi, tetapi juga mendukung pemanfaatan ruang pesisir secara lebih efisien dan pemeliharaan fungsi ekologis perairan dalam kerangka ekonomi biru yang berkelanjutan.

REFERENCES

- Alongi, D. M. (2018). *Blue Carbon: Coastal Sequestration For Climate Change Mitigation*. Springer.
- Abdallah, M. M. S. (2025). *Scientific Research Methodology And Experimental Design In Education And Language Learning Studies: Basics And Guidelines*. ERIC. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED673440.pdf>
- Alhowaish, A. K. (2026). The Hidden Currents Of Marine Economies: Assessing Informal Market Behavior Across Fisheries, Tourism, And Logistics In Saudi Arabia's Eastern Province. *Frontiers In Marine Science*, 13, Article 1750173. <https://doi.org/10.3389/fmars.2026.1750173>
- Asiddiq, M. A. (2025). Analisis Kelayakan Finansial Usaha Budidaya Rumput Laut (*Kappaphycus Alvarezii*) Di Kota Tarakan Kalimantan Utara. Skripsi, Universitas Hasanuddin. <http://repository.unhas.ac.id/id/eprint/49502/>
- Aslan, L. O. M., Yuniar, S., Balubi, M., Sabilu, K., Aslin, L. O., Muskita, W. H., & Boer, D. (2024). Growth And Quality Of The Seaweeds (*Kappaphycus Alvarezii* And *Eucheuma Denticulatum*) In Different Inter Croppings And Planting Distances Using The Longline Method. *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*, 1413(1), 012136. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1413/1/012136>
- Bio Conferences. (2026). Financial Analysis Of *Kappaphycus Alvarezii* Cultivation At Different Distances From The Coastline. *BIO Web Of Conferences*. https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2026/13/bioconf_icms2026_01003.pdf
- Barillé, L., Paterson, I. L. R., Oiry, S., Aris, A., Cook-Cottier, E. J., & Nurdin, N. (2025). Variability Of *Kappaphycus Alvarezii* Cultivation In South-Sulawesi (Indonesia) Related To The Monsoon Shift: Water Quality, Growth And Colour Quantification. *Aquaculture Reports*, 40, 102557. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102557>
- Basyuni, M., Bimantara, Y., & Amelia, R. (2021). *Mengenal Drone: Dalam Sistem Informasi Geografis Dan Aplikasinya Dalam Penelitian Kehutanan*. USU Press.
- Beselly, S. M., Van Der Wegen, M., Reyns, J., Grueters, U., Dijkstra, J. T., & Roelvink, D. (2025). Strategic Mangrove Restoration Increases Carbon Stock Capacity. *Communications Earth & Environment*, 6, 422. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02401-2>
- Byron, C. J., Koch, S. J. I., Callier, M. D., Filgueira, R., & Others. (2024). Indicators For Ecological Carrying Capacity Of Bivalve And Seaweed Aquaculture. *Reviews In Aquaculture*, 16(4), 2010–2022. <https://doi.org/10.1111/Raq.12945>
- Cottier-Cook, E. J., Nagabhatla, N., Asri, A., Beveridge, M., Bianchi, P., Bolton, J., Bondad-Reantaso, M. G., Brodie, J., Buschmann, A., Cabarubias, J., Campbell, I., Chopin, T., De Lombaerde, P., Doumeizel, V., Gachon, C. M. M., Hayashi, L., Hewitt, C. L., Huang, J., Hurtado, A., ... & Malin, G. (2021). Ensuring The Sustainable Future Of The Rapidly Expanding Global Seaweed Aquaculture Industry – A Vision (Policy Brief 06). United Nations University Institute On Comparative Regional Integration Studies (UNU-CRIS). ISBN 978-92-808-9135-5.

- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2021). Can Seaweed Farming Play A Role In Climate Change Mitigation And Adaptation? *Frontiers In Marine Science*, 8(614416). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.614416>
- Efani, A., Sambah, A. B., Sari, M., Tiarantika, R., & Wahyuningsih, N. A. (2025). A TOE–NRBV Integrated Framework For Inclusive Blue Economy Development: Enhancing Supply Chain Sustainability And Small-Scale Fishers’ Livelihood Resilience In Southern Coastal Malang, Indonesia. *Grassroots Journal Of Natural Resources*, 8(3), 1–27. <https://doi.org/10.33002/Nr2581.6853.080312>
- FAO. (2022). The State Of World Fisheries And Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. Food And Agriculture Organization Of The United Nations.
- Fàbregues, S., Sáinz, M., Romano, M. J., Escalante-Barrios, E. L., Younas, A., & López-Pérez, B.-S. (2022). Use Of Mixed Methods Research In Intervention Studies To Increase Young People’s Interest In STEM: A Systematic Methodological Review. *Frontiers In Psychology*, 13, Article 956300.
- Fujita, R., Augyte, S., Bender, J., Brittingham, P., Buschmann, A. H., Chavez, F., Dubois, Fernando, Irawan, H., & Wulandari, R. (2022). Effect Of Spacing On The Growth Rate Of (*Kappaphycus Alvarezii*) Seaweed Using The Off-Bottom Method. *Jurnal Intek Akuakultur*, 5(2), 15–24. <https://doi.org/10.31629/Intek.V5i2.3083>
- K., Froehlich, H. E., Gentry, R., & Yarish, C. (2023). Seaweed Blue Carbon: Ready? Or Not? *Marine Policy*, 155, 105747. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105747>
- Hurtado-Almonacid, J., Reyes-Amigo, T., Yáñez-Sepúlveda, R., Cortés-Roco, G., Oñate-Navarrete, C., Olivares-Arancibia, J., & Páez-Herrera, J. (2024). Development Of Basic Motor Skills From 3 To 10 Years Of Age: Comparison By Sex And Age Range In Chilean Children. *Children*, 11(6), 715. <https://doi.org/10.3390/Children11060715>
- Ihsan, M., Pramesti, R., & Susanto, A. B. (2023). Perbedaan Pertumbuhan Rumput Laut *Kappaphycus Alvarezii* Terhadap Jarak Tanam. *Journal Of Marine Research*, 12(3), 439–446. <https://doi.org/10.14710/Jmr.V12i3.36431>
- Kusuma, G. N. W. (2024). Analisis Kelayakan Usaha Budidaya Rumput Laut *Kappaphycus Striatum* Dan *Kappaphycus Alvarezii* Di Kelurahan Pundata Baji, Kecamatan Labakkang Kabupaten Pangkep. *Skripsi, Universitas Hasanuddin*. <http://repository.unhas.ac.id/eprint/34613/>
- Largo, D. B., Diola, A. G., & Marababol, M. S. (2019). Development Of An Early Warning System For Ice-Ice Disease In Cultivated *Kappaphycus* And *Eucheuma*. *Journal Of Applied Phycology*, 31(2), 875–883. <https://doi.org/10.1007/S10811-018-1587-9>
- Mantri, V. A., Et Al. (2022). Projections For Profitability Assessment Parameters Under Short-Term, Medium-Term And Long-Term Evaluation For Three Farming Techniques Of *Kappaphycus Alvarezii* Along Eastern Coast Of India.
- Mulyani, S. (2026). Optimizing Planting Density And Culture Systems In *Kappaphycus Alvarezii*: A Systematic Review Of Growth, Carbon Dynamics, And Carrageenan Quality. *British Journal Of Biology Studies*, 6(1), 8–14. <https://doi.org/10.32996/Bjbs.2026.6.1.2>
- Palmi, R. S., Andriani, Y., & Et Al. (2025). Effect Of Calcium Silicate Enrichment On Ice-Ice Disease Incidence And Growth Of *Kappaphycus Alvarezii*. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 24(2), 158–171. <https://journal.ipb.ac.id/jai/article/download/60327/31238>
- Parenrengi, A., Rachmansyah, & Suryati, E. (2019). Teknologi Budidaya Rumput Laut Berkelanjutan Di Wilayah Pesisir Tropis Indonesia. *Jurnal Riset Akuakultur*, 14(3), 211–223.
- Programme, U. N. E. (2021). Blue Economy: Oceans As The Great Economic Frontier. UNEP Publishing. <https://www.unep.org/>
- Putri, D. S., Cokrowati, N., Lestari, D. P., & Ahmad, A. (2022). Growth And Content Of Seaweed

- Carrageenan *Kappaphycus Alvarezii* Cultivated At Bottom-Off Method. *Jurnal Biologi Tropis*, 22(2). <https://doi.org/10.29303/Jbt.V22i2.3539>
- Radiarta, I. N. (2020). Teknologi Budidaya Rumput Laut Berkelanjutan Di Wilayah Pesisir Indonesia. *Jurnal Riset Akuakultur*, 15(3), 211–223.
- Stacey, N., Gibson, E., Loneragan, N. R., Warren, C., Wiryawan, B., Adhuri, D. S., Fitriana, R., & Steenbergen, D. J. (2021). Developing Sustainable Small-Scale Fisheries Livelihoods In Indonesia: Trends, Enabling And Constraining Factors, And Future Opportunities. *Marine Policy*, 132, 104654. <https://doi.org/10.1016/J.Marpol.2021.104654>
- Taherdoost, H. (2022). What Are Different Research Approaches? Comprehensive Review Of Qualitative, Quantitative, And Mixed Method Research, Their Applications, Types, And Limitations. *Journal Of Management Science & Engineering Research*, 5(1), 53–63. <https://doi.org/10.30564/Jmsr.V5i1.4538>
- Tahiluddin, A. B., & Terzi, E. (2021). Ice-Ice Disease In Commercially Cultivated Seaweeds *Kappaphycus* Spp. And *Eucheuma* Spp.: A Review On The Causes, Occurrence, And Control Measures. *Marine Science And Technology Bulletin*, 10(3), 234–243. <https://doi.org/10.33714/Masteb.917788>
- Tahiluddin, A. B., & Terzi, E. (2024). Ice-Ice Disease Prevalence And Intensity In *Eucheumatoid* Seaweed Farms: Seasonal Variability And Relationship With The Physicochemical And Meteorological Parameters. *Plants*, 13(15), 2157. <https://doi.org/10.3390/Plants13152157>
- Troell, M., Halling, C., Nilsson, A., Buschmann, A. H., Kautsky, N., & Kautsky, L. (2022). Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) For Sustainable Marine Production. *Reviews In Aquaculture*, 14(1), 45–67. <https://doi.org/10.1111/Raq.12514>
- Valderrama, D., Cai, J., Hishamunda, N., & Ridler, N. (2015). Social And Economic Dimensions Of Carrageenan Seaweed Farming SER - Fisheries And Aquaculture Technical Paper No. 580. FAO.
- Van Oort, P. A. J., Julianto, B., Latama, G., Siradjuddin, I., Rukminasari, N., Walyandra, Z. Z., Ibrahim, I. A., Verhagen, A., & Van Der Werf, A. K. (2025). Yield Determinants Of *Kappaphycus Alvarezii* Seaweed In South Sulawesi, Indonesia. *Journal Of Applied Phycology*, 37, 1153–1170. <https://doi.org/10.1007/S10811-025-03446-8>
- Van Der Meer, J. (2023). The Carrying Capacity Of The Seas And Oceans For Future Sustainable Food Production: Current Scientific Knowledge Gaps. *Food And Energy Security*, 12(4), E464. <https://doi.org/10.1002/Fes3.464>
- Ward, G. M., Kambey, C. S. B., Faisan, J. P., Jr., Tan, P.-L., Daumich, C. C., Matoju, I., Stentiford, G. D., Bass, D., Lim, P.-E., Brodie, J., & Poong, S.-W. (2022). Ice-Ice Disease: An Environmentally And Microbiologically Driven Syndrome In Tropical Seaweed Aquaculture. *Reviews In Aquaculture*, 14(1), 414–439. <https://doi.org/10.1111/Raq.12606>
- Ward, G. M., Kambey, C. S. B., Faisan, J. P., Jr., Tan, P. L., Daumich, C. C., Matoju, I., Stentiford, G. D., Bass, D., & Others. (2022). Ice-Ice Disease: An Environmentally And Microbiologically Driven Syndrome In Tropical Seaweed Aquaculture. *Reviews In Aquaculture*, 14(1), 414–439. <https://doi.org/10.1111/Raq.12606>