

Review Article

Physiological Response of *Kappaphycus Alvarezii* Seaweed to Ice-Ice Disease Exposure

Lalu Arip Fathurrahman¹, Ernin Hidayati^{2*}

¹Master of Biology Study Program, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Mataram University, Mataram, West Nusa Tenggara, Indonesia.

²Master of Biology Study Program, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Mataram University, Mataram, West Nusa Tenggara, Indonesia.

*Correspondence: Lalu Arip Fathurrahman; laluarip15@gmail.com.

Citation: Fathurrahman, L. A. & Hidayati, E. (2026). *Physiological Response Of Kappaphycus alvarezii Seaweed To Ice-Ice Disease Exposure*, SJBIOS, 5(1):41-52

Received: April 2, 2026

Accepted: April 25, 2026

Published: April 30, 2026



Copyright: © 2026 Fathurrahman, L. A. & Hidayati, E. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited

Abstract: *Ice-ice* disease remains a major threat in the cultivation of the seaweed *Kappaphycus alvarezii*, often causing massive crop failures due to a failure to adapt to environmental stress. This study aims to systematically review the physiological responses and metabolite changes of *Kappaphycus alvarezii* during the transition from a healthy state to an infected phase. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted by analyzing 21 scientific articles from Google Scholar, PubMed, Scopus, Sinta, and Portal Garuda databases published between 2016 and 2026. The data synthesis reveals that abiotic stress, particularly sea surface temperatures above 30°C and salinity below 30 ppt, triggers the overproduction of Reactive Oxygen Species (ROS), leading to the degradation of photosynthetic pigments and excessive excretion of organic mucus. This weakening of host defenses triggers a microbiome shift from beneficial endophytic bacteria (*Bacillus*, *Halomonas*) to opportunistic pathogens (*Vibrio*, *Actinobacillus*) that degrade cell walls through agarase enzymatic activity. Although destructive, NPK nutritional intervention through the *luxury consumption* method, modification of planting depth, and the application of natural antibacterials have proven effective in stimulating tissue regeneration. This study concludes that *ice-ice* disease is fundamentally a manifestation of physiological failure that can be mitigated through precise environmental management and technology-based early detection.

Keywords: environmental stress; ice-ice disease; *Kappaphycus alvarezii*; physiological response; systematic review.

PENDAHULUAN

Sektor kelautan dan perikanan merupakan pilar utama dalam ekonomi biru Indonesia, dengan rumput laut *Kappaphycus alvarezii* sebagai komoditas ekspor unggulan penghasil karaginan (Rupert & Rodrigues, 2022). Sebagai salah satu produsen terbesar di dunia, Indonesia sangat bergantung pada stabilitas produksi komoditas ini (Setyawidati et al., 2017). Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat, secara historis telah menjadi sentra budidaya yang strategis karena karakteristik perairannya yang mendukung. Namun, dalam satu dekade terakhir, produktivitas rumput laut di wilayah ini mengalami fluktuasi yang mengkhawatirkan akibat serangan penyakit ice-ice, yang sering kali berujung pada kegagalan panen massal (Nunes et al., 2024).

Secara kritis, penyakit ice-ice bukan sekadar fenomena patologis yang disebabkan oleh infeksi bakteri oportunistik seperti *Vibrio* sp. atau *Pseudomonas*



sp., melainkan merupakan manifestasi dari ketidakmampuan adaptasi fisiologis rumput laut terhadap stres lingkungan yang ekstrem (Emola et al., 2021). Perubahan iklim global telah memicu anomali suhu permukaan laut dan fluktuasi salinitas di perairan Lombok (Amin et al., 2017). Stres abiotik ini memicu produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) pada jaringan rumput laut, yang jika melampaui ambang batas toleransi, akan menyebabkan degradasi pigmen fotosintetik dan kerusakan dinding sel, sehingga memberikan pintu masuk bagi patogen untuk menginfeksi.

Kesenjangan pengetahuan yang ada saat ini terletak pada pemahaman yang masih parsial mengenai mekanisme pertahanan internal *Kappaphycus alvarezii*. Sebagian besar penelitian di Lombok masih berfokus pada teknik budidaya dan upaya mitigasi fisik, namun sangat sedikit yang membedah bagaimana respon fisiologis (seperti efisiensi fotosintesis dan aktivitas enzim antioksidan) serta perubahan profil metabolit terjadi saat transisi dari kondisi sehat ke fase terinfeksi (Patadjai et al., 2019). Padahal, profil metabolit sebagai produk akhir dari ekspresi genetik memberikan gambaran riil mengenai status kesehatan dan strategi bertahan hidup organisme tersebut (Rahman et al., 2020).

Kesenjangan pengetahuan yang ada saat ini terletak pada pemahaman yang masih parsial mengenai mekanisme pertahanan internal *Kappaphycus alvarezii* secara komprehensif (Syafitri et al., 2017). Sebagian besar penelitian masih berfokus pada teknik budidaya dan upaya mitigasi fisik secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis berbagai literatur terdahulu mengenai respons fisiologis dan perubahan seluler pada *Kappaphycus alvarezii* saat bertransisi dari kondisi sehat ke fase terinfeksi. Melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR), penelitian ini diharapkan mampu merangkum mekanisme patologis yang mendasari kerentanan rumput laut terhadap penyakit *ice-ice*. Secara kritis, hasil sintesis ini ditujukan untuk menyediakan landasan teoritis bagi pengembangan strategi pemuliaan rumput laut dan mitigasi lingkungan yang lebih efektif.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode SLR (*Studi Literatur Review*) dengan menerapkan pedoman standar protokol PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). *Literature review* yang digunakan dikelompokkan data-datanya yang sejenis sesuai dengan hasil yang dinilai untuk menjawab tujuan dengan menggunakan metode deskriptif. Jurnal yang sudah sesuai dengan inklusi dikumpulkan menjadi satu dan diringkas yang meliputi nama peneliti (*author*), tahun terbit, nama jurnal (volume dan nomor), judul, metode, dan hasil penelitian serta database. Data yang digunakan yakni data sekunder, dimana data yang diperoleh tidak langsung terjun ke lapangan, tetapi mengambil dari data hasil penelitian terdahulu. Sumber data menggunakan database yang ada di Google Scholar berupa artikel jurnal. Dalam pencarian jurnal menggunakan kata kunci (AND OR NOT or AND NOT) yang dipakai karena lebih detail lagi dalam pencairan jurnal dan dapat mempermudah pencarian jurnal yang diinginkan. Pencarian artikel jurnal bisa menggunakan kata kunci "Bahasa Indonesia" dan "Bahasa Inggris" supaya bisa menjaring literatur internasional yang berkualitas.

Strategi Pencarian Artikel

Pencarian artikel dilakukan pada 5 database yaitu Google Scholar, PubMed, Scopus, Sinta dan Portal Garuda menggunakan kata kunci berbahasa Indonesia dan berbahasa Inggris. Pencarian artikel dengan susunan kata kunci dalam bahasa Indonesia yaitu "*Kappaphycus alvarezii*" OR "rumput laut" AND ("ice-ice" OR "penyakit ice-ice" AND fisiologi OR respons OR metabolisme, didapatkan hasil sebanyak 10 artikel. Pencarian artikel dengan kata kunci berbahasa Inggris yaitu "*Kappaphycus alvarezii*" OR "*Eucheuma cottonii*" AND "ice-ice disease" OR "ice-ice

syndrome" AND physiolog OR metabol OR biochemical. didapatkan hasil sebanyak 87 artikel. Artikel yang didapatkan kemudian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi yang digunakan untuk menyeleksi artikel penelitian primer yaitu artikel full-text berbahasa atau Indonesia yang diterbitkan 10 tahun terakhir pada kurun waktu 2016 hingga 2026, menggunakan desain studi observasional, memuat topik mengenai pengaruh penyakit ice-ice pada rumput laut Akibat cekaman lingkungan dan bagaimana respon fisiologis dari rumput laut (*Kappaphycus alvarezii*) dan lokasi penelitian di seluruh Kawasan Pantai di Indonesia. Adapun kriteria eksklusinya yaitu artikel yang pelaksanaan penelitiannya tidak dalam kurun waktu 10 tahun terakhir meskipun diterbitkan dalam 10 tahun terakhir.

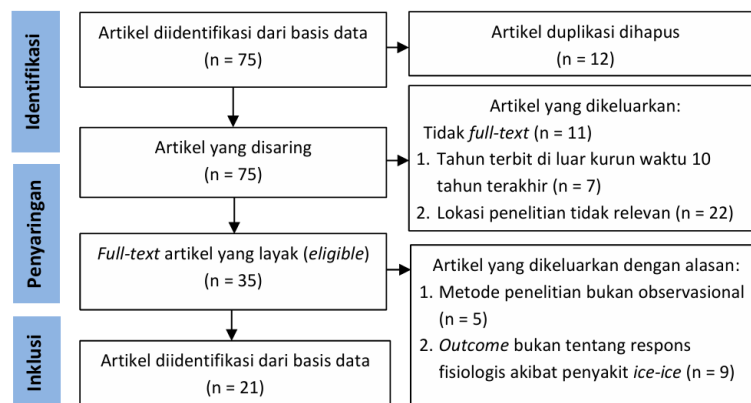
Pemilihan dan Penilaian Kualitas Artikel

Proses seleksi diawali dengan identifikasi awal berdasarkan judul dan abstrak, kemudian dilakukan penyaringan untuk menghapus artikel yang duplikat maupun yang tidak relevan. Selanjutnya, artikel lengkap (*full text*) dibaca untuk memastikan tersedianya informasi terkait penyakit ice-ice, respon fisiologis dari rumput laut (*Kappaphycus alvarezii*), dan faktor penyebab cekaman lingkungan, serta hasil utama penelitian. Data yang diperoleh kemudian diekstraksi dan dicatat secara sistematis, mencakup informasi tentang respon fisiologisnya bagaimana, apakah sama setiap wilayah, dampak yang diakibatkan dari penyakit ice-ice itu dikategorikan sedang atau tinggi, metode yang digunakan dalam penelitian dan hasil penelitian yang didapatkan.

HASIL

Hasil Pencarian Artikel

Pencarian artikel dengan kata kunci berbahasa Indonesia pada database Portal Garuda didapatkan hasil sebanyak 7 artikel. Pada database Google Scholar, berdasarkan kata kunci berbahasa Indonesia diperoleh 50 artikel dan kata kunci berbahasa Inggris diperoleh 12 artikel. Pada database PubMed, pencarian artikel menggunakan kata kunci berbahasa Inggris didapatkan sebanyak 18 artikel. Total artikel awal yang didapatkan yaitu 87 artikel. Setelah dilakukan skrining duplikasi, seleksi kriteria inklusi dan eksklusi serta penilaian kualitas penelitian, diperoleh hasil akhir sebanyak 21 artikel yang diikutsertakan dalam penelitian (Gambar 1).



Gambar 1. PRISMA flow diagram



Sedangkan untuk identitas dan temuan utama dari 21 artikel yang dijadikan literatur disajikan pada Tabel 1. Semua temuan ini akan mendukung dan saling melengkapi untuk menjawab tujuan utama penelitian.

Tabel 1. Hasil Pencarian Artikel

No.	Peneliti (Tahun)	Judul Artikel	Penerbit	Temuan Utama
1.	(Amin et al., 2017)	Modifying bioproduct technology of Medium Density Fibreboard from the seaweed waste <i>Kappaphycus alvarezii</i> and <i>Gracilaria verrucosa</i>	Journal of the Indian Academy of Wood Science	Pemanfaatan limbah rumput laut <i>Kappaphycus alvarezii</i> sebagai bahan baku modifikasi teknologi <i>Medium Density Fibreboard</i> .
2.	(Rahman et al., 2020)	Evaluation of inhibitory potential of mangrove leaves extract <i>Avicennia marina</i> for bacteria causing ice-ice diseases in seaweed <i>Kappaphycus alvarezii</i>	Earth and Environmental Science	Evaluasi potensi inhibisi ekstrak daun mangrove (<i>Avicennia marina</i>) terhadap bakteri patogen pemicu penyakit <i>ice-ice</i> .
3.	(Patadjai et al., 2019)	Use of Common Lantana (<i>Lantana camara</i> Linn.) Extract to Prevent Ice-ice Disease and Trigger Growth Rate of the Seaweed <i>Kappaphycus alvarezii</i>	IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science	Penggunaan ekstrak <i>Lantana camara</i> terbukti berpotensi mencegah penyakit <i>ice-ice</i> dan memicu laju pertumbuhan <i>Kappaphycus alvarezii</i> .
4.	(Rupert & Rodrigues, 2022)	Use of Common Lantana (<i>Lantana camara</i> Linn) Extract to Prevent Ice-ice Disease and Trigger Growth Rate of the Seaweed <i>Kappaphycus alvarezii</i>	IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science	Karakterisasi jalur metabolisme, struktur seluler, dan produksi karaginan dari <i>Kappaphycus alvarezii</i> dalam berbagai kondisi lingkungan.
5.	(Setyawidati et al., 2017)	In situ variability of carrageenan content and biomass in the cultivated red macroalga <i>Kappaphycus alvarezii</i> with an estimation of its carrageenan stock at the scale of the Malasoro Bay (Indonesia) using satellite image processing	Journal of Applied Phycology	Pemetaan variabilitas kandungan karaginan dan estimasi stok biomassa <i>Kappaphycus alvarezii</i> secara <i>in situ</i> di Teluk Malasoro.
6.	(Syafitri et al., 2017)	Genetic diversity of the causative agent of ice-	IOP Conf. Series: Earth and	Identifikasi keragaman genetik dari bakteri/agen patogen penyebab



No.	Peneliti (Tahun)	Judul Artikel	Penerbit	Temuan Utama
		ice disease of the seaweed <i>Kappaphycus alvarezii</i> from Karimunjawa island, Indonesia	Environmental Science	utama penyakit <i>ice-ice</i> di Kepulauan Karimunjawa.
7.	(Nunes et al., 2024)	Uses and applications of the red seaweed <i>Kappaphycus alvarezii</i> : a systematic review	Journal of Applied Phycology	Tinjauan komprehensif mengenai profil metabolit, pemanfaatan, dan aplikasi komersial dari rumput laut merah <i>Kappaphycus alvarezii</i> .
8.	(Emola et al., 2021)	Analisis Pertumbuhan Dan Penyakit Ice-Ice Pada Rumput Laut Jenis <i>Kappaphycus alvarezii</i> (Doty) Doty Hasil Kultur Jaringan Yang Dibudidaya Dengan Metode Yang Berbeda Di Perairan Tablolong	Jurnal Bahari Papadak	Analisis tingkat pertumbuhan dan kerentanan terhadap penyakit <i>ice-ice</i> pada <i>Kappaphycus alvarezii</i> hasil kultur jaringan di Perairan Tablolong.
9.	(Mangun et al., 2023)	Dataset of 16S ribosomal DNA sequence-based identification of endophytic bacteria isolated from healthy and diseased Sabah red algae, <i>Kappaphycus alvarezii</i>	Data in Brief	Analisis mikrobioma menunjukkan rumput laut <i>Kappaphycus alvarezii</i> yang sehat didominasi oleh bakteri endofit dari genus <i>Bacillus</i> , <i>Cytobacillus</i> , dan <i>Priestia</i> . Sebaliknya, genus <i>Vibrio</i> dan <i>Micrococcus</i> ditemukan secara eksklusif hanya pada rumput laut yang sakit atau terinfeksi. Studi ini mengindikasikan bahwa strain <i>Bacillus</i> pada thallus sehat memiliki potensi sebagai agen biokontrol untuk melawan infeksi <i>Vibrio</i> (seperti penyakit <i>ice-ice</i>).
10.	(Albaris & Terzi, 2024)	Ice-Ice Disease Prevalence and Intensity in Euchematoid Seaweed Farms: Seasonal Variability and Relationship with the Physicochemical and Meteorological Parameters	Plant	Prevalensi <i>ice-ice</i> lebih tinggi saat musim kemarau dan pada metode budidaya perairan dalam (<i>deep-water</i>). Terdapat korelasi negatif antara konsentrasi nutrisi amonium dengan keparahan IID, serta korelasi positif antara curah hujan dan panjang bercak penyakit.
11.	(Azizi et al., 2018)	Evaluation of disease resistance and tolerance to elevated temperature stress of the selected tissue-cultured <i>Kappaphycus alvarezii</i> Doty 1985 under optimized laboratory conditions	Biotech	<i>Kappaphycus alvarezii</i> hasil kultur jaringan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap agen penyakit <i>ice-ice</i> (<i>Vibrio</i> sp.) dan cekaman suhu tinggi (30-35°C) dibandingkan bibit budidaya konvensional. Bakteri endofit <i>Halomonas</i> sp. yang ditemukan pada bibit kultur jaringan berpotensi bertindak sebagai agen probiotik penekan patogen.



No.	Peneliti (Tahun)	Judul Artikel	Penerbit	Temuan Utama
12.	(Chang et al., 2017)	ScienceDirect The properties of red seaweed (<i>Kappaphycus alvarezii</i>) and its effect on mammary carcinogenesis	Biomedicine et Pharmacotherapy	Science Direct The properties of red seaweed (<i>Kappaphycus alvarezii</i>) and its effect on mammary carcinogenesis
13.	(Saravanan et al., 2024)	Exploring Seaweed-Associated Marine Microbes: Growth Impacts and Enzymatic Potential for Sustainable Resource Utilization	Indian Journal of Microbiology	Ditemukan sebanyak 18 mikroba laut diisolasi dari rumput laut merah, dengan 12 isolat menunjukkan aktivitas enzim agarase dan/atau karaginase. <i>Pichia fermentans</i> menjadi isolat paling potensial, dan aktivitas karaginase ditemukan lebih tinggi dibandingkan agarase, menunjukkan potensi untuk produksi bioetanol dari biomassa rumput laut.
14.	(Narvarte et al., 2022)	Growth, Nitrate, Uptake Kinetics, and Biofiltration Potential of Eucheumatoids With Deferent Thallus Morphologies	Journal Phycol	<i>Kappaphycus alvarezii</i> galur G-O2 memiliki kapasitas serapan nitrat maksimum (V_{max}) tertinggi, sementara <i>E. denticulatum</i> memiliki efisiensi serapan (K_{max}) dan laju pertumbuhan tertinggi. Keduanya sangat efektif dijadikan biofilter dalam sistem IMTA karena mampu menyerap nitrat dalam jumlah besar (hingga 370 g per kg biomassa dalam 45 hari) dan mengikat CO ₂ , yang secara tidak langsung nutrisi ini dapat membantu mengurangi kerentanan terhadap penyakit ice-ice.
15.	(Sivakumar, 2023)	Molecular docking approaches of biomolecules extracted from red seaweed <i>Kappaphycus alvarezii</i> against hemolysin protein of bioluminescence disease-causing bacteria <i>Vibrio harveyi</i>		Penelitian ini menemukan bahwa ekstrak rumput laut <i>Kappaphycus alvarezii</i> efektif menghambat bakteri <i>Vibrio harveyi</i> melalui interaksi senyawa bioaktifnya dengan protein hemolisin, dengan senyawa seperti cyclotetracosane menunjukkan aktivitas penghambatan tertinggi. Selain itu, penggunaan ekstrak tersebut pada larva udang mampu menurunkan jumlah bakteri, mengurangi faktor virulensi, dan menekan tingkat kematian, sehingga berpotensi sebagai bioagen alternatif dalam budidaya udang.
16.	(Arisandi et al., 2011)	Velocity and Infection Percentage of Ice-Ice Disease on <i>Kappaphycus alvarezii</i> in Bluto Beach Sumenep	Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan	Persentase infeksi ice-ice lebih tinggi pada siang hari dan pada unit yang dekat dengan pantai. Kematian jaringan terjadi cepat dalam 3 hari pasca-infeksi, sehingga panen direkomendasikan 1 hari setelah gejala muncul. Infeksi juga



No.	Peneliti (Tahun)	Judul Artikel	Penerbit	Temuan Utama
17.	(Maryunus, 2018)	Pengendalian Penyakit Ice-Ice Korelasi Musim Dan Manipulasi Terbatas Lingkungan "Ice-Ice" Disease Control of Seaweed Cultivation, <i>Kappaphycus Alvarezii</i> : The Correlation of Season And Limited Environmental Manipulation	Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan	diperparah oleh luka fisik akibat hama seperti teritip. Kekurangan nutrisi pada musim ekstrim memicu penyakit <i>ice-ice</i> . Manipulasi lingkungan berupa perendaman bibit pada pupuk makronutrien (N, P, K) selama 6 jam, penyesuaian kedalaman tanam (50 cm), dan pembersihan rutin terbukti memberikan tingkat kesembuhan 100% pada thallus yang terinfeksi. Fenomena <i>upwelling</i> saat musim timur sangat menunjang pertumbuhan rumput laut secara alami.
18.	(Suharli et al., 2020)	Pengujian Antibakteri Ekstrak Daun Kirinyuh Terhadap Pertumbuhan Bakteri <i>Vibrio</i> Sp. Yang Menyebabkan Penyakit Ice-Ice Pada Rumput Laut (<i>Eucaema Cottoni</i>)	Jurnal Biologica Samudra	Ekstrak daun kirinyuh efektif menghambat bakteri <i>Vibrio</i> sp. penyebab <i>ice-ice</i> . Konsentrasi ekstrak 100% memberikan daya hambat terkuat dengan zona hambat seluas 10,315 mm. Senyawa flavonoid dan tannin dalam daun kirinyuh berperan menginaktivkan sel bakteri dengan cara merusak membran selnya.
19.	(Kurniawati & Harto, 2020)	Rancang Bangun Sistem Identifikasi Penyakit Ice-Ice Pada Backpropagation	Jurnal Elekrika Borneo (JEB)	Sistem deteksi dini komputasi berhasil dikembangkan untuk mengenali infeksi <i>ice-ice</i> melalui identifikasi visual perubahan warna thallus menjadi putih/pucat. Algoritma Jaringan Syaraf Tiruan terbukti sangat andal membedakan rumput laut sehat dan sakit dengan tingkat akurasi 95%.
20.	(Fadli & Aryawati, 2021)	Kajian Fungsi Perendaman Rumput Laut Jenis <i>Kappaphycus alvarezii</i> Pada Air Tawar Untuk Meminimalisir Serangan Penyakit Ice-Ice <i>Kappaphycus alvarezii</i> In Freshwater To Minimize Ice-Ice Disease Attacks	Journal Maspari	Perendaman bibit <i>Kappaphycus alvarezii</i> dalam air tawar selama 7 menit sangat efektif mencegah serangan <i>ice-ice</i> . Semakin lama waktu perendaman (hingga batas 7 menit), semakin baik laju pertumbuhan dan peningkatan bobot rumput laut dibandingkan tanaman yang tidak direndam (kontrol).
21.	(Ihsan et al., 2022)	Identifikasi Bakteri Pada Rumput Laut (<i>Kappaphycus alvaezii</i>)	Jurnal Agroqua	Teridentifikasi 5 genus bakteri patogen pada <i>Kappaphycus alvarezii</i> yang terserang <i>ice-ice</i> , yaitu <i>Actinobacillus</i> spp., <i>Moraxella</i> spp., <i>Alcaligenes</i> spp., <i>Vibrio</i> spp., dan <i>Bacillus</i> spp.

Berdasarkan sintesis data dari 21 literatur yang dianalisis, penelitian ini mengidentifikasi mekanisme respons fisiologis *Kappaphycus alvarezii* yang terbagi



ke dalam beberapa temuan utama terkait profil lingkungan, laju infeksi, perubahan seluler, hingga kemampuan pemulihan jaringan.

Profil Parameter Lingkungan sebagai Pemicu Cekaman

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kemunculan penyakit *ice-ice* memiliki korelasi yang sangat kuat dengan fluktuasi ekstrem pada parameter oseanografi di lokasi budidaya. Cekaman abiotik utama dipicu oleh peningkatan suhu perairan yang melebihi ambang batas optimum 27–29°C menjadi di atas 30°C, terutama pada periode transisi musim. Kondisi ini diperparah oleh penurunan salinitas hingga di bawah 30 ppt akibat tingginya curah hujan yang memicu ketidakseimbangan osmotik pada sel thallus. Selain itu, intensitas cahaya matahari yang sangat tinggi yang disertai dengan kecepatan arus rendah (di bawah 10 cm/detik) menyebabkan akumulasi panas di lapisan permukaan perairan, sehingga mempercepat degradasi pigmen klorofil pada jaringan rumput laut.

Prevalensi dan Kecepatan Infeksi Penyakit

Data prevalensi menunjukkan bahwa penyakit *ice-ice* memiliki laju transmisi yang sangat progresif dan bersifat mematikan dalam waktu singkat. Persentase infeksi ditemukan secara signifikan lebih tinggi pada pengamatan siang hari dibandingkan pagi hari, dengan angka prevalensi mencapai 1,008% pada unit budidaya yang terletak dekat dengan garis pantai. Setelah gejala pemutihan (*bleaching*) terlihat secara visual pada thallus, proses nekrosis atau kematian jaringan dipastikan terjadi dalam rentang waktu yang sangat cepat, yaitu sekitar tiga hari pasca-infeksi. Hal ini menunjukkan bahwa keterlambatan dalam mitigasi lingkungan dapat menyebabkan kehilangan biomassa secara masif dalam hitungan hari.

Karakteristik Morfologi dan Histologi Thallus

Identifikasi morfologi menunjukkan perubahan fase yang jelas, di mana thallus sehat yang awalnya berwarna cokelat atau hijau berubah menjadi transparan, lunak, berlendir, dan akhirnya memutih secara keseluruhan hingga menjadi sangat rapuh. Secara histologis, *thallus* yang terinfeksi mengalami kerusakan struktural yang berat pada tingkat seluler. Sel-sel pada lapisan korteks dalam mengalami atrofi atau penyusutan sehingga susunannya menjadi renggang dan tidak beraturan. Lebih lanjut, dinding sel luar ditemukan mengalami lisis atau hancur total akibat aktivitas enzimatis agarase dari bakteri patogen oportunistik, yang sangat kontras dengan jaringan sehat yang memiliki susunan sel rapat serta dinding sel yang tetap utuh.

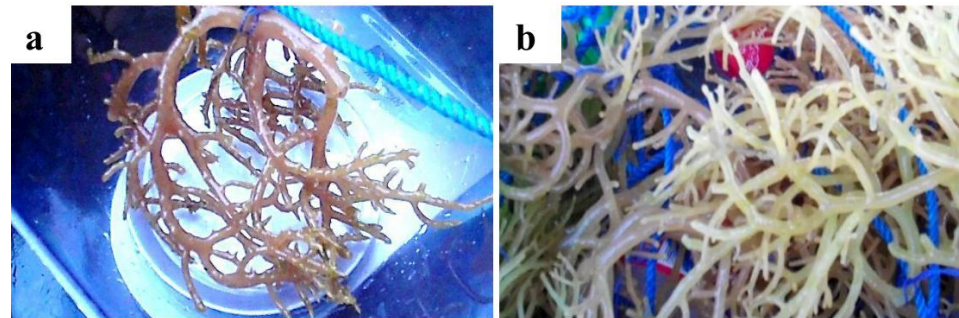
Respons terhadap Intervensi Nutrisi (*Recovery*)

Meskipun bersifat destruktif, hasil studi literatur menunjukkan adanya peluang pemulihan melalui mekanisme respons fisiologis terhadap asupan nutrisi tambahan. Memanfaatkan sifat *luxury consumption*, pemberian unsur Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K) melalui metode perendaman terbukti mampu memicu regenerasi jaringan dan memperbaiki metabolisme seluler. *Thallus* yang berada pada fase awal infeksi menunjukkan perbaikan warna dan peningkatan laju pertumbuhan setelah mendapatkan intervensi nutrisi tersebut. Selain itu, modifikasi teknis berupa penurunan kedalaman tanam hingga 50–100 cm di bawah permukaan air terbukti efektif menstabilkan paparan suhu dan salinitas, sehingga mempercepat proses pemulihan inang dari cekaman lingkungan.

PEMBAHASAN

Penyakit *ice-ice* pada rumput laut *Kappaphycus alvarezii* merupakan manifestasi dari kegagalan adaptasi fisiologis terhadap cekaman lingkungan (*environmental stress*) ekstrem, yang kemudian diikuti oleh infeksi bakteri

oportunistik (Gambar 2). Patogenesis penyakit ini tidak terjadi secara tunggal, melainkan melalui serangkaian kaskade respons fisiologis dan biokimiawi pada jaringan inang.



Gambar 2. Healthy seaweed (a) dan seaweed with ice-ice disease (b)

Berdasarkan tinjauan literatur, mekanisme ini dapat diuraikan melalui beberapa fase berikut:

Pemicu Stres Lingkungan (Cekaman Abiotik)

Faktor abiotik, khususnya anomali suhu dan defisiensi nutrisi, merupakan pemicu primer (*primary impact*) yang menginisiasi stres fisiologis pada *Kappaphycus alvarezii*. Peningkatan suhu air laut, terutama akibat cuaca yang ekstrem atau pemanasan global, menyebabkan kerusakan fisik dan mempengaruhi laju ekofisiologis serta proses metabolik rumput laut. Kenaikan suhu yang mendadak hingga di atas 30°C berkorelasi langsung dengan penurunan laju pertumbuhan spesifik dan memicu timbulnya gejala *ice-ice*. Selain itu, salinitas yang rendah di lapisan permukaan akibat tingginya curah hujan saat musim barat juga mengganggu sistem osmoregulasi seluler rumput laut. Kelimpahan nutrisi, khususnya nitrogen (N) dan fosfat (P), sangat bergantung pada dinamika arus seperti fenomena *upwelling* atau *downwelling*. Kekurangan fosfat di perairan secara langsung menghambat produksi ATP dan NADPH dalam siklus fotosintesis, sehingga menurunkan energi yang dibutuhkan rumput laut untuk pertumbuhan dan pertahanan sel.

Degradasi Fisiologis dan Profil Metabolik

Cekaman lingkungan yang melampaui ambang batas toleransi memicu respons biokimiawi yang berujung pada kerusakan pada tingkat seluler. Stres termal akut menyebabkan penurunan drastis performa fotosintesis, degradasi pigmen (seperti klorofil-a, karotenoid, dan fikobiliprotein), serta peningkatan produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS). Akumulasi ROS merusak struktur lipid dan protein pada membran sel. Terjadi Pelepasan Substansi Organik (Eksudat): Dalam kondisi stres (seperti perubahan salinitas, suhu, maupun intensitas cahaya matahari berlebih di siang hari), jaringan *Kappaphycus alvarezii* akan mengekskresikan substansi organik berupa lendir secara berlebihan. Produksi lendir ini merupakan respons pertahanan awal, namun sekaligus menjadi atraktan bagi mikroorganisme eksternal. Secara histopatologi, thallus yang terinfeksi *ice-ice* mengalami perubahan morfologi seluler secara signifikan. Sel-sel pada lapisan korteks dalam menjadi renggang dan kehilangan bentuk aslinya (gejala nekrotik dan hipoplastik), sementara dinding sel luar menjadi hancur dan tidak utuh.

Infeksi Sekunder oleh Patogen Oportunistik

Pelemahan pertahanan inang akibat stres memberikan ruang bagi patogen laut untuk berkolonisasi. Bakteri yang melimpah di perairan, seperti *Pseudoalteromonas gracilis*, *Pseudomonas* spp., dan *Vibrio* spp., memanfaatkan



lendir organik thallus sebagai substrat. Bakteri ini memproduksi enzim agarase yang mendegradasi polisakarida struktural pada dinding sel rumput laut, menjadikannya agen infeksi sekunder yang mematikan. Pembusukan bakteri ini memicu perubahan warna thallus menjadi putih (pemutihan klorofil). Infeksi ini memiliki kemampuan transmisi secara horizontal, menular dari thallus yang terinfeksi ke thallus yang sehat di sekitarnya, sehingga menyebabkan lisis jaringan, penurunan bobot biomassa secara masif, serta degradasi kualitas karang.

Implikasi Mitigasi dan Manipulasi Lingkungan

Memahami bahwa *ice-ice* diawali oleh stres nutrisi dan oseanografi membuka ruang untuk intervensi budidaya. Intervensi pemupukan makronutrien, khususnya dengan memanfaatkan sifat *luxury consumption* rumput laut terhadap penyerapan Nitrogen, Fosfor, dan Kalium (N, P, K) secara perendaman, terbukti efektif memulihkan thallus yang terinfeksi dengan mengembalikan kapasitas fotosintesis dan pertumbuhan jaringan meristematik. Pengaturan posisi kedalaman penanaman (*long-line*) dari permukaan air (sekitar 50 cm) pada saat cuaca ekstrem sangat krusial untuk menghindarkan *Kappaphycus alvarezii* dari fluktuasi mendadak intensitas cahaya harian dan paparan air tawar di permukaan. Penanganan alternatif lainnya adalah adaptasi lingkungan melalui fungsi perendaman air tawar durasi singkat sebagai upaya *shock therapy* osmotik untuk membersihkan bakteri epifit.

KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan sistematis terhadap 21 literatur, dapat disimpulkan bahwa penyakit *ice-ice* pada *Kappaphycus alvarezii* bukan sekadar infeksi patogen tunggal, melainkan hasil dari kegagalan adaptasi fisiologis terhadap cekaman lingkungan yang ekstrem. Anomali suhu ($>30^{\circ}\text{C}$) dan fluktuasi salinitas rendah (<30 ppt) bertindak sebagai pemicu primer stres oksidatif yang merusak pigmen fotosintetik dan struktur dinding sel. Kerusakan ini memicu pergeseran dominasi mikrobioma dari endofit biokontrol ke arah patogen oportunistik seperti *Vibrio* spp. dan *Actinobacillus* spp., yang mempercepat nekrosis jaringan dalam waktu singkat. Meskipun laju transmisi penyakit sangat cepat (3 hari pasca-infeksi), mekanisme pemulihan adaptif dapat dipicu melalui intervensi nutrisi NPK, perendaman air tawar durasi singkat, serta aplikasi ekstrak bahan alam sebagai antibakteri biologis. Strategi mitigasi di masa depan harus mengintegrasikan penggunaan bibit hasil kultur jaringan yang lebih toleran terhadap stres termal serta penerapan teknologi deteksi dini berbasis kecerdasan buatan untuk mencegah kerugian biomassa secara masif.

REFERENCES

- Albaris, B., & Terzi, E. (2024). Ice-Ice Disease Prevalence and Intensity in Eucheumatoid Seaweed Farms : Seasonal Variability and Relationship with the Physicochemical and Meteorological Parameters. *Plant*, 13, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants13152157>
- Amin, M., Laksmi, A., Kustiawan, S., & Pursetyo, T. (2017). Modifying bioproduct technology of Medium Density Fibreboard from the seaweed waste *Kappaphycus alvarezii* and *Gracilaria verrucosa*. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*. <https://doi.org/10.1007/s13196-017-0185-y>
- Arisandi, A., Marsoedi, Nursyam, H., & Sartimbul, A. (2011). Velocity and Infection Percentage of Ice-Ice Disease on *Kappaphycus alvarezii* in Bluto Beach Sumenep. *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*, 3(1), 47–52.
- Azizi, A., Mohd, N., Mohd, H., Basiran, N., & How, C. (2018). Evaluation of disease resistance and tolerance to elevated temperature stress of the selected tissue-cultured *Kappaphycus alvarezii* Doty 1985 under optimized laboratory conditions. 3 *Biotech*, 8(8), 1–10.



- <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1354-4>
- Chang, V., Okechukwu, P. N., & Teo, S. (2017). ScienceDirect The properties of red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) and its effect on mammary carcinogenesis. *Biomedicine et Pharmacotherapy*, 87, 296–301. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2016.12.092>
- Emola, I. J., Tisera, W. L., Supit, R. R. L., Kase, A. G. O., Longline, M., Pendahuluan, I., Rumpit, I., & Berbasis, L. (2021). Analisis Pertumbuhan Dan Penyakit Ice-Ice Pada Rumpit Laut Jenis *Kappaphycus alvarezii* (Doty) Doty Hasil Kultur Jaringan Yang Dibudidaya Dengan Metode Yang Berbeda Di Perairan Tabololong. *Jurnal Bahari Papadak*, 2(2), 163–170.
- Fadli, M., & Aryawati, R. (2021). Kajian Fungsi Perendaman Rumpit Laut Jenis *Kappaphycus alvarezii* Pada Air Tawar Untuk Meminimalisir Serangan Penyakit Ice-Ice *Kappaphycus alvarezii* In Freshwater To Minimize Ice-Ice Disease Attacks. *Journal Maspari*, 13(2), 83–88.
- Ihsan, B., Kartina, & Fadliansyah, R. (2022). Identifikasi Bakteri Pada Rumpit Laut (*Kappaphycus alvaezii*). *Jurnal Agroqua*, 20(2), 272–279. <https://doi.org/10.32663/ja.v>
- Kurniawati, A., & Harto, D. (2020). Rancang Bangun Sistem Identifikasi Penyakit Ice-Ice Pada Backpropagation. *Jurnal: ElektriKa Borneo (JEB)*, 6(2), 54–59.
- Mangun, V. V., Sugumaran, R., Thau, W., Yong, L., & Yusof, N. A. (2023). Dataset of 16S ribosomal DNA sequence-based identification of endophytic bacteria isolated from healthy and diseased Sabah red algae , *Kappaphycus alvarezii*. *Data in Brief*, 51, 109785. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109785>
- Maryunus, R. P. (2018). Pengendalian Penyakit Ice-Ice Korelasi Musim Dan Manipulasi Terbatas Lingkungan “ Ice-Ice ” Disease Control Of Seaweed Cultivation, *Kappaphycus Alvarezii*: The Correlation Of Season And Limited Environmental Manipulation. *Jurnal Kebijakan Indonesia*, 10, 1–10.
- Narvarte, B. C. V., Genovia, T. G. T., Hinaloc, L. A. R., & Roleda, M. (2022). Growth, Nitrate, Uptake Kinetics, and Biofiltration Potential of Eucheumatoids With Deferent Thallus Morphologies. *Journal Phycol*, 58, 12–22. <https://doi.org/10.1111/jpy.13229>
- Nunes, A., Azevedo, G., Dutra, F., Santos, B. R. dos, Schneider, A. R., Oliveira, E. R., Moura, S., Vianello, F., Maraschin, M., & Lima, G. P. P. (2024). Uses and applications of the red seaweed *Kappaphycus alvarezii*: a systematic review. *Journal of Applied Phycology*, 36, 3409–3450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10811-024-03270-6>
- Patadjai, R. S., Nur, I., & Kamri, S. (2019). Use of Common Lantana (*Lantana camara* Linn) Extract to Prevent Ice- ice Disease and Trigger Growth Rate of the Seaweed *Kappaphycus alvarezii*. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 370. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/370/1/012026>
- Rahman, S. A., Mutalib, Y., Dony, F., Admi, S., Kadir, M., & Pattirane, C. P. (2020). Evaluation of inhibitory potential of mangrove leaves extract *Avicennia marina* for bacteria causing ice-ice diseases in seaweed *Kappaphycus alvarezii*. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 564, 564, 0–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/564/1/012056>
- Rupert, R., & Rodrigues, K. F. (2022). *Carrageenan From Kappaphycus alvarezii (Rhodophyta , Solieriaceae): Metabolism , Structure , Production , and Application*. 13(5). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.859635>
- Saravanan, P., Chatterjee, A., Gourav, K. J. K., & Bhowmick, D. (2024). Exploring Seaweed - Associated Marine Microbes : Growth Impacts and Enzymatic Potential for Sustainable Resource Utilization. *Indian Journal of Microbiology*, 64(2), 593–602. <https://doi.org/10.1007/s12088-024-01205->



W

- Setyawidati, N., Liabot, P. O., Perrot, T., Radiarta, N., & Deslandes, E. (2017). In Situ Variability Of Carrageenan Content And Biomass In The Cultivated Red Macroalga *Kappaphycus alvarezii* With An Estimation Of Its Carrageenan Stock At The Scale Of The Malasoro Bay (Indonesia) Using Satellite Image Processing. *Journal of Applied Phycology*. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1200-9>
- Sivakumar, K. (2023). Molecular Docking Approaches Of Biomolecules Extracted From Red Seaweed *Kappaphycus alvarezii* Against Hemolysin Protein Of Bioluminescence Disease- Causing Bacteria *Vibrio Harveyi*. *Reserch Square*, 1–17.
- Suharli, L., Mangguntungi, B., Rimbun, R., & Chaidir, A. (2020). Pengujian Antibakteri Ekstrak Daun Kirinyuh Terhadap Pertumbuhan Bakteri *Vibrio* Sp. Yang Menyebabkan Penyakit Ice-Ice Pada Rumput Laut (*Eucheuma cottoni*). *Jurnal Biologica Samudra*, 2(1), 1–9.
- Syafitri, E., Prayitno, S., Ma'ruf, W. F., & Radjasa, O. K. (2017). Genetic diversity of the causative agent of ice-ice disease of the seaweed *Kappaphycus alvarezii* from Karimunjawa island, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 55, 2–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/755/1/011001>