

Distribusi Musiman Nitrat dan Fosfat serta Pemodelan Klorofil-a sebagai Indikator Ekologis Keberlanjutan Budidaya *Kappaphycus alvarezii* di Pulau Tarakan

Jimmy Cahyadi^{1,2*}, Slamet Budi Prayitno³, Desrina³, Frida Purwanti⁴

¹Program Doktor Manajemen Sumberdaya Perairan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

²Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Borneo Tarakan
Jl. Amal Lama No 1, Kota Tarakan, Kalimantan Utara 77115 Indonesia

³Departemen Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

⁴Departemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia
Email: jim.borneo@gmail.com

Abstract

Seasonal Distribution of Nitrate and Phosphate and Chlorophyll-a Modeling as an Ecological Indicator for the Sustainability of *Kappaphycus alvarezii* Cultivation in Tarakan Island

Seaweed farming needs essential nutrients for growth. Nitrate and phosphate are essential nutrients for the growth of seaweed algae and phytoplankton produce chlorophyll-a. Chlorophyll-a content is needed in the photosynthesis process and triggers seaweed metabolism to absorb more nutrients. This study describes the relationship between nitrate, phosphate, chlorophyll-a for west and east monsoon waters with other water quality parameters in Tarakan Island. Insitu and exsitu measurements of water quality samples at 14 stations were determined by stratified random sampling in March 2024 for the west monsoon and June 2024 for the east monsoon. The distribution of chlorophyll-a was obtained from observations of the JAXA GCOM-C OCEAN CHLA V3 satellite image and the ocean contour model from BIG. There are significant differences in the distribution of chlorophyll-a, phosphate, and nitrate in the west and east monsoons. Chlorophyll-a distribution in the west monsoon of 0.60-1.10 mg/m³ tends to be higher than that in the east monsoon of 0.50-0.85 mg/m³ divergent pattern and correlates with nitrate, phosphate, water brightness, turbidity, sea surface temperature, current and pH. Water quality in the east and west monsoons supports seaweed farming.

Keywords: Nutrient, Klorofil-a, Monsoon, Seaweed

Abstrak

Budidaya rumput laut membutuhkan nutrisi penting untuk pertumbuhannya. Nitrat dan fosfat merupakan nutrisi penting untuk pertumbuhan algae rumput laut dan fitoplankton penghasil klorofil-a perairan. Kandungan klorofil-a dibutuhkan pada proses fotosintesis dan memicu metabolisme rumput laut menyerap lebih banyak nutrisi. Penelitian ini menjelaskan keterkaitan nitrat, fosfat, klorofil-a perairan musim angin barat dan timur bersama parameter kualitas perairan lainnya di Pulau Tarakan. Pengukuran insitu dan exsitu pada 14 stasiun ditetapkan secara *stratified random sampling* bulan Maret 2024 mewakili musim angin barat dan Juni 2024 musim timur. Distribusi klorofil-a diperoleh dari pemantauan citra satelit JAXA GCOM-C OCEAN CHLA V3 dan pemodelan kontur laut dari BIG. Terdapat perbedaan signifikan distribusi klorofil-a, fosfat dan nitrat musim angin barat dan timur. Distribusi klorofil-a perairan musim barat 0,60-1,10 mg/m³ cenderung tinggi dibandingkan musim timur 0,50-0,85 mg/m³ berpola divergen dan berkorelasi dengan kadar nitrat, fosfat, kecerahan perairan, kekeruhan, suhu permukaan laut, arus dan pH. Kualitas perairan musim angin timur dan barat mendukung budidaya rumput laut.

Kata Kunci: Nutrien, Klorofil-a, Musim, Rumput Laut

PENDAHULUAN

Pulau Tarakan merupakan salah satu pulau terletak di utara Negara Indonesia berbatasan dengan Negara Malaysia Timur. Sesuai peraturan daerah Provinsi Kalimantan Utara nomor 14 Tahun 2018 tentang Rencana Zonasi Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil (RZWP3K) Tahun 2018-2038 ditetapkan pesisir Timur Pulau Tarakan merupakan kawasan pemanfaatan umum budidaya laut (KPUBL) yang telah mengalami perbaikan zonasi seluas 11.714 Ha dengan potensi utama budidaya rumput laut tradisional *Kappaphycus alvarezii* secara longline.

Dukungan kesesuaian lokasi, parameter fisika kimia perairan dan aksesibilitas sangat menentukan keberhasilan keberlanjutan budidaya *Kappaphycus alvarezii* (Sarjito *et al.*, 2022). Algae rumput laut *Kappaphycus alvarezii* membutuhkan beberapa nutrisi anorganik dan stabilitas produktivitas primer untuk mendukung pertumbuhan alga secara optimal. Penelitian Dzakwan *et al.*, (2023) menunjukkan terdapat korelasi positif antara konsentrasi nitrat dan fosfat terhadap pertumbuhan algae fitoplankton di perairan singkawang meskipun tingkat hubungan tersebut tergolong lemah. Konsentrasi nitrat dan fosfat di perairan tropis merupakan faktor pembatas utama bagi distribusi dan kelimpahan makroalga (Basyuni *et al.*, 2024)

Kandungan klorofil-a dapat menjadi indikator produktivitas primer, kesuburan suatu kawasan perairan serta berperan dalam kestabilan rantai makanan biota laut dari fitoplankton (Diogoul *et al.*, 2021). Kandungan klorofil-a yang tinggi akan meningkatkan fotosintesa serta memicu metabolisme rumput laut menyerap lebih banyak nutrisi (Widiarati *et al.*, 2022). Jenis spesies, umur, musim dan keadaan lingkungan kualitas perairan serta penetrasi cahaya mempengaruhi variasi kandungan nutrisi rumput laut (Lumbessy *et al.*, 2020). Pemodelan klorofil-a perairan berbasis citra satelit khusus seperti JAXA GCOM-C OCEAN CHLA V3 belum banyak dilakukan, citra ini memungkinkan pola visualisasi dalam cakupan luas dan temporal (Murakami, 2020). Isada *et al.*, (2022) menilai akurasi estimasi konsentrasi klorofil-a secara spasial dan temporal data penginderaan jauh di perairan pesisir Hokkaido, Jepang, telah memanfaatkan pantauan data satelit dari GCOM-C.

Kajian integratif pola tiupan angin musiman (barat dan timur) terhadap distribusi nitrat (NO_3), fosfat (PO_4) dan pemanfaatan satelit khusus visualisasi pemodelan nilai klorofil-a dalam cakupan luas serta keterkaitan kualitas perairan lainnya dalam konteks keberlanjutan budidaya *Kappaphycus alvarezii* di perairan pesisir belum banyak dilakukan. Pendekatan integratif ini akan memberikan gambaran yang lebih holistik status ekologis di perairan pesisir Pulau Tarakan dalam konteks indikator nutrisi penting nitrat, fosfat, klorofil-a dan keterkaitan kualitas air lainnya dalam memastikan keberlanjutan budidaya rumput laut di perairan zonasi pesisir Pulau Tarakan. Informasi penelitian ini sangat penting bagi semua pihak sebagai sistem deteksi dini nantinya seperti merancang zonasi adaptif, rotasi budidaya dan pengaturan padat tebar.

MATERI DAN METODE

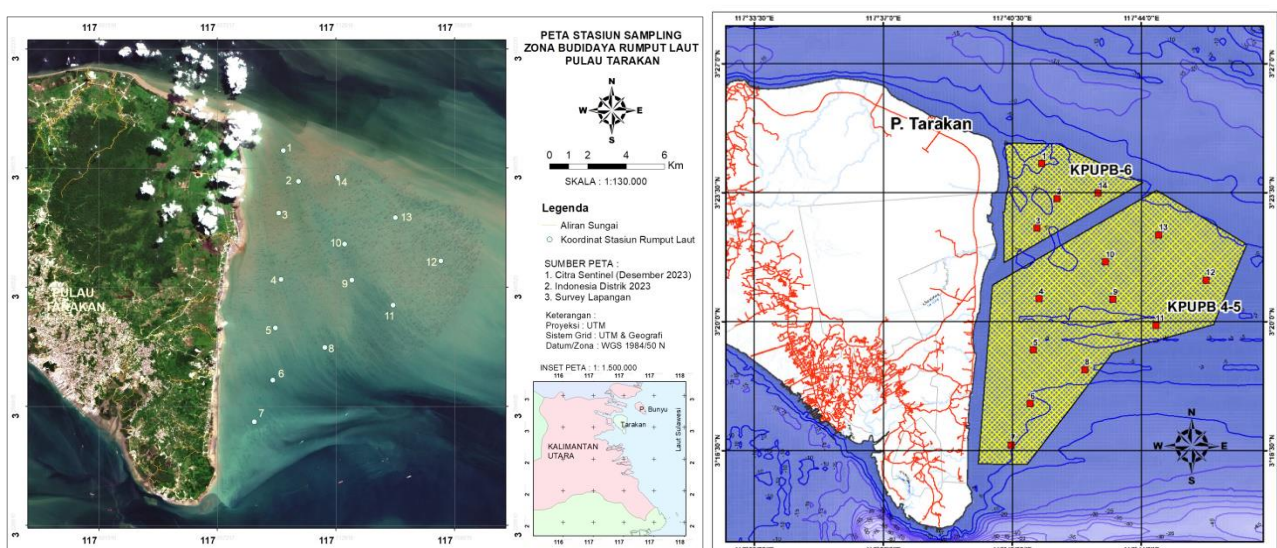
Penelitian ini dilakukan di perairan pesisir Pantai Amal Pulau Tarakan pada zonasi budidaya rumput laut (Gambar 1). Pengukuran sampel kualitas perairan dilakukan secara insitu dan exsitu pada awal bulan Maret 2024 untuk mewakili musim angin barat dan periode akhir bulan Juni 2024 untuk mewakili musim angin timur. Stasiun pengamatan ditetapkan secara *stratified random sampling* sebanyak 14 titik berdasarkan zona budidaya aktif, karakteristik geomorfologi dan potensi sebaran arus perairan. Wadah menyimpan sampel air laut untuk pengujian nitrat, fosfat dan kekeruhan mengacu BSN (2021) menggunakan botol plastik putih polietilena 250 ml dan botol kaca winkler 250 ml untuk pengujian oksigen terlarut. Semua wadah botol dan tutup sampel telah dicuci dengan pembersih bebas fosfat, dibilas air bersih kemudian dibilas asam klorida (HCl) rasio 1:1 dan dibilas kembali menggunakan air bersih bebas mineral diulang 3 kali lalu dikeringkan. Sampel air laut diambil pada kondisi hari cuaca cerah berawan secara manual dalam kolom air laut permukaan dibilas ulang tiga kali lalu kemudian terisi sampai penuh, ditutup rapat tanpa

gelembung udara dan disimpan dalam coldbox berpendingin untuk dianalisis di laboratorium pada hari yang sama. Analisa fosfat diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang (λ) = 880 nm secara asam askorbat mengikuti SNI 106-6989.31-2005, kemudian analisa nitrat diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang (λ) = 410 nm secara brusin sulfat mengikuti SNI 06-2480-1991 dan kekeruhan dengan nefelometer mengikuti SNI 06-6989.25-2005.

Bersamaan dengan pengambilan sampel air laut untuk nitrat, fosfat dan kekeruhan juga diambil sampel air laut untuk oksigen terlarut (DO) menggunakan botol kaca winkler 250 ml steril secara manual kedalam kolom air permukaan dibilas ulang tiga kali kemudian diisi hingga penuh, diberikan 1 ml $MnSO_4$ dan 1 ml larutan alkali iodida kemudian dikocok sampai larutan homogen hingga terdapat endapan coklat kemudian botol ditutup rapat disimpan dalam coldbox berpendingin untuk dianalisa di laboratorium pada hari yang sama secara yodometri mengikuti SNI 06-6989.14-2004. Selanjutnya secara insitu dilakukan pengukuran suhu permukaan laut menggunakan termometer air raksa, pH dengan pH meter, salinitas dengan *Hand Refraktometer*, kecerahan dengan *secchi-disc*, serta arus perairan permukaan dengan layang arus dan kompas.

Nilai klorofil-a perairan laut menggunakan data hasil pemantauan citra satelit khusus klorofil-a yaitu JAXA GCOM-C OCEAN CHLA V3 (*Japan Aerospace Exploration Agency Global Change Observation Mission Climate Ocean Chlorofil-A version 3*) yang telah diunduh pada platform data katalog geospasial *Google Earth Engine* tautan <https://earthengine.google.com>. Variabel *scripts* dataset citra yang di input meliputi rentang waktu siang hari bulan Desember 2023 hingga Maret 2024 untuk musim angin barat dan periode bulan Mei hingga September 2024 untuk musim angin timur, dilanjutkan koreksi geometry dan koreksi atmosferic tutupan awan kurang 10 % (Murakami, 2020). Proses konfigurasi output visualisasi horizontal *image* klorofil-a diperoleh berdasarkan nilai *average* piksel dalam *scripts* dataset (Isada *et al.*, 2022).

Pembuatan peta lokasi penelitian menggunakan data raster citra Sentinel akuisisi Desember 2023 diunduh pada tautan *Google Earth Engine* dan kontur kedalaman laut dari Badan Informasi Geospasial Indonesia pada tautan <http://batnas.big.go.id/> diolah dan dikonfigurasi pada piranti lunak ArcGIS 10.3.1. Selanjutnya analisa pola distribusi konsentrasi nutrisi nitrat fosfat dalam area penelitian dilayout secara grafis dan informatif menggunakan teknik interpolasi berbasis *spline*. Teknik interpolasi *spline* akan menghasilkan nilai berfluktuasi secara linier sebagai fungsi jarak dari nilai sampel terdekat serta tidak akan dipengaruhi oleh lokasi data sampel (Ahmad dan Deeba, 2020). Analisis pengolahan data *scripts* di *layout* pada piranti lunak ArcGIS 10.3.1 untuk menghasilkan gambar horizontal 2 dimensi apakah berpola divergen atau konvergen.



Gambar 1. Peta Sampling dan Kontur Zona Budidaya Rumput Laut Pulau Tarakan

Keseluruhan data indikator ekologis perairan dianalisis terhadap keterkaitan pola hubungan antara kadar nitrat, fosfat, nilai klorofil-a serta dengan kualitas perairan laut lainnya melalui pengujian statistik bivariat *Spearman Rank Correlation* (Papageorgiou, 2022). serta analisa perbedaan nilai klorofil-a, nitrat dan fosfat pada musim angin barat dan timur melalui pengujian statistik *Wilcoxon signed rank test* menggunakan aplikasi *IBM SPSS Statistics*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan kadar konsentrasi fosfat di perairan cenderung tinggi saat musim angin barat antara 0,004-0,083 mg/L ($0,036 \pm 0,033$ mg/L) dibanding saat memasuki musim timur antara 0,001-0,075 mg/L ($0,020 \pm 0,023$ mg/L). Berbeda sebaliknya pada kadar nitrat perairan antara 0,12-0,36 mg/L ($0,18 \pm 0,06$ mg/L) saat musim angin timur dan 0,09-0,19 mg/L ($0,13 \pm 0,03$ mg/L) saat masuk musim angin barat (Tabel 1). Terdapat perbedaan signifikan ($P < 0,05$) kandungan kadar fosfat dan nitrat di perairan. Keberadaan nutrisi ini berkorelasi positif dengan kelimpahan klorofil-a perairan terutama nitrat perairan (r_s sebesar 0,37) saat musim angin barat dan (r_s sebesar 0,65) saat musim angin timur serta negatif terhadap fosfat perairan. Distribusi kadar nitrat dan fosfat perairan musim barat dan timur pada zona budidaya rumput laut ditunjukkan pada Gambar 2.

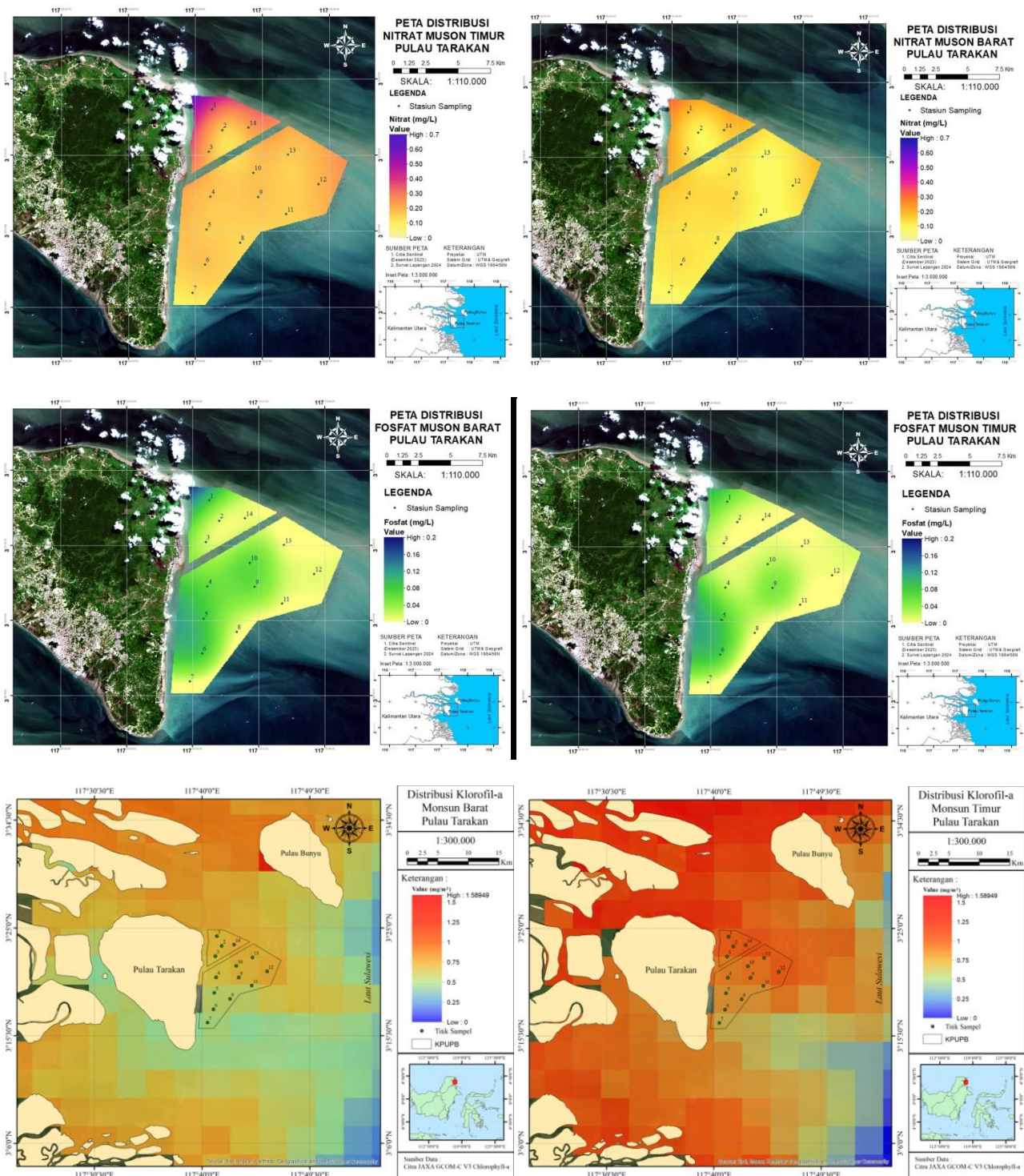
Keberadaan kadar fosfat dan nitrat di perairan dibutuhkan sebagai nutrisi esensial pertumbuhan rumput laut dan merupakan faktor pembatas, sebab nitrogen merupakan penyusun protein dalam pertumbuhan serta fosfat diperlukan untuk energi (Pauwah *et al.*, 2020). Anugrah *et al.*, (2022) menambahkan bahwa nitrat perairan diperlukan sebagai pembentuk cadangan makanan yaitu senyawa organik protein, karbohidrat, lemak serta unsur lainnya. Penelitian Anugrah *et al.* (2022) menunjukkan, pertumbuhan *Kappaphycus alvarezii* di perairan Lakeba Bau Bau selama 45 hari mencapai 375 gr dari bibit awal 50 g pada kadar fosfat perairan kisaran 0,018-0,023 mg/L dan nitrat 0,06-0,07 mg/L. Pengamatan Widiarati *et al.*, (2022) terhadap rerata konsentrasi nutrisi nitrat fosfat dan klorofil-a alami pada budidaya rumput laut di perairan Pulau Seruni kisaran 0,005 mg/L, 0,001 mg/L dan 0,902 mg/m³.

Konsentrasi klorofil-a perairan (Tabel 1) saat musim angin timur cenderung tinggi antara 0,60-1,10 mg/m³ ($0,90 \pm 0,15$ mg/m³) dan sedikit menurun saat musim angin barat antara 0,50-0,85 mg/m³ ($0,69 \pm 0,13$ mg/m³). Pola distribusi klorofil-a perairan cenderung dipengaruhi arus pasang surut perairan kawasan estuari Delta Kayan dari arah barat dan utara Delta Sembakung menuju Pulau Tarakan membawa nutrisi serta berpola divergen ke tenggara pantai (Gambar 2). Pola distribusi ini juga sama pada sebaran nilai klorofil-a di perairan Mojo Pemalang berpola divergent dari utara ke selatan dekat aktivitas masyarakat, kawasan estuari, pasang surut dan gelombang (Maharani *et al.*, 2024). Hasil uji *Wilcoxon* menunjukkan terdapat perbedaan signifikan ($P < 0,05$) nilai klorofil-a perairan musim angin barat dan timur Pulau Tarakan.

Kamlasi *et al.* (2024) menambahkan hasil konsentrasi klorofil-a di kawasan budidaya rumput laut perairan Pulau Semau berbeda saat bulan Oktober kisaran 0,29–4,56 mg/m³ kemudian menurun masuk bulan Desember kisaran 0,09–2,82 mg/m³. Klorofil-a Pulau Tarakan pada musim angin timur termasuk kesuburan perairan tingkat oligotrofik (stasiun 1, 2, 3, 12, 13, 14) hingga mesotrofik (stasiun 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11), Penelitian Garini *et al.*, (2021) terhadap kandungan klorofil-a di perairan kendal memperlihatkan pada kategori mesotrofik (kesuburan sedang) ≥ 1 -3 mg/m³. Sebelumnya, Maradhy *et al.*, (2022) mengamati klorofil-a perairan permukaan di pesisir pantai Timur Pulau Tarakan secara eksitu menunjukkan kisaran 0,13-3,24 mg/m³. Klorofil-a perairan bukan faktor pembatas, namun kandungan klorofil-a perairan yang tinggi akan meningkatkan keaktifan fotosintesis dan memicu metabolisme organisme rumput laut menyerap lebih banyak nutrisi (Widiarati *et al.*, 2022).

Kecerahan perairan pada zonasi budidaya rumput laut Pulau Tarakan relatif baik saat musim angin barat ($2,07 \pm 0,83$ m) dan ($1,93 \pm 1,03$ m) saat musim timur (Tabel 2). Kecerahan perairan berkaitan terhadap produktivitas suatu perairan, menunjang fotosintesis serta respirasi

biota air (Demars *et al.*, 2024). Tingkat kecerahan perairan pantai dan laut ideal mendukung budidaya dan pertumbuhan rumput laut pada kisaran 1 hingga 12 meter (Sulistiawati *et al.*, 2020). Penelitian Muliadi (2024) terhadap tingkat kecerahan perairan optimal pada pertumbuhan *Eucheuma cottonii* di perairan Desa Tapi-Tapi Sulawesi Tenggara diperoleh pada kisaran kecerahan 1,2-1,7 meter.



Gambar 2. Sebaran Nitrat, Fosfat dan Klorofil-a Perairan Musim Barat dan Timur

Tingkat kekeruhan perairan di lokasi penelitian (Tabel 2) pada saat musim angin barat ($5,9 \pm 5,2$ NTU) dan saat musim angin timur ($4,9 \pm 5,2$ NTU). Sarjito *et al.*, (2022) menjelaskan, berkurangnya penetrasi sinar matahari kedalam kolom perairan laut dipengaruhi oleh penyerapan air, adanya penyerapan zat organik dan partikel-partikel warna, penyebaran molekul air, serta penyebaran partikel-partikel suspensi dalam kolom air. Kekeruhan perairan karena adanya plankton, mendukung aktivitas fotosintesa dan produktivitas total perairan. (Ketjulan *et al.*, 2024), menambahkan tingkat kekeruhan yang masih layak untuk pertumbuhan rumput laut berkisar antara 10-20 NTU.

Kecepatan arus perairan permukaan (Tabel 2) saat musim angin barat pada ($15,8 \pm 5,8$ cm/detik) dominan lebih kuat bergerak dari arah utara ke selatan pulau dibanding musim timur ($13,5 \pm 5,6$ cm/detik) bergerak dari arah selatan ke utara serta dipengaruhi tipe pasut perairan campuran condong ke harian ganda. Kahtijah *et al.*, (2022) menjelaskan hasil penelitian karakteristik arah dan kecepatan angin barat perairan Pulau Tarakan rerata dominan kuat dibanding angin timur, memicu kecepatan arus dan gelombang relatif lemah hingga sedang < 1m. Arus dan gelombang berperan penting dalam sirkulasi nutrisi, distribusi kualitas air fisika serta kimia perairan (Sarjito *et al.*, 2022; Ketjulan *et al.*, 2024).

Tabel 1 . Nilai Nitrat, Fosfat dan Klorofil-a Zonasi Budidaya Rumput Laut

No	Koordinat Stasiun		Musim Angin Barat			Musim Angin Timur		
	Lintang Utara	Bujur Timur	Nitrat (mg/L)	Fosfat (mg/L)	Klorofil-a (mg/m ³)	Nitrat (mg/L)	Fosfat (mg/L)	Klorofil-a (mg/m ³)
1	3° 24' 17"	117° 41' 17"	0,19	0,083	0,75	0,36	0,042	1,00
2	3° 23' 26"	117° 41' 43"	0,10	0,012	0,75	0,16	0,005	1,00
3	3° 22' 31"	117° 41' 09"	0,15	0,017	0,75	0,20	0,006	1,00
4	3° 20' 40"	117° 41' 13"	0,15	0,064	0,65	0,17	0,027	0,85
5	3° 19' 17"	117° 41' 03"	0,13	0,083	0,55	0,16	0,055	0,75
6	3° 17' 49"	117° 40' 59"	0,13	0,078	0,55	0,17	0,075	0,75
7	3° 16' 39"	117° 40' 27"	0,09	0,008	0,50	0,12	0,009	0,60
8	3° 18' 44"	117° 42' 27"	0,12	0,008	0,55	0,14	0,004	0,75
9	3° 20' 39"	117° 43' 13"	0,14	0,058	0,80	0,17	0,030	0,95
10	3° 21' 39"	117° 43' 01"	0,13	0,065	0,80	0,17	0,027	0,95
11	3° 19' 55"	117° 44' 23"	0,09	0,006	0,55	0,15	0,001	0,75
12	3° 21' 11"	117° 45' 44"	0,12	0,008	0,85	0,19	0,002	1,10
13	3° 22' 24"	117° 44' 27"	0,09	0,004	0,80	0,16	0,002	1,00
14	3° 23' 32"	117° 42' 49"	0,16	0,006	0,85	0,22	0,001	1,10
Mean			0,13	0,036	0,69	0,18	0,020	0,90
± SDev			0,03	0,033	0,13	0,06	0,023	0,15

Tabel 2 . Rerata Kualitas Perairan Zonasi Budidaya Rumput Laut

Variabel	Nilai Mean ± Sdev	
	Musim Angin Barat	Musim Angin Timur
Kecerahan (m)	2,07 ± 0,83	1,93 ± 1,03
Kekeruhan (NTU)	5,9 ± 5,2	4,9 ± 5,2
Kecepatan Arus (cm/detik)	15,8 ± 5,8	13,5 ± 5,6
Salinitas (mg/L)	25,6 ± 0,6	25,9 ± 1,0
Suhu Permukaan Laut (°C)	31,1 ± 0,7	30,4 ± 0,5
Oksigen Terlarut (mg/L)	8,0 ± 0,3	8,1 ± 0,4
pH	8,0 ± 0,3	7,6 ± 0,3
Kedalaman Laut (m)	3,3 ± 0,0	3,3 ± 0,0

Salinitas perairan penelitian pada saat musim angin barat ($25,9 \pm 0,6$ mg/L) dan musim timur ($25,6 \pm 1,0$ mg/L) (Tabel 2). Salinitas memiliki hubungan yang erat dengan konsentrasi klorofil-a dan kelimpahan fitoplankton. Oktaviana *et al.*, (2023), menambahkan terdapat korelasi positif salinitas dengan klorofil-a, nitrat, ortofosfat dan fitoplankton di perairan pantai Wates, Rembang. Salinitas mempengaruhi pertumbuhan dan laju pembelahan sel pada fitoplankton, distribusi dan produktivitas fitoplankton. Salinitas perairan di zonasi penelitian masih cukup mendukung kelangsungan budidaya rumput laut. Pengamatan pertumbuhan rumput laut *Eucheuma cottonii* hasil kultur jaringan selama 28 hari terhadap salinitas 25 ppt menunjukkan rerata setiap minggu tallus tumbuh kisaran 0 - 0,5 cm (Moher *et al.*, 2024). Menurut BSN (2022) kisaran ideal salinitas perairan laut bagi rumput laut antara 28-34 mg/L.

Suhu permukaan laut penelitian (Tabel 2) musim angin barat sedikit tinggi ($31,71 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$) banding musim timur ($30,4 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Pengamatan pertumbuhan relatif *K. alvarezii* di perairan Desa Tapi-Tapi menunjukkan pertambahan bobot dari rerata bibit awal 21 gram menjadi 79,18 gram pada minggu keempat pada suhu perairan $26-29^{\circ}\text{C}$ (Muliyadi, 2024). Umam dan Arisandi (2021) menambahkan suhu perairan ideal untuk mendukung kehidupan *K. alvarezii* pada kisaran $24-31^{\circ}\text{C}$. Badan Standarisasi Nasional (BSN, 2022) menegaskan kisaran nilai suhu perairan ideal bagi kehidupan budidaya rumput laut di pantai adalah antara 26°C sampai 32°C .

Oksigen terlarut penelitian (Tabel 2) dalam kondisi mendukung kehidupan rumput laut baik pada saat musim angin barat ($8,0 \pm 0,3$ mg/L) maupun saat musim timur ($8,1 \pm 0,4$ mg/L). Kecukupan konsentrasi oksigen terlarut di perairan untuk kehidupan *K. Alvarezii* minimum 4-6 mg/l dan optimum >6 mg/L (Hardan *et al.*, 2020). Pengamatan Muliadi (2024) terhadap kelarutan oksigen alami pada budidaya *K. alvarezii* yang menjadi mata pencaharian masyarakat di perairan Desa Tapi-Tapi menunjukkan kisaran 7,2 hingga 7,5 mg/L. Derajat kemasaman perairan penelitian (Tabel 2) dalam kondisi mendukung kehidupan rumput laut baik pada saat musim angin barat ($8,0 \pm 0,3$) juga pada saat musim timur ($7,6 \pm 0,3$). Badan Standarisasi Nasional (BSN, 2022) menegaskan bahwa kisaran nilai pH ideal bagi kehidupan budidaya rumput laut adalah antara 7 sampai 8,5.

Kedalaman laut pada zonasi budidaya rumput laut berdasarkan pembacaan kontur kedalaman laut (Gambar 1) rerata 5 meter dikurangi nilai muka air laut rerata dari surut terendah dalam setahun (LLWL) yaitu 1,75 m (175 cm) dari muka air laut rerata (MSL). Hasil kedalaman perairan dalam kondisi muka air laut rerata diperoleh kisaran 3,3 m. (Ketjulan *et al.*, 2024) menjelaskan, kedalaman 1 m sampai 10 m ideal bagi budidaya rumput laut secara metode *longline*, dapat memudahkan dalam perawatan, pemeliharaan dan pemanenan serta dapat menekan biaya operasional. Badan Standarisasi Nasional (BSN, 2022) menambahkan syarat kedalaman perairan untuk kehidupan budidaya rumput laut di pantai minimal 2 meter saat surut terendah.

Analisis bivariat *Spearman* nilai klorofil-a perairan musim angin timur menunjukkan berkorelasi positif terhadap nitrat (r_s 0,370), kekeruhan (r_s 0,315), salinitas (r_s 0,759), suhu permukaan laut (r_s 0,21), oksigen terlarut (r_s 0,189) dan pH (r_s 0,178) serta negatif terhadap fosfat (r_s -0,209), kecerahan (r_s -0,433) dan arus perairan (r_s -0,375). Saat musim angin barat nilai klorofil-a perairan menunjukkan korelasi positif terhadap nitrat (r_s 0,653), fosfat (r_s 0,141), kekeruhan (r_s 0,523), salinitas (r_s 0,448), suhu (r_s 0,018), oksigen terlarut (r_s 0,156) dan pH (r_s 0,069) serta negatif terhadap kecerahan (r_s -0,404) dan arus perairan (r_s -0,299). Hubungan positif distribusi klorofil-a terhadap nutrisi terutama unsur nitrat baik kondisi saat angin musim barat dan saat musim angin timur menunjukkan indikator ekologis perairan cukup untuk kelangsungan kehidupan budidaya rumput laut.

Sesuai pendapat Widarati *et al.* (2022) bahwa kecukupan distribusi nutrisi dan nilai klorofil-a di perairan, mengindikasikan proses fotosintesis berlangsung baik dan memicu metabolisme rumput laut menyerap banyak nutrisi. Berdasarkan hasil penelitian indikator nutrisi penting nitrat, fosfat, klorofil-a dan keterkaitan kualitas air lainnya dapat mendukung pertumbuhan budidaya rumput laut di kawasan pemanfaatan umum budidaya laut (KPUBL) zonasi rumput laut pesisir Timur

Pulau Tarakan sepanjang waktu musim tanpa rotasi budidaya namun perlu kajian lanjutan untuk analisa lebih spesifik pada kondisi musim peralihan tahunan yang belum dijelaskan dalam penelitian ini.

KESIMPULAN

Pola distribusi dan konsentrasi klorofil-a perairan saat musim angin timur cenderung tinggi antara 0,60-1,10 mg/m³ dan menurun sedikit saat musim angin barat antara 0,50-0,85 mg/m³ berpola divergen. Kondisi ini juga diikuti kadar nitrat perairan saat musim angin timur pada kisaran 0,12-0,36 mg/L dan kisaran 0,09-0,19 mg/L saat musim barat. Sementara kadar fosfat perairan saat musim angin timur pada kisaran 0,001-0,075 mg/L dan kisaran 0,004-0,083 mg/L saat musim barat. Parameter kualitas perairan yang mempengaruhi meliputi salinitas, arus perairan, suhu perairan, kedalaman, kekeruhan, kecerahan, oksigen terlarut serta pH perairan. Berdasarkan hasil penelitian indikator nutrisi penting nitrat, fosfat, klorofil-a dan keterkaitan kualitas air lainnya dapat mendukung pertumbuhan budidaya rumput laut di kawasan pemanfaatan umum budidaya laut (KPUBL) zonasi rumput laut Pulau Tarakan sepanjang waktu musim tanpa diperlukan rotasi budidaya namun perlu kajian lanjutan untuk analisa lebih spesifik pada kondisi musim peralihan tahunan yang belum dijelaskan dalam penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada Pengelola Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI) Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia atas bantuan dana penelitian. Terima kasih penulis ucapkan juga kepada Pemerintah Kota Tarakan, dan Provinsi Kalimantan Utara atas dukungan data dan pemberian ijin lokasi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Anugrah, A.S., Kasim, M., & Munier, M.T. (2022). Studi Pengaruh Karakteristik Fisika Kimia Perairan Terhadap Pertumbuhan *Kappaphycus Alvarezii* Yang Dipelihara Dengan Jaring Horinet Di Perairan Pantai Lakeba Kota Bau Bau. *Jurnal Manajemen Sumber Daya Perairan*, 7(4), 309-318.
- Ahmad, N. & Deebea, K.F. (2020). Study of Numerical Accuracy in Different Spline Interpolation Techniques Study of Cubic spline Interpolation View project Numerical method for ODE and PDE View project Study of Numerical Accuracy in Different Spline Interpolation Techniques. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 16(5), 687-693.
- Basyuni, M., Puspita, M., Rahmania, R., Albasri, H., Pratama, I., Purbani, D., Aznawi, A. A., Mubaraq, A., Al Mustaniroh, S. S., Menne, F., Rahmila, Y. I., Salmo Ili, S. G., Susilowati, A., Larekeng, S. H., Ardli, E., & Kajita, T. (2024). Current biodiversity status, distribution, and prospects of seaweed in Indonesia: A systematic review. *Heliyon Journal*, 10(10), e31073. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e3107
- Badan Standarisasi Nasional. (2022). Cara Budidaya Ikan Yang Baik (CBIB). Bagian 2 : Rumput Laut. SNI 8228.2:2022. Jakarta (ID): BSN
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). Produksi Rumput Laut Cottoni (*Euclima cottoni*). Bagian 2 : Metode Longline. SNI 7673.2:2011. Jakarta (ID): BSN
- Demars, B.O.L., Schneider, S.C., Thieme, K., Dörsch, P., Pulg, U., Stranzl, S., Velle, G., & Pathak, D. (2024). Light and temperature controls of aquatic plant photosynthesis downstream of a hydropower plant and the effect of plant removal. *Science of The Total Environment*, 912, 169201. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169201.
- Dzakwan, A.Z., Endrawati, H., & Ario, R. (2023). Analisis Konsentrasi Nitrat Dan Fosfat Terhadap Kelimpahan Fitoplankton Di Perairan Sengkarang Pekalongan. *Journal of Marine Research*, 12(4), 571-578. doi: 10.14710/jmr.v12i4.35259
- Diogoul, N., Brehmer, P., Demarcq, H., Ayoubi, S. E., AbouThiam, Sarre, A., Mouget, A. & Perrot, Y. (2021). On the robustness of an eastern boundary upwelling ecosystem exposed to multiple stressors. *Nature*, 11, 1908. doi: 10.1038/s41598-021-81549-1
- Garini, B.N., Suprijanto, J., & Pratikto, I. (2021). Kandungan Klorofil-a dan Kelimpahan di Perairan

- Kendal, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 10(1), 102-108. doi: 10.14710/jmr.v10i1.28655
- Hardan, H., Warsidah, W., & Nurdiansyah, I. S. (2020). Laju Pertumbuhan Rumput Laut *Kappaphycus alvarezii* Dengan Metode Penanaman Yang Berbeda Di Perairan Laut Desa Sepempang Kabupaten Natuna. *Jurnal Laut Khatulistiwa*, 3(1), 14–22. doi: 10.26418/lkuntan.v3i1.35101
- Isada, T., Hooker, S.B., Taniuchi, Y., & Suzuki, K. (2022). Evaluation of retrieving chlorophyll a concentration and colored dissolved organic matter absorption from satellite ocean color remote sensing in the coastal waters of Hokkaido, Japan. *Journal of Oceanography*, 78, 263–276. doi: 10.1007/s10872-022-00633-w
- Ketjulan, R., Imran, Z., Purnama, M.F., Haya, L.O.M.Y., Iba, W., Sabilu, K., & Aslin, L.O. (2024). Analisis Potensi Kawasan Budidaya Laut Dan Implikasinya Terhadap Kualitas Perairan Di Gugus Kepulauan Tiworo. *Jurnal Perikanan Unram*, 13(2), 541–554. doi: 10.29303/jp.v13i2.519
- Kamlasi, Y., Rejeki, S., Prayitno, S.B., & Purwanti, P. (2024). Pola Sebaran Klorofil-a dan Kualitas Air Pada Kawasan Budidaya Rumput Laut di Perairan Pulau Semaui Kabupaten Kupang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 27(3), 423-430. doi: 10.14710/jkt.v27i3.23727
- Kahitjah S., Utomo E., & Hermansyah M. (2022). Kajian Karakteristik Gelombang Pecah di Pantai Amal Baru Kota Tarakan. *Civil Engineering Scientific Journal*, 1(1), 75-85.
- Lumbessy, S.L., Setyowati, D.N., Mukhlis, A., Lestari, D.P., & Azhar, F. (2020). Komposisi Nutrisi dan Kandungan Pigmen Fotosintesis Tiga Spesies Alga Merah (*Rhodophyta* sp) Hasil Budidaya. *Journal of Marine Research*, 9(4), 431-438. doi: 10.14710/jmr.v9i4.28688
- Moher, P.P., Damis, D., & Bibin, M. (2024). Analisis Pertumbuhan Rumput Laut (*Eucheuma Cottonii*) Dengan Salinitas Yang berbeda Menggunakan Kultur Jaringan. *Techno-Fish*, 126-135. doi: 10.25139/ff.vi.8861
- Muliyadi, M. (2024). Kajian Kualitas Air Terhadap Pertumbuhan Rumput Laut *Eucheuma Cottonii*; Studi Kasus Di Desa Tapi-Tapi Kec. Marobo Sulawesi Tenggara. *Jurnal Perikanan Unram*, 13(3), 682 – 689. doi: 10.29303/jp.v13i3.605
- Maharani, G.D., Indarjo, A., Hadibarata, T., Zainuri, M., Endrawati, H., Redjeki, S., Pribadi, R., Rochaddi, B., Ismanto, A., & Jihadi, M.S. (2024). Determination of chlorophyll-a and its distribution in the waters of the mangrove forest rehabilitation area in Mojo Estuaria, Pemalang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 27(2), 217-224. doi: 10.14710/jkt.v27i2.23253
- Maradhy, E., Nazriel, R.S., Sutjahjo, S.H., Rusli, M.S., Widiatmaka, & Sondita, M.F.A. (2022). The Relationship of P and N Nutrient Content with Chlorophyll-a Concentration in Tarakan Island Waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1083(1), p.012077. doi: 10.1088/1755-1315/1083/1/012077
- Murakami, H. (2020). ATBD of GCOM-C Chlorophyll-a Concentration Algorithm (Version2). https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/ATBD/ver2/V2ATBD_O3AB_Chla_Murakami.pdf
- Oktaviana, C.I., Muskananfolo, M.R., & Purnomo, P.W. (2023). Analisis Kesuburan Perairan Berdasarkan Klorofil-a, Nitrat dan Ortofosfat di Pantai Pasir Putih Wates, Kaliori, Rembang. *Life Science*, 12(1), 40-51. doi: 10.15294/lifesci.v12i1.63819
- Pauwah, A., Irfan, M., & Muchdar, F. (2020). Analisis Kandungan Nitrat Dan Fosfat Untuk Mendukung Pertumbuhan Rumput Laut *Kappahycus alvarezii* Yang Dibudidayakan Dengan Metode Longline Di Perairan Kastela Kecamatan Pulau Ternate Kota Ternate. *Jurnal Hemyscyllium*, 1(1), 10-22.
- Papageorgiou S.N. (2022). On Correlation Coefficients and Their Interpretation. *Journal of Orthodontics*, 49(3), 359 - 361. doi: 10.1177/14653125221076142
- Sarjito, S., Ammaria, H., Helmi, M., Prayitno, S.B., Nurdin, N., Setiawan, R.Y., Wetchayont, P., & Wirasatriya, A. (2022). Identification of Potential Locations for *Kappaphycus alvarezii* Cultivation for Optimization of Seaweed Production Based on Geographic Information Systems in Spermonde Archipelago Waters, South Sulawesi, Indonesia. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 27(3), 253-266.
- Sulistiawati, D., Ya'la, Z.R., Jumiayatun, N., & Mubaraq, D.Z. (2020). Water quality study in several seaweeds culture sites in the post-earthquake-tsunami Palu Central, Sulawesi Province. *Journal of Physics. Conference Series*, 1434, p.012035. doi: 10.1088/1742-6596/1434/1/012035
- Umam, K., & Arisandi, A. (2021). Pertumbuhan Rumput Laut *Eucheuma cottonii* Pada Jarak Pantai yang Berbeda Di Desa Aengdake, Kabupaten Sumenep. *Juvenil : Jurnal Ilmiah Kelautan Dan*

Perikanan, 2(2), 115–124. doi: 10.21107/jjuvenil.v2i2.10672

Widiaratih, R., Suryoputra, A.A.D., & Handoyo, G. (2022). Korelasi Klorofil-a dengan Nutrien dan Kualitas Perairan di Pulau Seruni Karimunjawa Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(2), 249–256. doi: 10.14710/jkt.v25i2.14170