

ESTIMASI KESUBURAN PERAIRAN TELUK LAMPUNG BERDASARKAN *VERTICALLY GENERALIZED PRODUCTION MODEL* (VGPM)

Mochamad Tri Hartanto^{1*}, Muhammad Riza Hanief Febrianto¹, Santi Susanti¹,
Dea Fauzia Lestari^{1,6}, Tri Prartono¹, Rastina¹, Stephanie J. Martinez^{3,4},
Nurul Hidayah Mat Zaki⁵, Irzal Effendi²

¹Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan,
IPB University, Bogor 16680, Indonesia

²Departemen Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan,
IPB University, Bogor 16680, Indonesia

³Marine Evolution and Ecology Group, Naturalis Biodiversity Center, Netherlands

⁴Department of Animal Sciences, Wageningen University & Research,
6700 AR Wageningen, Netherlands

⁵Institute of Oceanography and Environment (INOS), University Malaysia Terengganu (UMT),
21030, Malaysia

⁶Enhancing Marine Biodiversity Research in Indonesia (EMBRIO),
IPB University, Bogor 16680, Indonesia

*Korespondensi: dea.fauzia@apps.ipb.ac.id

(Diterima 28-09-2024; Direvisi 02-11-2024; Disetujui 21-12-2024)

ABSTRAK

Teluk Lampung merupakan jalur perairan penting di Sumatera Selatan yang dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik dan karakteristik oseanografis. Penelitian ini mengestimasi produktivitas primer (PP) secara spasial dan temporal di tiga bagian teluk: hulu, tengah, dan muara, menggunakan data suhu permukaan laut (SPL), klorofil-a, dan radiasi fotosintesis aktif (PAR) dari penginderaan jauh dan pengukuran lapangan. Pemodelan PP dilakukan dengan *Vertically Generalized Production Model* (VGPM) dan divalidasi menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE). Distribusi PAR berkisar antara 35–52,50 E/m²/hari, sementara SST berada pada 28,5–31,50°C. Konsentrasi klorofil-a tertinggi ditemukan di hulu teluk (0,30–12 mg/m³). Analisis korelasi menunjukkan klorofil-a memiliki pengaruh terbesar terhadap PP ($R^2=0,99$). Produktivitas rata-rata di area tengah dan luar lebih rendah, masing-masing sebesar 122,65 dan 101,84 gC/m²/tahun. Model menunjukkan produksi primer tinggi di hulu teluk, mencapai tingkat eutrofik dan mesotrofik, sedangkan area tengah dan luar cenderung mesotrofik hingga oligotrofik. Hasil ini penting untuk pengelolaan sumber daya pesisir dan pelestarian ekosistem perairan setempat.

Kata kunci: kesuburan perairan, produktivitas primer, Teluk Lampung

Estimation of Lampung Bay Waters Fertility Based on Vertically Generalized Production Model (VGPM)

ABSTRACT

Lampung Bay is an important water crossing in South Sumatra that is greatly influence by anthropogenic activities and oceanographic characteristics. This study characterized and estimated the spatial and temporal Primary Productivity (PP) in the three sections of the bay: head, middle, and mouth. The PP was modeled by using Sea Surface Temperature (SST), chlorophyll-a, Primary Productivity, and Photosynthetically Active Radiation (PAR) collected from remote sensing data and field measurements. Primary productivity was modeled with a *Vertically Generalized Production Model* (VGPM), and data validation was done using the *Root Mean Square Error* method. The distribution of PAR in Lampung Bay ranged from 35–52.50 E/m²/day. The distribution of SST ranged from 28.5–31.50°C. The highest distribution of chlorophyll-a was at the hHead of the bay with a range of 0.30-12 mg/m³. Correlation analysis shows that chlorophyll-a had the highest influence on PP ($R^2=0.99$). While the middle and outer areas of the bay have a low average with values of 122.65 and 101.84 gC/m²/year. Our models show that there is high primary production at the Head of the bay, reaching eutrophic and mesotrophic levels. The middle and outer areas of the bay show productivity levels corresponding to mesotrophic and oligotrophic levels.

Keywords: Lampung Bay, primary productivity, trophic water level

PENDAHULUAN

Perairan Teluk Lampung merupakan wilayah pesisir yang memiliki potensi sumberdaya perikanan yang besar dan mendukung penghidupan masyarakat di sekitarnya. Teluk Lampung merupakan perairan dangkal di pesisir selatan Pulau Sumatera dengan luas 1.888 km² dan memiliki potensi sumberdaya hayati, non-hayati, serta jasa lingkungan yang penting untuk dimanfaatkan oleh masyarakat. Berbagai kegiatan dalam pemanfaatan wilayah pesisir antara lain pemukiman, pertanian, perkebunan, pelabuhan perikanan, kawasan wisata, dan daerah konservasi serta kegiatan industri seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Lebih dari 70% kawasan Teluk Pidada merupakan bagian dari Teluk Lampung dan sangat cocok digunakan dalam kegiatan budidaya lobster (Hartanto *et al.*, 2024). Hal ini didukung oleh kondisi geografis Teluk Lampung yang berupa tanjung dan teluk dengan ombak yang tenang dan tidak besar, sehingga aktivitas bahari dapat dilakukan dengan aman (Dariusman, 2016). Kesuburan perairan, yang sering diukur melalui tingkat produktivitas primer, menjadi faktor kunci dalam mendukung kelimpahan sumber daya hayati. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai kesuburan perairan Teluk Lampung guna mendukung pengelolaan ekosistem yang berkelanjutan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa masukan organik menjadi salah satu input kesuburan perairan di Teluk Lampung (Damar *et al.*, 2012). Nilai N/Si rasio dan rata-rata konsentrasi tahunan klorofil-a Teluk Lampung lebih rendah dibandingkan dengan Teluk Jakarta (Damar *et al.*, 2012). Kegiatan antropogenik pada pesisir dapat memengaruhi eutrofikasi perairan (Bonsdorff, 1997; Rabalais, 2004). Eutrofikasi dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut pada perairan tersebut, bahkan dapat meningkatkan kadar amonia yang beracun bagi makhluk hidup yang berhabitat di

sekitarnya (Simbolon, 2016). Terganggunya ekosistem pada suatu wilayah dapat diketahui dari indikator kesuburan perairan seperti parameter oksigen terlarut, nutrien, pH, serta produktivitas primer pada perairan tersebut (Patty *et al.*, 2015).

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menilai kesuburan perairan adalah pemodelan produktivitas primer. *Vertically Generalized Production Model* (VGPM) merupakan model berbasis satelit yang telah banyak digunakan untuk mengestimasi produktivitas primer di berbagai ekosistem perairan. Model ini merupakan salah satu model yang paling sering digunakan untuk estimasi produksi primer di lautan karena kemampuannya untuk diterapkan pada data klorofil-a dari satelit, dan desainnya yang relatif sederhana (Tripathy *et al.*, 2012). *Vertically Generalized Production Model* sekarang menjadi salah satu model yang paling populer digunakan untuk data klorofil satelit karena bergantung pada cahaya permukaan serta menggunakan nilai maksimum produksi primer yang diperkirakan dibandingkan dengan unit klorofil di seluruh kolom air. Penggunaan model ini di Teluk Lampung diharapkan dapat memberikan gambaran spasial dan temporal mengenai dinamika produktivitas primer. Konsentrasi klorofil kerap digunakan dalam mengestimasi nilai produktivitas primer guna pengelolaan sumberdaya laut dan pemantauan kualitas perairan (Mercado-Santana *et al.*, 2017). Pengaplikasian penginderaan jarak jauh dalam estimasi produktivitas primer dapat digunakan menggunakan citra satelit yang telah terkoreksi secara radiometrik dan atmosferik (Nuzapril *et al.*, 2017; Aryanti *et al.*, 2019; Dalabehara dan Sarma 2021; Wulandari *et al.*, 2019).

Teluk Lampung merupakan salah satu perairan pesisir yang memiliki peran ekologis dan ekonomis penting di Indonesia. Sebagai kawasan yang mendukung aktivitas perikanan, budidaya, dan transportasi laut, perairan ini mengalami tekanan lingkungan

yang semakin meningkat akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim. Kesuburan perairan, yang sering diukur melalui tingkat produktivitas primer, menjadi faktor kunci dalam mendukung kelimpahan sumber daya hayati. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang mendalam mengenai kesuburan perairan Teluk Lampung guna mendukung pengelolaan ekosistem yang berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Teluk Lampung, Provinsi Lampung terdiri atas beberapa tahap yaitu pengambilan sampel di lapang (Oktober 2021), analisis laboratorium, serta pengolahan data dan model *Vertically Generalized Productivity Model* (VGPM). Pengambilan sampel air dilakukan di 6 titik dan pengukuran produktivitas primer di 4 titik (Gambar 1). Penentuan lokasi pengambilan

sampel tersebut dilakukan secara *purposive sampling* berdasarkan sebaran spasial klorofil-a dan suhu permukaan laut dari tingkat tertinggi hingga terendah. Sampel air untuk analisis klorofil-a diambil menggunakan *Van dorn water sampler* berbahan polivinil klorida (PVC) ukuran 5 L pada kedalaman permukaan (1 m).

Pengukuran produktivitas primer in situ pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Botol Gelap-Botol Terang (DB-LB) dengan mengukur konsentrasi oksigen. Sampel air diambil pada kedalaman yang sama dengan sampel klorofil-a, lalu dimasukkan ke dalam botol terang dan botol gelap. Selanjutnya botol-botol tersebut diinkubasi di kolom air pada kedalaman pengambilan sampel (1 m) selama 4-5 jam, dari pukul 07.00-12.00 WIB. Selain sampel inkubasi di atas, nilai oksigen juga diukur pada Botol Inisial (IL) sebagai konsentrasi oksigen awal. Produktivitas primer dihitung

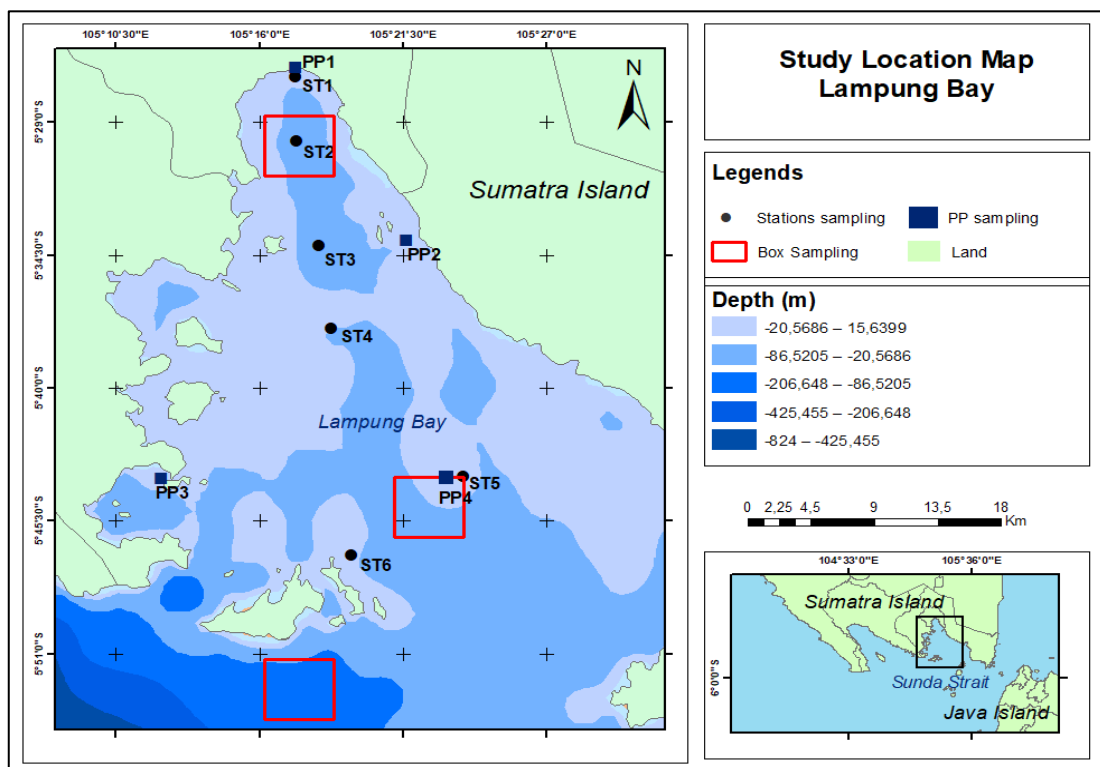


Figure 1. Batimetric map of Lampung Bay, Lampung Province, showing the sampling locations

Gambar 1 Lokasi pengambilan sampel di perairan Teluk Lampung, Provinsi Lampung

berdasarkan Umlay dan Cuvin (1988) sebagai berikut.

$$NPP = \frac{(O_2LB - O_2IL) \times 1000 \times 0.375}{PQ \times t} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan *NPP*= Produktivitas primer bersih (mgC/m³/jam); *O₂LB*= oksigen terlarut pada botol terang setelah inkubasi (mg/l); *O₂IL*= oksigen terlarut pada botol inisial (mg/l); *PQ*= koefisien fotosintesis (1.2); 0,375= koefisien konversi oksigen menjadi karbon; *t* = waktu inkubasi (jam).

Analisis laboratorium sampel klorofil-a dengan metode spektrofotometri dilakukan di Laboratorium Produktivitas Lingkungan, Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan. Sampel air sebanyak 1 L disaring untuk memisahkan fase tersuspensi (termasuk fitoplankton) dengan fase air terlarut. Penyaringan dilakukan menggunakan botol Nalgene dan *vacum pump* pada tekanan 200 mmHg, serta menggunakan kertas saring membran 0,45 µm. Sampel suspensi klorofil-a diekstraksi menggunakan *tissue grinder* dan *acetone* 90% sebanyak 10 ml sampai hancur dan larut, dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi ukuran 15 ml yang sebelumnya telah dilapisi alufoil agar larutan tersimpan pada kondisi gelap. Larutan didiamkan selama 24 jam pada suhu 4°C, kemudian didekantasi menggunakan *centrifuge* selama 30 menit pada kecepatan 1000 rpm. Tujuan dekantasi adalah untuk memisahkan fase klorofil terlarut dengan sisa kertas saring atau fragmen lainnya. Selanjutnya sampel terlarut diambil dan diukur konsentrasi klorofil-a menggunakan spektrofotometer secara trikromatik, yaitu menggunakan 3 panjang gelombang 664, 645, dan 630 nm (Widiarati et al., 2022), serta 750 nm untuk koreksi absorbansi. Nilai konsentrasi klorofil-a dihitung menggunakan persamaan Parsons et al. (1984) sebagai Berikut.

$$Chl - a = \frac{Ca \times Va}{V \times d} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan *Chl-a*= Konsentrasi klorofil (µg/ml) atau (mg/m³); *Va*= volume aseton (10 ml); *V*= volume sampel air yang disaring (ml); *D*= diameter cuvet; *Ca*= (11,6 x E₆₆₅)-(1,31 x E₆₄₅)-(0,14 x E₆₃₀).

Pengolahan data re-analisis dan model VGPM dilakukan di Laboratorium *Big Data and Ocean Modelling* (BiOM), Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University. Data suhu permukaan laut dan klorofil-a diperoleh dari <https://marine.copernicus.eu/>, sedangkan data *Photosynthesis Active Radiation* (PAR) diperoleh dari <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/>, dengan klasifikasi untuk ketiga data yaitu level 3 *composite* data bulanan (*monthly*) dengan resolusi spasial 4 x 4 km dan temporal 6 tahun dari Januari 2016 hingga Oktober 2021.

Penentuan batas model VGPM yang terletak pada bagian kepala, tengah dan luar teluk dapat dilihat pada kotak merah (Gambar 1). Metode analisis VGPM merupakan metode yang digunakan dalam mengestimasi nilai produktivitas primer bersih di laut global, pada permukaan hingga menuju zona eufotik (terdapat 1% cahaya matahari). Behrenfeld dan Falkowski (1997) menjelaskan persamaan metode VGPM sebagai berikut.

$$\sum PP = 0,661 \times P_{opt}^B \times \frac{E_0}{E_0 + 4,1} \times Z_{eu} \times C_{SAT} \times DL \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan $\sum PP$ = fiksasi karbon harian yang terjadi pada permukaan hingga zona eufotik (mgC/m²/hari); *P_{opt}^B*= laju zo optimal fiksasi karbon harian yang terjadi di kolom perairan (mgC/mgChl); *C_{SAT}*= konsentrasi klorofil yang diperoleh dari citra satelit (mgChl/m³); *Z_{eu}*= kedalaman zona eufotik; *DL*= lama penyinaran matahari (hari); *E₀* = nilai harian PAR permukaan laut (Enstein/m²/hari).

Nilai dari P_{opt}^B dapat dimodelkan berdasarkan hubungan dari variasi temperatur. Behrenfeld dan Falkowski (1997) mendeskripsikan hubungan tersebut sebagai berikut.

$$P_{opt}^B \begin{cases} 1,13 & \text{jika } T < -1,0 \\ 4,00 & \text{jika } T > 28,5 \end{cases} \text{ lainnya} \quad (4)$$

$$P_{opt}^B = 1,2956 + 2,749 \times 10^{-1}T + 6,17 \times 10^{-2}T^2 - 2,05 \times 10^{-2}T^3 + 2,462 \times 10^{-3}T^4 - 1,348 \times 10^{-4}T^5 + 3,4132 \times 10^{-6}T^6 - 3,27 \times 10^{-8}T^7 \quad (5)$$

Keterangan T adalah suhu permukaan laut ($^{\circ}\text{C}$).

Kedalaman zona eufotik (Z_{eu}) didefinisikan sebagai kedalaman yang mana masih terdapat 1% cahaya dari permukaan berdasarkan hukum Beer-Lambert. Kedalaman Z_{eu} pada kajian ini dihitung berdasarkan nilai C_{SAT} sebagai berikut.

$$Z_{eu} = \begin{cases} 568,2 (C_{SAT})^{-0,746} & \text{jika } Z_{eu} < 102 \\ 200,0 (C_{tot})^{-0,293} & \text{jika } Z_{eu} > 102 \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{tot} = \begin{cases} 38,0 (C_{SAT})^{0,425} & \text{jika } C_{SAT} < 1,0 \\ 40,2 (C_{SAT})^{0,507} & \text{jika } C_{SAT} > 1,0 \end{cases} \quad (7)$$

Tingkat kesuburan perairan dapat diperoleh dari nilai produktivitas primer dalam suatu perairan. Pada penelitian Triyatmo *et al.* (2001) mengklasifikasikan beberapa tingkat kesuburan perairan berdasarkan nilai produktivitas primer (Tabel 1) dari oligotrofik, mesotrofik, sampai eutrofik.

Hubungan pengaruh dari parameter curah hujan, PAR, SPL, dan konsentrasi klorofil-a teradap PP dianalisis menggunakan metode regresi linear sederhana. Analisis tersebut

diperlukan untuk memprediksi seberapa jauh pengaruh yang ada. Persamaan umum regresi linear sederhana (Walpole, 1995) ditampilkan pada persamaan 8,

Tabel 1. Tingkat kesuburan perairan berdasarkan nilai produktivitas primer

Table 1. Aquatic productivity level based on primary productivity value

Primary Productivity (mg/m ³ /day)	Fertility
0-200	Oligotrophic
200-750	Mesotrophic
>750	Eutrophic

$$Y = a + bX \quad (8)$$

Keterangan Y = subyek dalam variabel dependen; a = harga Y bila $X=0$; b = angka arah atau koefisien regresi peningkatan/penurunan nilai pada variabel dependen; X = subyek dalam variabel independen. Dalam hal ini, Y adalah produktivitas primer (PP), sedangkan X adalah suhu permukaan laut (SPL), klorofil-a (Chl-a), dan PAR.

Koefisien korelasi (R) merupakan nilai dari ada atau tidaknya hubungan pengaruh antara variabel bebas dan variabel terikat, arah dari pengaruh, dan besar kekuatan dari pengaruh tersebut.

$$R = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{\{n \sum X^2 - (\sum X)^2\} \{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \quad (9)$$

Keterangan R adalah koefisien korelasi antara dua parameter.

Intensitas hubungan antara parameter berdasarkan nilai korelasi dapat dilihat pada Tabel 2 kategori nilai koefisien korelasi (Riduwan dan Kuncoro 2013).

Validasi menggunakan metode RMSE (*Root Mean Square Error*). Validasi ini dilakukan pada data suhu permukaan laut dan klorofil-a dari hasil pengambilan data in situ dan hasil pengolahan data citra. Persamaan

dari metode RMSE dapat dilihat pada persamaan 10.

Tabel 2. Kategori nilai koefisien korelasi
Table 2. Correlation coefficient categories

Correlation Coefficient Interval (R)	Correlation Categories
$R=1$	Excellent
$0.60 \leq R \leq 0.79$	Strong
$0.40 \leq R \leq 0.59$	Moderate
$0.20 \leq R \leq 0.39$	Weak
$R=0$	No correlation

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{model} - X_{observasi})^2}{N}} \dots (10)$$

Keterangan $RMSE$ = Root Mean Square Error;
 X_{mode} = data hasil pengolahan citra satelit ke - 1, $i=1....N$; $X_{observasi}$ = data hasil pengambilan in situ ke - 1, $i=1....N$; N = Jumlah pasangan data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi data

Validasi data menggunakan metode RMSE dengan mengukur perbedaan dari nilai hasil perhitungan model sebagai estimasi dari nilai hasil observasi lapang. Validasi data diaplikasikan pada parameter SPL, konsentrasi klorofil-a, dan NPP. Nilai validasi serta perbandingan data in situ dan satelit SPL, konsentrasi klorofil-a, dan NPP dapat dilihat pada Tabel 3 Validasi data in situ dan data satelit perairan Teluk Lampung dan Gambar 2 Perbandingan data *in situ* dan satelit.

Nilai SPL pada perairan Teluk Lampung memiliki interval yang rendah berkisar antara $29,40^{\circ}$ - $30,50^{\circ}$ C dengan nilai rata-rata mencapai $29,77^{\circ}$ C pada pengambilan data *in situ* dan $29,91^{\circ}$ C pada pengolahan data satelit. Grafik nilai SPL data *in situ* dan satelit perairan Teluk Lampung dapat dilihat pada grafik SPL di Gambar 2a. Sebaran SPL cenderung menurun saat memasuki laut lepas. Suhu tertinggi berada pada stasiun ST1 yang berada dekat dengan daerah pesisir yang populasinya tinggi dengan nilai pada data *in situ* dan satelit secara berturut-turut sebesar $30,50^{\circ}$ dan $30,36^{\circ}$ C. Nilai suhu terendah terdapat pada stasiun ST5 yang berada pada daerah tengah teluk dengan nilai data *in situ* dan satelit mencapai $29,40^{\circ}$ dan $29,53^{\circ}$ C. Kondisi SPL ini cenderung homogen karena stasiun pengambilan data berada pada perairan yang tergolong dangkal dengan kedalaman 11,90-33,40 meter sehingga pencampuran air masih memiliki pengaruh yang kuat (Amri *et al.*, 2021). Nilai validasi data dengan metode RMSE pada parameter SPL perairan Teluk Lampung sebesar 0,27. Hasil ini menunjukkan hasil pencitraan satelit memiliki validasi yang bagus dengan hasil pengambilan data *in situ*.

Perbandingan konsentrasi klorofil-a dari pengambilan data *in situ* dan pengolahan data satelit dapat disajikan pada grafik konsentrasi klorofil-a di Gambar 2b. Konsentrasi klorofil-a pada perairan Teluk Lampung memiliki nilai $0,36$ - $12,84$ mg/m^3 . Stasiun ST1 memiliki nilai konsentrasi klorofil-a yang tertinggi mencapai $12,84$ mg/m^3 pada data *in situ* dan $8,96$ mg/m^3 pada data satelit. Konsentrasi klorofil-a pada

Tabel 3. Validasi data in situ dan data satelit perairan Teluk Lampung
Table 3. In situ validation of satellite data in Lampung Bay

Parameter	Data Sources	Min	Max	Average	RMSE
Chlophyl-a (mg/m^3)	In situ	0.36	12.84	2.64	1.60
	Satelite	0.33	8.96	2.03	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	In situ	29.40	30.50	29.77	0.27
	Satelite	29.47	30.36	29.91	
Primary Productivity ($\text{gC/m}^2/\text{year}$)	In situ	111.73	280.80	176.35	155.66
	Satelite	137.24	364.42	225.18	

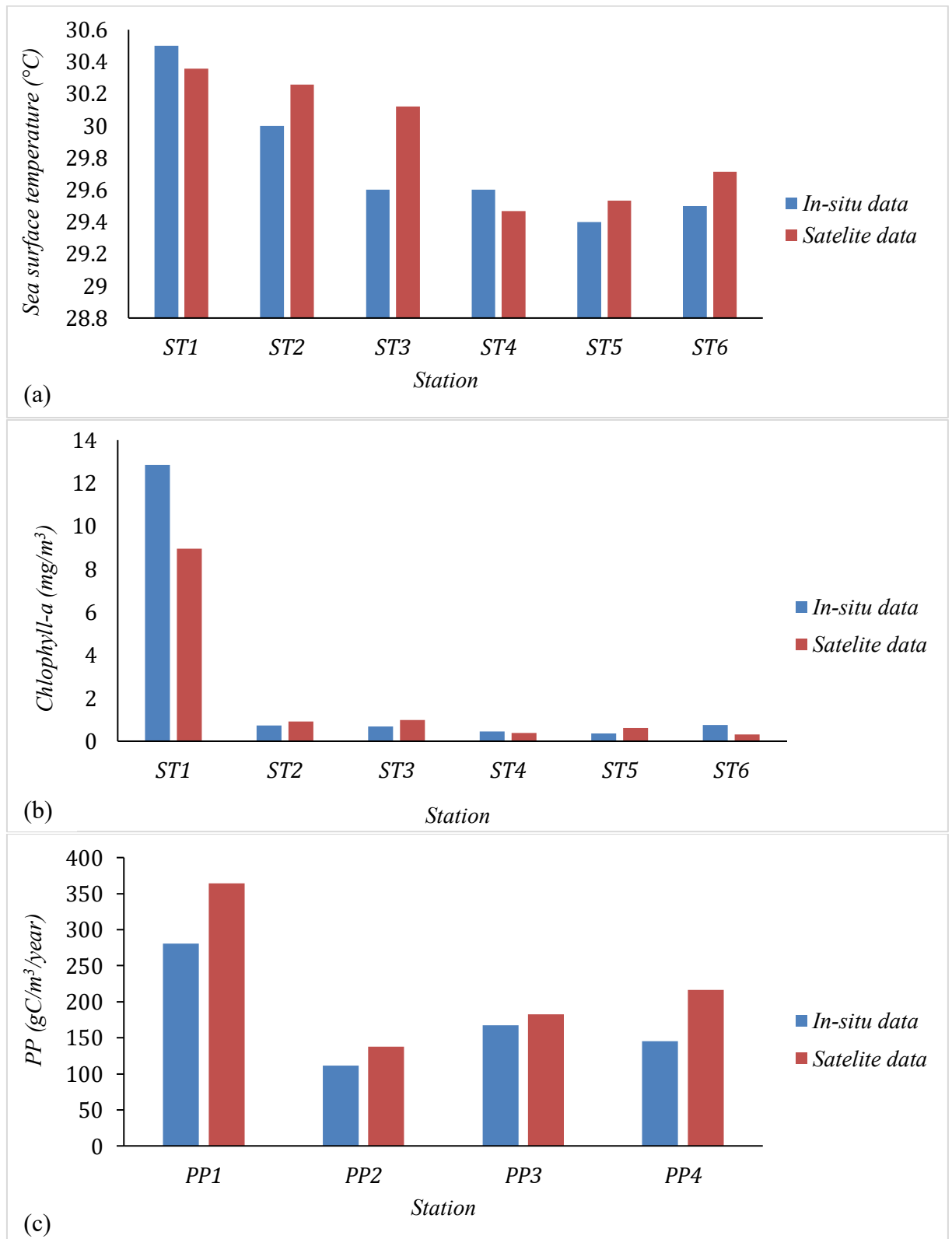


Figure 2. In situ and satellite data comparison on of sea surface temperature (a), chlorophyll-a (b), and primary productivity (c)

Gambar 2. Perbandingan data in situ dan satelit parameter suhu permukaan laut (a), klorofil-a (b), produktivitas primer (c)

ST1 memiliki selisih yang besar dengan nilai konsentrasi klorofil-a pada stasiun lainnya, hal tersebut disebabkan stasiun ST1 berlokasi pada muara sungai. *Run-off* yang masuk pada daerah kepala teluk memiliki kandungan nutrisi yang tinggi sehingga dapat meningkatkan konsentrasi klorofil-a pada daerah kepala teluk. Nilai konsentrasi klorofil-a terendah terdapat pada stasiun ST5 pada data *in situ* dengan nilai $0,36 \text{ mg/m}^3$, dan stasiun ST4 pada data satelit dengan nilai $0,38 \text{ mg/m}^3$. Stasiun tersebut berada pada area teluk yang jauh dengan pesisir, sehingga memiliki pengaruh tinggi dari laut sekitar teluk yang memiliki konsentrasi klorofil-a yang rendah.

Nilai RMSE untuk parameter klorofil-a pada perairan Teluk Lampung sebesar 1,60. Hasil ini menunjukkan nilai yang kurang bagus untuk validasi data satelit dengan hasil pengambilan data *in situ*. Perbedaan yang terbesar dapat dilihat pada stasiun ST1 yang memiliki konsentrasi klorofil-a yang tinggi. Perbedaan nilai dapat diakibatkan oleh aktivitas atmosfer yang mengganggu pengukuran citra satelit.

NPP pada perairan Teluk Lampung dapat dilihat pada grafik PP di Gambar 2c. NPP Teluk Lampung memiliki nilai berkisar $306,12\text{--}765,31 \text{ mgC/m}^3/\text{hari}$ dengan rata-rata $483,14 \text{ mgC/m}^3/\text{hari}$. Nilai NPP tertinggi terdapat pada stasiun PP1 mencapai $765,31 \text{ mgC/m}^3/\text{hari}$, sedangkan nilai terendah terdapat pada stasiun PP2 dengan nilai $306,12 \text{ mgC/m}^3/\text{hari}$. Pengolahan hasil model VGPM pada stasiun pengambilan sampel NPP berkisar $376,00\text{--}998,40 \text{ mgC/m}^2/\text{hari}$ dengan rata-rata $616,94 \text{ mgC/m}^2/\text{hari}$. Stasiun PP1 yang berlokasi pada pesisir pantai daerah kepala teluk memiliki PP yang tinggi karena yang memiliki kandungan bahan organik atau nutrisi yang tinggi.

Nilai uji validasi data menggunakan metode RMSE untuk parameter PP pada Teluk Lampung sebesar 155,66. Hasil ini bukan merupakan hasil yang bagus karena memiliki nilai RMSE yang sangat tinggi. Hal

ini disebabkan oleh skala nilai dari NPP yang tinggi menyebabkan selisih perbedaan nilai yang tinggi. Faktor lingkungan juga dapat menyebabkan perbedaan nilai, seperti cuaca pada saat *sampling*, kekeruhan air laut, kandungan bahan organik pada air, dan lainnya. Perbedaan yang mencolok dapat dilihat pada stasiun PP1, hal ini disebabkan karena tingginya cemaran pada stasiun tersebut sehingga nilai PP menurun.

Photosynthetically Active Radiation (PAR)

Sebaran PAR pada perairan Teluk Lampung memiliki kisaran nilai $35\text{--}52,50 \text{ E/m}^2/\text{hari}$, dengan karakteristik cenderung meningkat seiring dengan menjauhnya dari pesisir (Gambar 4). Rendahnya nilai PAR di wilayah pesisir, terutama di kepala teluk, disebabkan banyaknya partikel atau material yang tersuspensi mengakibatkan cahaya yang masuk diabsorpsi dan dihamburkan oleh material tersebut. Selain itu, kedalaman perairan yang lebih dangkal menyebabkan terjadinya pengadukan material di dasar perairan, sehingga partikel yang tersebar di kolom air meningkat. Pada daerah tengah dan luar teluk dengan nilai PAR yang tinggi, memiliki material tersuspensi yang lebih rendah dan kedalaman yang lebih dalam, sehingga mendukung penyebaran cahaya yang maksimum. Rendahnya nilai suspensi berkaitan dengan semakin jauhnya dari sumber daratan, volume perairan yang lebih besar dalam mengasimilasi material, serta proses oseanografi fisik seperti arus dan gelombang yang membersihkan atau menyebarkan material tersebut.

Sebaran temporal nilai PAR di perairan Teluk Lampung berfluktuasi berdasarkan posisi matahari dengan garis equator. Pada bulan Januari, nilai PAR memiliki kisaran $37,50$ hingga $45 \text{ E/m}^2/\text{hari}$. Lalu, nilai PAR mengalami kenaikan hingga bulan Maret dengan kisaran mencapai 40 hingga $50 \text{ E/m}^2/\text{hari}$. Kenaikan PAR disebabkan karena

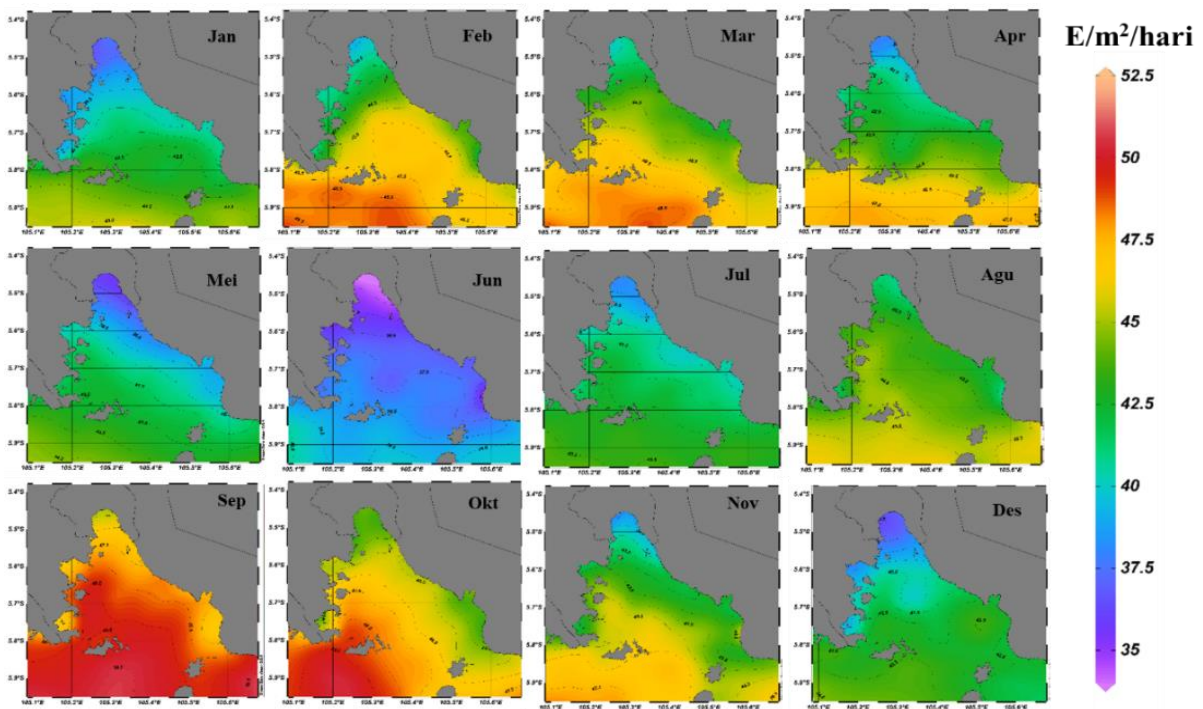


Figure 4. Distribution of Photosynthetically Active Radiation (PAR) in Lampung Bay based on <https://marine.copernicus.eu/>

Gambar 4. Sebaran Photosynthetically active radiation (PAR) pada perairan Teluk Lampung berdasarkan <https://marine.copernicus.eu/>

posisi matahari mencapai equator, sehingga radiasi matahari mencapai pada titik maksimum. Pada bulan April, seiring dengan menjauhnya matahari dari equator, nilai PAR mulai menurun hingga mencapai nilai minimum pada bulan Juni dengan kisaran nilai 35 hingga 40 $E/m^2/hari$. Kenaikan nilai PAR terjadi hingga mencapai nilai maksimum pada bulan September dengan nilai berkisar 45 hingga 52,50 $E/m^2/hari$ bersamaan dengan posisi matahari kembali berada pada equator. Pada bulan Oktober, nilai PAR mengalami penurunan, namun masih terlihat tinggi pada daerah luar teluk dengan nilai 42,50-52,50 $E/m^2/hari$. Selanjutnya nilai PAR mengalami penurunan hingga pada bulan Desember mencapai nilai 37,50-42,50 $E/m^2/hari$.

Suhu permukaan laut

Suhu permukaan laut merupakan parameter yang berperan penting dalam

menganalisis fenomena oseanografi yang terjadi di laut, seperti *upwelling*, *downwelling*, dan *front* (Suhana *et al.*, 2018). Suhu air laut memengaruhi banyak parameter oseanografi dan memiliki pengaruh yang penting dalam metabolisme dan perkembangbiakan biota air laut. Nilai suhu permukaan laut pada perairan Teluk Lampung memiliki interval yang rendah berkisar antara 29,40°-30,50°C dengan nilai rata-rata mencapai 29,77°C pada pengambilan data in situ dan 29,91°C pada pengolahan data satelit. Suhu permukaan laut data in situ dan satelit perairan Teluk Lampung dapat dilihat pada Gambar 5.

Teluk Lampung memiliki karakteristik suhu permukaan laut yang nilainya berfluktuatif. Pada penelitian Kartikasari *et al.* (2016) Teluk Lampung memiliki interval nilai berkisar 26°-31°C. Gambar 5 merupakan sebaran suhu permukaan laut pada Januari hingga Desember di perairan Teluk Lampung. Suhu permukaan laut perairan Teluk

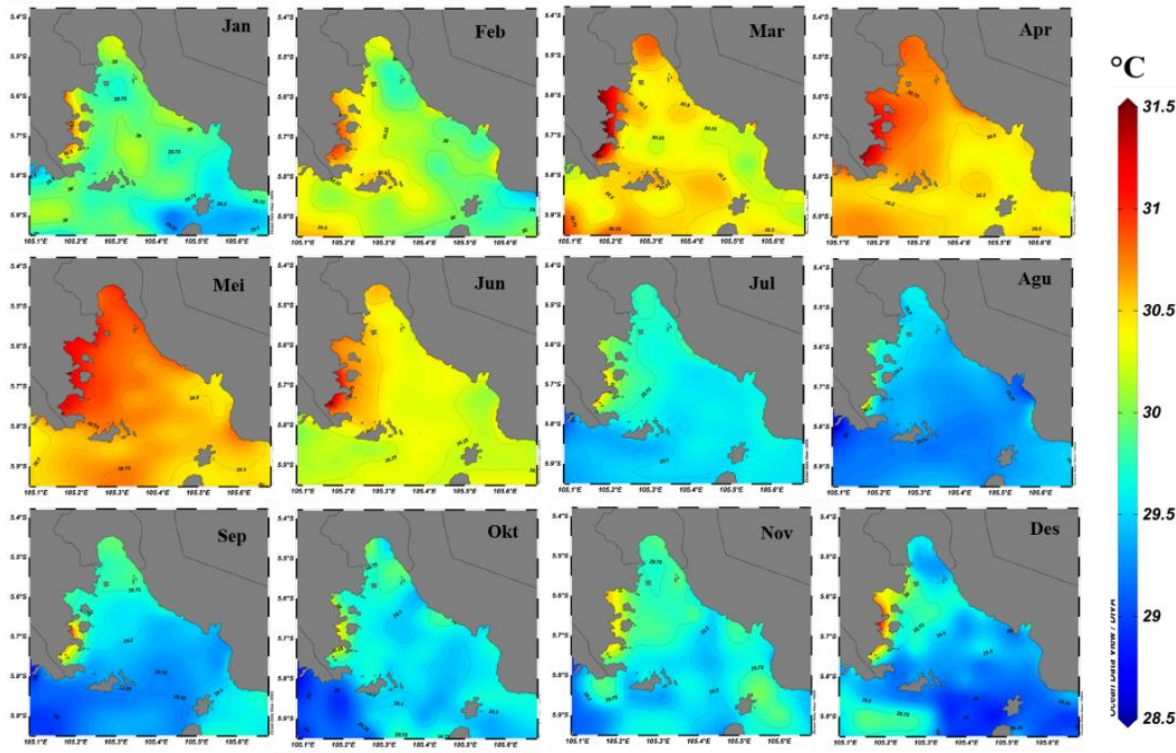


Figure 5. Distribution of sea surface temperature in Lampung Bay based on

<https://marine.copernicus.eu/>

Gambar 5. Sebaran suhu permukaan laut pada perairan Teluk Lampung berdasarkan

<https://marine.copernicus.eu/>

Lampung pada bulan Januari memiliki jangkauan nilai yang rendah dengan nilai berkisar 29,50°-31°C. Terlihat pada Gambar 5, pada pesisir timur Teluk Lampung, memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan area yang lain. Selanjutnya, terjadi kenaikan suhu permukaan laut pada seluruh area hingga mencapai nilai maksimum pada bulan Mei dengan nilai berkisar 30,50°-31°C. Pada bulan Juni, suhu permukaan laut mulai mengalami penurunan.

Penurunan suhu permukaan laut terjadi selama periode musim timur, penurunan tersebut terjadi hingga mencapai kondisi minimumnya pada bulan Agustus dengan nilai berkisar 28,50°-29°C.

Hal ini menunjukkan terjadinya pengaruh dari peristiwa *upwelling* yang berada pada selatan pulau Jawa dan barat pulau Sumatra selama periode musim timur. *Upwelling* merupakan peristiwa naiknya massa air lapisan bawah menuju ke permukaan perairan

(Nybakken, 1988). Peristiwa *upwelling* dipengaruhi oleh kecepatan angin pada suatu wilayah dan proses divergensi ekman. Naiknya massa air pada lapisan bawah yang memiliki suhu yang rendah menyebabkan penurunan suhu permukaan laut pada daerah *upwelling*. Selanjutnya, suhu permukaan laut perlahan mulai menunjukkan kenaikan hingga bulan November dengan nilai mencapai 29°-30,50°C.

Klorofil-a

Klorofil merupakan parameter yang berperan penting dalam menentukan produktivitas primer dan indikator dalam menentukan kesuburan perairan. Sebaran kesuburan perairan dapat diperoleh dengan memetakan sebaran konsentrasi klorofil. Klorofil merupakan pigmen pada mikroorganisme yang memiliki peran penting dalam proses fotosintesis. Konsentrasi

klorofil sangat dipengaruhi oleh parameter-parameter oseanografi, seperti suhu, salinitas, kecerahan, nutrisi, bahan organik, dan lainnya. Konsentrasi klorofil-a pada perairan Teluk Lampung memiliki nilai 0,36-12,84 mg/m^3 (Gambar 6).

Konsentrasi klorofil-a perairan Teluk Lampung pada penelitian Gunawan *et al.* (2019) memiliki nilai yang rendah dengan interval 1,43-4,88 mg/m^3 . Sebaran spasial konsentrasi klorofil-a pada perairan Teluk Lampung bergradasi yaitu konsentrasi yang rendah ditemukan di daerah luar dan tengah teluk, sedangkan konsentrasi yang tinggi ditemukan di daerah pesisir. Hal ini berkaitan dengan *run-off* dari daratan yang membawa nutrisi lebih tinggi di wilayah pesisir. Sedangkan di daerah tengah teluk memiliki konsentrasi nutrisi yang rendah seperti Selat Sunda (Tanto *et al.*, 2016). Pada bulan Januari, konsentrasi klorofil-a memiliki nilai

berkisar 0,50-1 mg/m^3 pada daerah tengah teluk dan meningkat seiring masuk ke kepala teluk dengan nilai mencapai 2-6 mg/m^3 . Pengaruh dari daratan menyempit dan meningkatkan konsentrasi klorofil-a mencapai 6-12 mg/m^3 hingga bulan Mei. Hal ini sejalan dengan penelitian Damar *et al.* 2012 di Teluk Lampung yang menyatakan bahwa stasiun yang berada di dekat mulut sungai (kepala teluk) memiliki nilai konsentrasi klorofil-a lebih tinggi dibandingkan dengan stasiun lainnya.

Konsentrasi klorofil-a pada area tengah teluk mengalami kenaikan hingga bulan Juli mencapai nilai berkisar 1,50-2 mg/m^3 , tetapi terdapat area dengan konsentrasi klorofil-a yang rendah pada daerah tengah teluk mencapai nilai kurang dari 0,50 mg/m^3 . Pada bulan Oktober, konsentrasi klorofil-a mengalami kenaikan pada pesisir barat Teluk Lampung 2,50-4,50 mg/m^3 , hal ini disebabkan

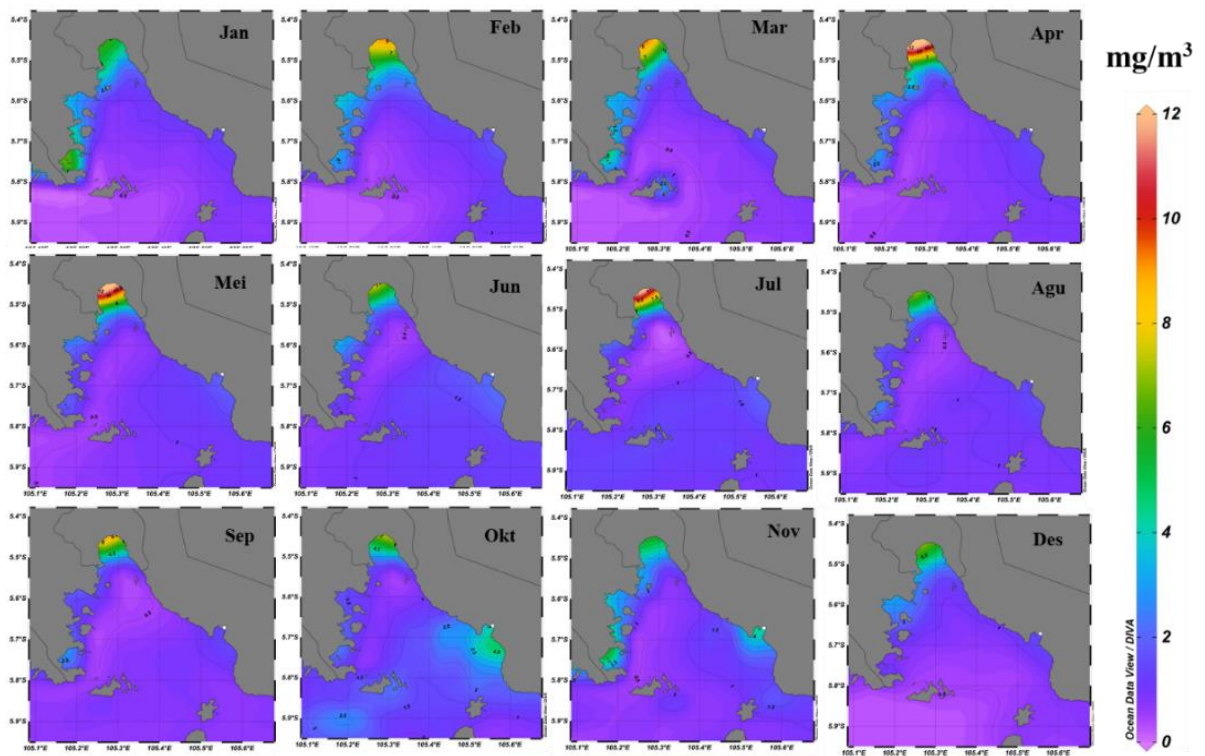


Figure 6. Distribution of chlorophyll-a in Lampung Bay based on

<https://marine.copernicus.eu/>

Gambar 6. Sebaran klorofil pada perairan Teluk Lampung berdasarkan

<https://marine.copernicus.eu/>

adanya masukan daratan dari sungai yang meningkatkan konsentrasi klorofil-a. Pada bulan November konsentrasi klorofil-a mengalami penurunan mencapai nilai minimumnya pada bulan Desember dengan nilai 0,50-1 mg/m³ pada area tengah teluk, dan meningkat hanya mencapai 6 mg/m³ pada area kepala teluk.

Produktivitas primer

Net primary productivity (NPP) merupakan laju penyimpanan bahan organik di dalam jaringan setelah dikurangi pemanfaatan untuk respirasi dalam jangka waktu tertentu. Grafik series nilai NPP (2016-2021) (Gambar 7) menunjukkan adanya fluktuasi yang berbeda antara di area kepala, tengah dan luar Teluk Lampung. Di area kepala teluk, puncak nilai NPP tertinggi ditunjukkan pada Desember 2016 dan Mei 2020, sedangkan untuk area tengah dan luar teluk, puncak tertinggi pada November 2019. Pada grafik *time series* NPP perairan Teluk Lampung, nilai NPP mengalami beberapa kenaikan dan penurunan nilai pada periode Januari 2016 hingga Oktober 2021. Pada area kepala teluk, kenaikan terjadi pada banyak periode kecuali pada musim timur. Hal tersebut disebabkan karena curah hujan yang rendah pada musim timur. Area kepala teluk

memiliki pengaruh yang besar dari daratan, sehingga curah hujan dapat meningkatkan intensitas dari masukan daratan yang meningkatkan NPP pada area tersebut.

Hasil tersebut juga menunjukkan karakteristik nilai yang berbeda secara spasial dimana nilai NPP di area kepala teluk lebih tinggi dibandingkan di tengah dan luar teluk yang relatif mirip satu sama lain. Rata-rata NPP di area tengah dan luar teluk adalah 126,12 dan 106,26 gC/m²/tahun. Nilai ini sangat jauh dengan rata-rata di area kepala teluk yaitu 360,72 gC/m²/tahun, dan bahkan mencapai nilai tertinggi 838,24 gC/m²/tahun pada bulan Februari 2017. Nilai terendah sendiri terdapat di area luar teluk yang mencapai 41,74 gC/m²/tahun pada bulan September 2016. Karakteristik nilai NPP di wilayah Lampung lainnya, yaitu di Teluk Hurun, berkisar 20,15-88,10 gC/m²/tahun dan rata-rata 49,77 gC/m²/tahun (Nuzapril dan Prasetyo, 2023).

Kenaikan NPP pada area tengah dan luar teluk kerap terjadi pada Musim Timur dan Peralihan 2 dengan puncaknya terdapat pada bulan November 2019 dengan nilai NPP pada tengah dan luar teluk sebesar 380,09 dan 399,32 gC/m²/tahun. Hal ini disebabkan karena Teluk Lampung mendapat pengaruh dari peristiwa *upwelling* di selatan pulau Jawa

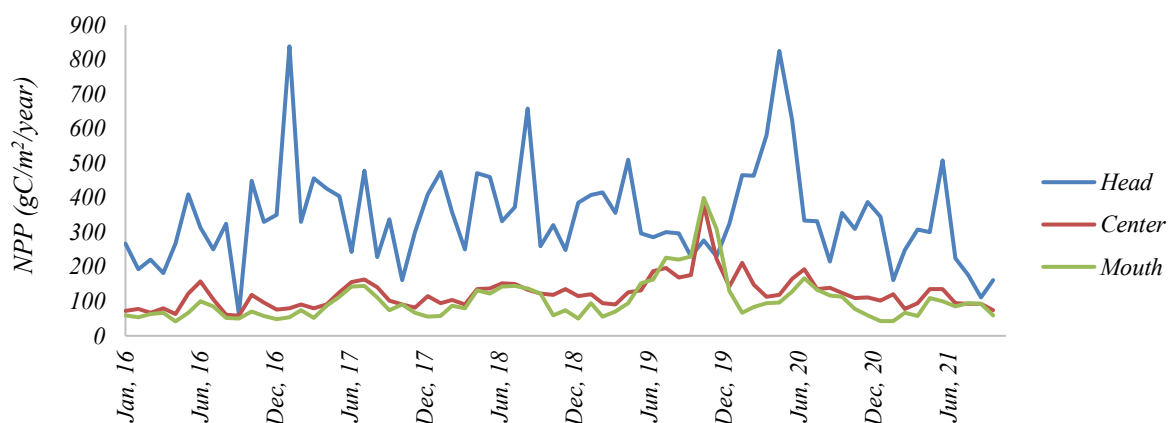


Figure 7. Time series of Net Primary Productivity (NPP) in Lampung Bay (Kepala Teluk=head; Tengah Teluk=middle; Luar Teluk = mouth)

Gambar 7. Data time series Net Primary Productivity (NPP) di Teluk Lampung (Kepala Teluk=head; Tengah Teluk=middle; Luar Teluk = mouth)

dan barat pulau Sumatra. Peristiwa *upwelling* menyebabkan naiknya nutrisi yang berada pada lapisan bawah air menuju ke daerah permukaan tempat terjadinya PP. Hal tersebut dapat ditandai dengan meningkatnya konsentrasi klorofil-a pada permukaan laut karena konsentrasi klorofil-a sangat dipengaruhi oleh NPP (Aryanti *et al.*, 2019)

Sebaran spasial NPP pada perairan Teluk Lampung menunjukkan bahwa nilai tertinggi terdapat di area kepala teluk yang terdapat muara sungai di wilayah tersebut, dan nilai NPP yang rendah ditunjukkan di area tengah dan luar teluk (Gambar 8). Di area kepala teluk, kenaikan NPP terjadi dari bulan Januari hingga mencapai nilai maksimum pada bulan Mei dengan kisaran nilai 365-638,75 $\text{gC/m}^2/\text{tahun}$. Kemudian nilai tersebut menurun hingga mencapai nilai minimumnya

pada bulan Desember dengan kisaran nilai 273,75-438 $\text{gC/m}^2/\text{tahun}$.

Di area luar teluk, NPP memiliki nilai yang rendah berkisar 54,75-109,5 $\text{gC/m}^2/\text{tahun}$ pada bulan Januari, lalu meningkat saat memasuki area tengah teluk dengan nilai mencapai 164,25 $\text{gC/m}^2/\text{tahun}$. Nilai NPP meningkat hingga mencapai nilai maksimumnya pada bulan Oktober dengan kisaran 273,75-365 $\text{gC/m}^2/\text{tahun}$. Peningkatan ini terjadi pada area muara sungai pada pesisir barat Teluk Lampung yang berpotensi menerima pasokan nutrisi dari daratan pada bulan tersebut. Selanjutnya, NPP mengalami penurunan hingga mencapai nilai terendahnya pada bulan Desember yaitu <54,75 $\text{gC/m}^2/\text{tahun}$ di luar teluk dan meningkat menjadi berkisar 54,75-109,5 $\text{gC/m}^2/\text{tahun}$ pada saat memasuki area tengah teluk.

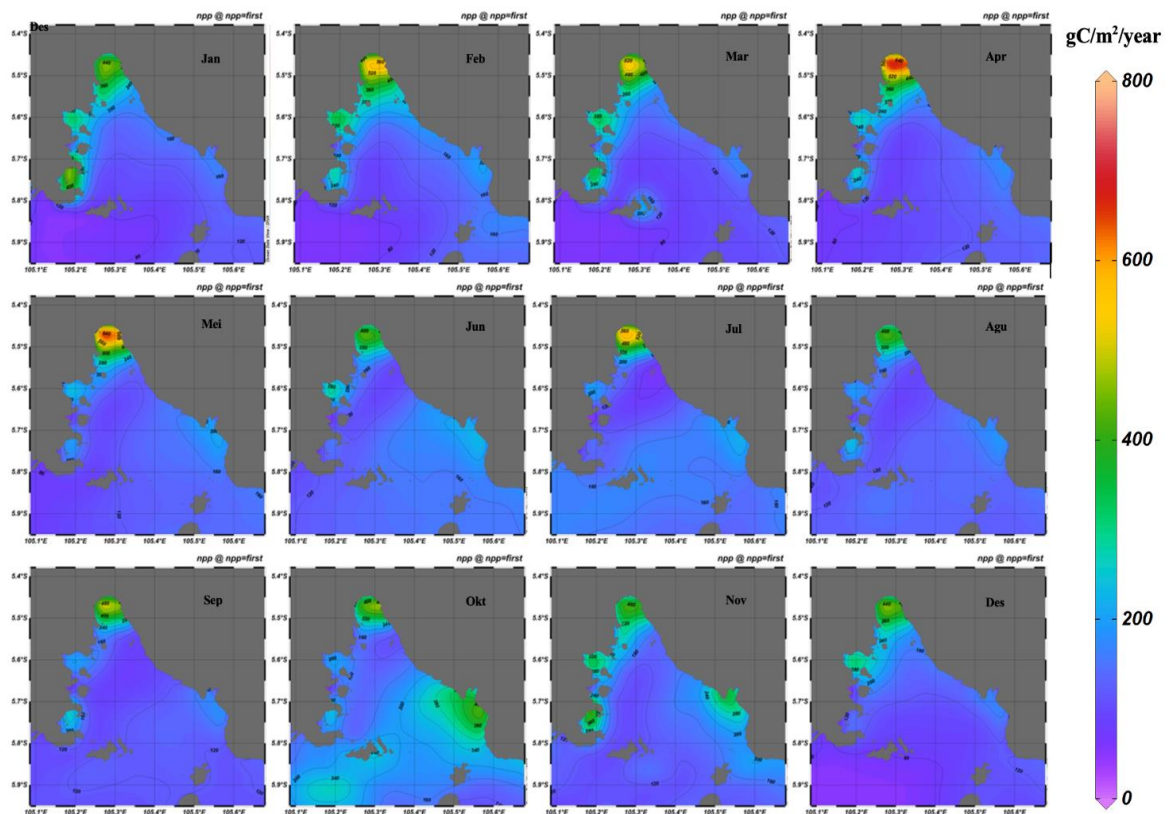


Figure 8. Distribution of Net Primary Productivity in Lampung Bay based on Vertically Generalized Production Model

Gambar 8. Sebaran produktivitas primer bersih pada perairan Teluk Lampung berdasarkan Vertically Generalized Production Model

Kesuburan perairan

Kesuburan perairan di perairan Teluk Lampung yang didekati dari nilai produktivitas primer menunjukkan gradasi spasial dari area kepala teluk (*head*), tengah (*middle*), sampai di luar teluk (*mouth*) (Tabel 4). Area kepala teluk memiliki mayoritas tingkat kesuburan pada eutrofik dengan nilai lebih besar dari 750 mgC/m²/hari atau 273,75 gC/m²/tahun. Tingkat kesuburan perairan yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya eutrofikasi yang menurunkan produksi perikanan. Masukan daratan yang tinggi menyebabkan kesuburan perairan pada daerah kepala teluk lebih tinggi dari kesuburan perairan pada daerah lainnya. Berbagai kegiatan antropogenik seperti pemukiman penduduk mengakibatkan limbah yang mengganggu keseimbangan ekosistem dengan meningkatkan nutrisi dan bahan organik pada area kepala teluk.

Daerah tengah teluk memiliki kesuburan perairan yang homogen dengan tingkat kesuburan pada mesotrofik dengan nilai 200-750 mgC/m²/hari atau 73-273,75 dalam gC/m²/tahun. Pada daerah ini, masih terdapat pengaruh dari kegiatan antropogenik pada daratan, tapi peristiwa oseanografi di laut sekitar seperti Selat Sunda masih memiliki pengaruh yang kuat. Sedangkan, pada daerah

luar teluk, mayoritas tingkat kesuburan perairan berada pada tingkat mesotrofik dan terjadi penurunan pada bulan Februari dan Desember menjadi oligotrofik dengan nilai >200 mgC/m²/hari atau >73 dalam gC/m²/tahun. Daerah ini memiliki rata-rata tingkat kesuburan lebih rendah dibandingkan daerah lainnya karena memiliki pengaruh besar dari laut sekitarnya dengan kesuburan perairan yang rendah.

Secara temporal, kesuburan perairan Teluk Lampung tidak memiliki perubahan yang signifikan sepanjang tahun. Daerah kepala teluk dengan tingkat kesuburan perairan eutrofik hanya mengalami penurunan menjadi mesotrofik pada bulan Oktober. Penurunan ini dapat disebabkan oleh menurunnya masukan dari daratan seperti nutrisi yang biasanya berkorelasi dengan rendahnya nilai klorofil. Namun kondisi tersebut tidak akan berpengaruh signifikan terhadap rata-rata level eutrofikasi di area kepala teluk sepanjang tahun. Sama halnya ditemukan konsistensi tingkat kesuburan perairan daerah tengah teluk yaitu mesotrofik sepanjang tahun. Sedangkan pada daerah luar teluk, pengaruh laut lepas dengan konsentrasi klorofil-a rendah menyebabkan kesuburan perairan menjadi oligotrofik pada bulan Januari hingga bulan April. Pada bulan Mei hingga November, peningkatan konsentrasi

Tabel 4. Tingkat kesuburan Perairan Teluk Lampung dari tahun 2016-2021

Table 4. Trophic state index of Lampung Bay through the year 2016-2021

Month	Bay Zone		
	Head	Middle	Mouth
Jan	Eutrophic	Mesotrophic	Oligotrophic
Feb	Eutrophic	Mesotrophic	Oligotrophic
Mar	Eutrophic	Mesotrophic	Oligotrophic
Apr	Eutrophic	Mesotrophic	Oligotrophic
May	Eutrophic	Mesotrophic	Mesotrophic
Jun	Eutrophic	Mesotrophic	Mesotrophic
Jul	Eutrophic	Mesotrophic	Mesotrophic
Aug	Eutrophic	Mesotrophic	Mesotrophic
Sep	Eutrophic	Mesotrophic	Mesotrophic
Oct	Mesotrophic	Mesotrophic	Mesotrophic
Nov	Eutrophic	Mesotrophic	Mesotrophic
Dec	Eutrophic	Mesotrophic	Mesotrophic

klorofil-a menyebabkan naiknya tingkat kesuburan perairan menjadi mesotrofik. Pada bulan Desember, seharusnya memiliki kesuburan perairan rendah, tetapi terjadi peningkatan NPP pada bulan Desember 2019, sehingga meningkatkan nilai rata-rata PP di tahun lainnya menjadi tingkat mesotrofik.

Analisis regresi linear dilakukan pada parameter curah hujan, PAR, SPL, dan konsentrasi klorofil-a dengan NPP. Nilai koefisien korelasi (R) dapat menjelaskan hubungan dari parameter curah hujan, PAR, SPL, dan konsentrasi klorofil-a dalam memengaruhi nilai NPP. Nilai koefisien korelasi (R) parameter curah hujan, PAR, SPL, dan konsentrasi klorofil-a dengan NPP dapat dilihat pada Tabel 5 koefisien korelasi (R) NPP.

Nilai koefisien korelasi (R) tertinggi pada Tabel 5 ialah konsentrasi klorofil-a dengan nilai 0,99 pada semua bagian teluk. Koefisien korelasi (R) NPP dengan konsentrasi klorofil-a memiliki nilai yang mendekati positif satu, menandakan konsentrasi klorofil-a memiliki hubungan positif yang kuat. Peningkatan konsentrasi klorofil-a dapat meningkatkan nilai NPP. Sebaliknya, penurunan dari konsentrasi klorofil-a dapat menurunkan nilai NPP. Hubungan PAR dengan NPP memiliki nilai koefisien korelasi (R) yang paling rendah pada daerah tengah dan luar teluk secara berturut-turut dengan nilai -0,187 dan -0,19. Nilai tersebut menandakan hubungan dengan korelasi sangat lemah. Hal tersebut menyebabkan perubahan nilai pada PAR tidak berpengaruh nyata bagi nilai NPP.

Koefisien korelasi (R) pada suhu permukaan (*sea surface temperature*, SST)

dengan NPP, memiliki nilai positif dengan kategori kuat pada daerah kepala teluk, dengan nilai 0,614. Hal tersebut menunjukkan peningkatan SPL dapat meningkatkan tingkat NPP. Pada daerah tengah dan luar teluk menunjukkan nilai koefisien korelasi negatif sebesar -0,572 dan -0,693 pada kategori moderat dan kuat. Hal tersebut menandakan SPL memiliki hubungan negatif yang cukup kuat dalam memengaruhi nilai NPP pada daerah tengah dan luar teluk.

Curah hujan memiliki nilai koefisien korelasi (R) yang tinggi pada daerah kepala teluk dan menurun pada daerah tengah dan luar teluk. koefisien korelasi (R) curah hujan dengan NPP pada kepala teluk berada pada kategori korelasi kuat dengan nilai 0,748. Hubungan yang kuat NPP dengan curah hujan pada kepala teluk ditandai dengan peningkatan nutrisi yang masuk pada kepala teluk dari daratan pada saat curah hujan tinggi, sehingga nilai NPP meningkat (Rahayu *et al.*, 2018). Sedangkan, koefisien korelasi pada daerah tengah teluk berada pada kategori moderat atau cukup dengan nilai 0,475. Lalu, pada luar teluk koefisien korelasi menurun pada kategori lemah dengan nilai 0,27. Seiring menjauhi pesisir, pengaruh dari curah hujan melemah yaitu pada daerah tengah teluk memiliki pengaruh yang moderat dan pada daerah luar teluk memiliki pengaruh lemah.

KESIMPULAN

Kesuburan perairan Teluk Lampung dapat ditentukan berdasarkan nilai NPP hasil model VGPM. Secara spasial, kesuburan perairan Teluk Lampung menunjukkan tingkat

Tabel 5. Koefisien korelasi (R) dari Net Primary Productivity
Table 5. Correlation coefficient (R) of Net Primary Productivity

Zone	Correlation (R)			
	CH & PP	PAR & PP	SST & PP	CHL & PP
Head	0.748	-0.578	0.614	0.993
Middle	0.475	-0.187	-0.572	0.995
Mouth	0.270	-0.190	-0.693	0.992

kesuburan yang tinggi (eutrofik) pada daerah kepala teluk, bergradasi pada level mesotrofik di area tengah dan luar teluk. Secara temporal, kesuburan menunjukkan penurunan pada bulan Januari hingga April pada daerah luar teluk. Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa faktor utama yang menyebabkan tingkat kesuburan perairan pada perairan Teluk Lampung ialah konsentrasi klorofil-a dengan koefisien korelasi mencapai 0,99. Nilai tersebut menandakan setiap peningkatan konsentrasi klorofil-a akan meningkatkan NPP, sebaliknya setiap penurunan konsentrasi klorofil-a akan menurunkan NPP.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri K, Mamun A, Taufik M. 2021. Karakteristik oseanografi Laut Banda Bagian Barat pada musim barat dari data pengukuran *in situ* 2016. *J Kelautan dan Perikanan Terapan*. 4(1): 1–11.
<https://doi.org/10.15578/jkpt.v4i1.9688>
- Aryanti NLN, Hendrawan IG, Suteja Y. 2019. Studi variabilitas produktivitas primer bersih serta hubungannya dengan *El-Nino Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) di Laut Banda berdasarkan Data Satelit Aqua MODIS. *J of Marine and Aquatic Science*. 5(1): 64–76.
<https://doi.org/10.24843/jmas.2019.v05.i01.p08>
- Asriana dan Yuliana. 2012. *Produktivitas Perairan*. Jakarta (ID): PT Bumi Aksara.
- Behrenfeld MJ, Falkowski PG. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*. 42(1): 1-20.
<https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- Bonsdorff E, Blomqvist EM, Mattila J, Norkko A. 1997. Coastal eutrophication: Causes, consequences and perspectives in the Archipelago areas of the northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 44(1): 63-72.
[https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(97\)80008-X](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(97)80008-X)
- Dalabehara HB, Sarma VVSS. 2021. Physical forcing controls spatial variability in primary production in The Indian Ocean. *Deep-sea Research Part II*. 183(1): 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104906>
- Damar A, Colijn F, Hesseand KJ, Wardiatno Y. 2012. The eutrophication states of Jakarta, Lampung and Semangka Bays: Nutrient and phytoplankton dynamics in Indonesian tropical waters. *Journal of Tropical Biology and Conservation*. 9(1): 61-81.
<https://doi.org/10.51200/jtbc.v9i.233>
- Dariusman A. 2016. Pengembangan wisata bahari di Pesisir Teluk Lampung. *J Destinasi Kepariwisataaan*. 1(1): 45–66.
- Gunawan EA, Agussalim A, Surbakti H. 2019. Pemetaan sebaran klorofil-a menggunakan citra Satelit Landsat multitemporal di Teluk Lampung, Provinsi Lampung. *J Maspari*. 11(2): 49–58.
<https://doi.org/10.56064/maspari.v11i2.9467>
- Hardiyanto R, Seherman H, Pratama RI. 2012. Kajian produktivitas primer fitoplankton di Waduk Saguling, Desa Bongas dalam kaitannya dengan kegiatan perikanan. *J Perikanan Kelautan*. 3(4): 51-59.
- Hartanto MT, Effendi I, Prartono T, Puradiredja SP, Lestari DF, Susanti S, Salsabila A. 2024. Kondisi oseanografi dan kesesuaian lokasi budidaya lobster di Perairan Teluk Pidada, Lampung. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*. 15(3): 285-297.
<https://doi.org/10.24319/jtpk.15.285-297>
- Kartikasari F, Jaelani LM, Winarso G. 2016. Analisis sebaran konsentrasi suhu

- permukaan laut dan pH untuk pembuatan peta lokasi budidaya kerapu bebek menggunakan citra Satelit Landsat -8 (studi kasus: Teluk Lampung, Lampung). *Jurnal Teknik ITS*, 5(2): 401-406.
- Mercado-Santana JA, Santamaría-del-Ángela E, González-Silvera A, Sánchez-Velasco L, Gracia-Escobar MF, Millán-Núñez R, Torres-Navarrete C. Productivity in The Gulf of California large marine ecosystem. *Environmental Development*. 22(1): 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.01.003>
- Nuzapril M, Susilo SB, Panjaitan JP. 2017. Estimasi produktivitas primer perairan berdasarkan konsentrasi klorofil-a yang diekstrak dari Citra Satelit Landsat-8 di Perairan Kepulauan Karimun Jawa. *J Pengindraan Jauh*. 14(1): 25-36. <https://doi.org/10.30536/j.pjpdcd.2017.v14.a2548>
- Nuzapril M, Prasetyo BA. 2023. Sebaran produktivitas primer perairan di Teluk Hurun Lampung. *J Marshela*. 1(1):32-38. <https://doi.org/10.25181/marshela.v1i1.3056>
- Nybakken JW. 1988. Bilogi Laut Suatu Pendekatan Ekologis. Terjemahan M. Ediman, Koesoebiono, D.G Bengen, M. Hutomo, & S. Sukardjo. Jakarta: PT. Gramedia.
- Parsons TR, Takashi, Hargrave B. 1984. *Biological Oceanography Process*. Newyork (US): Pagaman press.
- Patty SI, Arfah H, Abdul MS. 2015. Karakteristik fosfat, nitrat, dan oksigen terlarut di Perairan Selat Lembeh, Sulawesi Utara. *J Pesisir dan Laut Tropis*. 2(1): 1-7. <https://doi.org/10.35800/jplt.3.2.2015.9579>
- Pradipta NS, Sembiring P, Bangun P. 2013. Analisis pengaruh curah hujan di Kota Medan. *Saintia Matematika*. 1(5): 459-468.
- Rabalais NN, Turner RE, D'iaz RJ, Justic' D. 2009. Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*. 66: 1528–1537. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp047>
- Rahayu NWST, Hendrawan IG, Suteja Y. 2018. Distribusi nitrat dan fosfat secara spasial dan temporal saat musim barat di permukaan Perairan Teluk Benoa, Bali. *J Mar Aqu Sci*. 4(1): 1-13. <https://doi.org/10.24843/jmas.2018.v4.i01.1-13>
- Riduwan, Kuncoro EA. 2013. *Cara Mudah Menggunakan dan Memaknai Path Analysis (Analisis Jalur)*. Bandung (ID): Alfabeta.
- Sachomar SI, Yanagi T, Hendiarti N, Sadly M, Meliani F. Seasonal variability of sea surface chlorophyll-a and abundance of pelagic fish in Lampung Bay, Southern Coastal Area of Sumatra, Indonesia. *Coastal Marine Science*. 34(1): 82-90. <https://doi.org/10.15083/00040676>
- Simbolon RA. 2016. Pencemaran bahan organik dan eutrofikasi di Perairan Cituis, Pesisir Tangerang. *J Pro-Life*. 3(2): 109-118. <https://doi.org/10.33541/pro-life.v3i2.29>
- Suhana PM, Utama FG, Putra AP, Zibar Z, Paputungan MS, Erawan MTF, Kolibongso D. 2018. Pola karakteristik sebaran medan massa, medan tekanan dan arus geostropik Perairan Selatan Jawa. *Dinamika Maritim*. 6(2): 20-25.
- Sunaryo A. 2017. Produktivitas primer di Waduk Ir. H. Juanda Kabupaten Purwakarta Provinsi Jawa Barat. *J Penyuluhan Perikanan Kelautan*. 11(2): 110-120. <https://doi.org/10.33378/jppik.v11i2.89>
- Tanto TA, Husrin S, Wishu UJ, Putra A, Putri RK, Ilham. 2016. Karakteristik oseanografi (batimetri, pasang surut, gelombang signifikan dan arus laut) Perairan Teluk Bungus. *J Kelautan*.

- 9(2): 107-121.
<https://doi.org/10.21107/jk.v9i2.1240>
- Tripathy SC, Ishizaka J, Siswanto E, Shibata T, Mino Y. 2012. "Modification of the vertically generalized production model for the turbid waters of Ariake Bay, southwestern Japan". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 97: 66–77.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.11.025>
- Triyatmo B. 2001. Kajian morfometri berdasarkan kondisi topografi dan estimasi potensi perikanan Waduk Sermo. *Jurnal Perikanan UGM*. 3(2): 27-35.
<https://doi.org/10.22146/jfs.8867>
- Umaly RC, Cuvillan LA. 1988. *Limnology; Laboratory and Field Guide Physico-Chemical Factors, Biology Factors*. Manila (PH): National Book Store Publ.
- Walpole RE. 1995. *Pengantar Statistika Edisi Ketiga*. Jakarta (ID): PT Gramedia.
- Widiarati R, Suryoputra AAD, Handoyo G. 2022. Korelasi klorofil-a dengan nutrisi dan kualitas perairan di Pulau Seruni Karimunjawa Indonesia. *J Kelautan Tropis*. 25(2): 249-256.
<https://doi.org/10.14710/jkt.v25i2.14170>
- Wulandari NNR, Aryanti NLN, Hendrawan IG. 2019. Studi variabilitas produktivitas primer bersih di Perairan Selatan Indonesia berdasarkan data satelit Aqua MODIS. *J of Marine Research and Technology*. 2(2): 38-42.
- Yulianto D, Muskananfolo MR, Purnomo PW. 2014. Tingkat produktivitas primer dan kelimpahan fitoplankton berdasarkan waktu yang berbeda di Perairan Pulau Panjang, Jepara. *J. Maquares*. 3(1): 195-200.