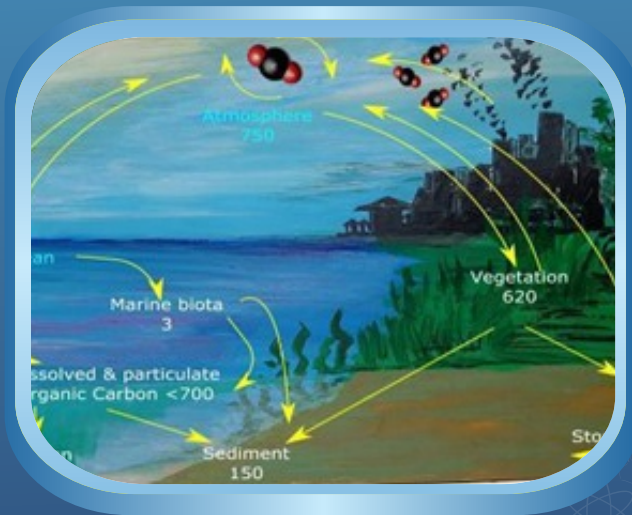


# SIGNIFIKANSI SIKLUS BIOGEOKIMIA KARBON LAUT BAGI SISTEM BIOSFER DAN PEMBANGUNAN EKONOMI BIRU INDONESIA

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET  
KEPAKARAN BIOGEOKIMIA LAUT



OLEH:

**A'AN JOHAN WAHYUDI**

**BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL**

**SIGNIFIKANSI SIKLUS BIOGEOKIMIA KARBON  
LAUT BAGI SISTEM BIOSFER  
DAN PEMBANGUNAN EKONOMI BIRU  
INDONESIA**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**SIGNIFIKANSI SIKLUS BIOGEOKIMIA  
KARBON LAUT BAGI SISTEM BIOSFER  
DAN PEMBANGUNAN EKONOMI BIRU  
INDONESIA**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET  
KEPAKARAN BIOGEOKIMIA LAUT**

OLEH:

**A'AN JOHAN WAHYUDI**

Reviewer:

Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc.

Prof. Dr. Ir. Augy Syahailatua

Prof. Dr. Iskhaq Iskandar

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2024 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Pusat Riset Oseanografi

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Signifikansi Siklus Biogeokimia Karbon Laut Bagi Sistem Biosfer dan Pembangunan Ekonomi Biru Indonesia/A'an Johan Wahyudi. Jakarta – Penerbit BRIN, 2024

xiv +93 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-623-8372-89-8 (*e-book*)

1. Oseanografi

2. Biogeokimia Laut

3. Karbon Biru

4. Ekonomi Biru

551.46

*Copy editor* : Siti Mutiara Fitry

*Proofreader* : Meita Safitri dan Martinus Helmiawan

Penata Isi : Meita Safitri

Desainer Sampul : Meita Safitri

Edisi pertama : Agustus 2024



Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, Anggota Ikapi

Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah

Gedung B. J. Habibie, Jl. M. H. Thamrin No.8,


Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,

Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340

Whatsapp: +62 811-1064-6770

*E-mail*: penerbit@brin.go.id

*Website*: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN

 @Penerbit\_BRIN

 @penerbit.brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS .....	ix
PRAKATA PENGUKUHAN .....	xiii
I. PENDAHULUAN.....	1
II. SIKLUS BIOGEOKIMIA KARBON LAUT .....	7
A. Ikhtisar siklus karbon di laut Indonesia .....	7
B. Asimilasi, sekuestrasi dan emisi karbon.....	11
C. Penurunan emisi karbon sebagai agenda nasional.....	14
III. TRANSFER BIOGEOKIMIA KARBON LAUT .....	19
A. Transfer karbon organik dan pompa biologis karbon.....	20
B. Transfer karbon dalam sistem trofi.....	23
IV. VARIABILITAS KARBON LAUT INDONESIA DAN PENGARUH FAKTOR EKSOGEN.....	25
A. Variabilitas spasio-temporal karbon organik partikulat.....	26
B. Faktor eksogen oseanik dan klimatik .....	29
V. PRAKIRAAN DERET WAKTU VARIABILITAS KARBON LAUT INDONESIA .....	35
A. Model prakiraan deret waktu.....	35
B. Prakiraan deret waktu karbon organik partikulat (POC).....	38
C. Variabel eksogen terhadap validitas model prakiraan.....	40
D. Prakiraan dan pemantauan karbon laut .....	40
VI. RELEVANSI RISET SIKLUS BIOGEOKIMIA KARBON LAUT TERHADAP PEMBANGUNAN EKONOMI BIRU.....	43
A. Peran riset karbon biru ( <i>blue carbon</i> ) .....	44
B. Peran prakiraan ( <i>forecast</i> ) variabilitas karbon laut.....	46

VII. KESIMPULAN.....	49
VIII. PENUTUP .....	51
UCAPAN TERIMA KASIH .....	53
DAFTAR PUSTAKA.....	57
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	69
DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA.....	79
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	81
DAFTAR ISTILAH.....	87

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Siklus karbon secara umum di perairan laut Indonesia.....	8
Gambar 2. Faktor emisi ekosistem padang lamun di Indonesia.....	13
Gambar 3. Proyeksi penurunan emisi karbon dari konservasi padang lamun di lima provinsi di Indonesia .....	18
Gambar 4. Laju dekomposisi SPM dari ekosistem lamun yang diekspresikan dalam bentuk karbon organik ( $C_{org}$ ) dan nitrogen total ( $N_{total}$ ). .....	22
Gambar 5. Distribusi spasial dari rata-rata POC tahunan perairan laut Indonesia. ....	26
Gambar 6. Distribusi temporal karbon organik partikulat (POC), klorofil- <i>a</i> , produktivitas primer bersih (NPP), karbon inorganik partikulat (PIC) dan oksigen terlarut (DO) untuk wilayah perairan upwelling selatan Jawa selama 2010-2020 .....	28
Gambar 7. Distribusi spasial karbon organik partikulat (POC), untuk wilayah perairan upwelling selatan Jawa. ....	30
Gambar 8. Prakiraan deret waktu variabilitas multi tahunan POC di perairan laut Indonesia. ....	38
Gambar 9. Kontribusi siklus karbon di laut Indonesia terhadap siklus karbon global.....	45



Buku ini tidak diperjualbelikan.

## BIODATA RINGKAS



Dr. A'an Johan Wahyudi, lahir di Bojonegoro, pada tanggal 20 Januari 1983 adalah anak pertama dari Bapak Kusnadi dan Ibu Ninik Cahyawati. Menikah dengan Febty Febriani, Ph.D dan dikaruniai dua orang anak, yaitu Fatah Rifqy Wahyuriansyah, dan Fawwaz Rasyad Wahyuriansyah.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 2/M Tahun 2023 Tanggal 9 Januari 2023 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 25 Januari 2023.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, 170/I/HK/2024 tanggal 5 Juli 2024 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Kalirejo 01, tahun 1995, Sekolah Menengah Pertama Negeri Ngraho, tahun 1998, dan Sekolah Menengah Umum Negeri 02 Bojonegoro, tahun 2001; memperoleh gelar Sarjana Sains dari Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Brawijaya tahun 2005, dan gelar Doktor bidang

*Sustainable Environmental Studies* dari *University of Tsukuba*, Jepang tahun 2013.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: *ProGRANT Training for Research Grant Proposal Writing* di Jakarta (2016), *ProGRANT Training for Trainer for Research Grant Proposal Writing* di Jakarta (2020), dan *SNAS's SASEA Fellowship Program* di Singapura (2023).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Kandidat Peneliti golongan III/a tahun 2010, Peneliti Ahli Muda. golongan III/c tahun 2014, Peneliti Ahli Madya tahun 2019, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama bidang Biogeokimia Laut tahun 2023.

Menghasilkan 57 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 49 KTI ditulis dalam bahasa Inggris, dan 8 dalam bahasa Indonesia.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada Pusat Riset Oseanografi; pembimbing skripsi (S-1) pada Universitas Brawijaya, Universitas Surya; pembimbing tesis (S-2) pada Institut Pertanian Bogor; pembimbing disertasi (S-3) pada Universitas Indonesia, dan Institut Pertanian Bogor; serta penguji disertasi (S-3) pada Institut Pertanian Bogor.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai *Integrated Marine Biosphere Research (IMBeR) - National Contact for Indonesia* (2021–sekarang), wakil ketua (*deputy chairman/co-champions*) *IMBeR's Blue Carbon Working Group* (2021–sekarang), anggota Ikatan Sarjana Oseanologi Indonesia (2007–sekarang), dan Persatuan Periset Indonesia (2019–sekarang).

Menerima tanda penghargaan *the Best Oral Presenter Award IOC-Westpac International Symposium* (2017), SDM Iptek Terbaik Bidang Ilmu Pengetahuan Kebumian Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (2020), *Outstanding ASEAN Science Diplomat* (2020), dan Satyalancana Karya Satya X (2017) dari Presiden Republik Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## PRAKATA PENGUKUHAN

*Bismillaahirrahmaanirrahiim.*

*Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.*

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 17 Juli 2024, menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“SIGNIFIKANSI SIKLUS BIOGEOKIMIA KARBON  
LAUT BAGI SISTEM BIOSFER DAN PEMBANGUNAN  
EKONOMI BIRU INDONESIA”

Naskah orasi ini memberikan *state of the art* mengenai siklus karbon di perairan laut Indonesia yang melibatkan berbagai reservoir dan proses aliran karbon. Naskah orasi ini mengulas

Buku ini tidak diperjualbelikan.

asimilasi, sekuestrasi, dan emisi karbon pada ekosistem karbon biru serta potensinya dalam penurunan emisi karbon, mitigasi perubahan iklim, dan kontribusinya terhadap pembangunan ekonomi biru. Naskah orasi ini menjelaskan perpindahan karbon organik antar reservoir melalui mekanisme pompa biologis karbon dan transfer karbon pada sistem trofi (jaring makanan). Selanjutnya, naskah orasi ini juga mengulas variabilitas temporal dan spasial karbon organik partikulat, pentingnya sebagai proksi pengukuran karbon laut Indonesia, dan pengaruh faktor eksogen oseanik serta klimatik seperti *El Nino* dan *Indian Ocean Dipole*. Selanjutnya, naskah ini menyampaikan ‘Prakiraan Deret Waktu Variabilitas Karbon Laut Indonesia,’ yang penting untuk memprediksi variasi karbon organik di laut, memantau kesehatan dan produktivitas laut, serta mitigasi kejadian ekstrim. Terakhir, naskah orasi menguraikan peran riset karbon biru dan prakiraan deret waktu karbon laut dalam menunjang pembangunan ekonomi biru di Indonesia.

Manfaat dari riset dan pemahaman mendalam mengenai siklus biogeokimia karbon laut ini sangat besar, terutama dalam mengembangkan strategi mitigasi perubahan iklim yang lebih efektif, mendukung kesehatan ekosistem laut, dan meningkatkan ketahanan pangan melalui pengelolaan perikanan yang berkelanjutan. Selain itu, informasi ini juga krusial untuk mendukung pembangunan ekonomi biru yang mengintegrasikan pemanfaatan sumber daya laut secara berkelanjutan dengan peningkatan kesejahteraan masyarakat pesisir dan perlindungan lingkungan laut.

## I. PENDAHULUAN

Biogeokimia merupakan salah satu cabang ilmu yang mempelajari tentang transfer material dari berbagai reservoir meliputi atmosfer, hidrosfer, litosfer, dan biosfer. Riset di bidang biogeokimia laut baru mendapat perhatian pada awal 1990an dan meningkat cukup signifikan sejak tahun 2000an (Wahyudi, 2014). Riset biogeokimia yang terkait dengan isu perubahan iklim, pengasaman laut, dan pemanasan global cukup mendapat perhatian di level global. Sementara itu riset biogeokimia yang terkait dengan aktivitas manusia menjadi populer di Asia Tenggara (Wahyudi, 2014).

Sejak awal penelitian biogeokimia karbon pada abad ke-20, bidang ini telah mengalami kemajuan yang signifikan dalam pemahaman tentang siklus karbon di alam terlebih setelah berkembangnya peralatan analisis modern. Melalui penelitian yang terus menerus dan perkembangan peralatan, para ilmuwan telah mampu mengkuantifikasi unit karbon dan mengidentifikasi peran penting organisme hidup dalam mengubah dan memengaruhi transfer karbon di berbagai lingkungan. Penemuan tentang dekomposisi material organik, (Wahyudi dkk., 2022) serta peran vegetasi laut dalam menyerap karbon dioksida dari atmosfer (Wahyudi dkk., 2018b; 2020), telah menjadi titik fokus dalam pengembangan teori dan model biogeokimia karbon terbaru. Lebih lanjut, riset mengenai transfer karbon di laut



menjadi meningkat pada awal abad ke-21 dimana istilah karbon biru (*blue carbon*) pertama kali dikenalkan.

Selain itu, perkembangan teknologi analitik dan komputasi telah memungkinkan pengumpulan dan analisis data yang lebih banyak dan lebih rinci dalam penelitian biogeokimia karbon (Triana dkk., 2021). Teknik pemetaan spasial menggunakan citra satelit dan sensor penginderaan jauh telah memungkinkan pemantauan yang lebih akurat terhadap perubahan lahan dan vegetasi laut yang memengaruhi siklus karbon (Wahyudi dkk., 2022a). Sementara itu, kemajuan dalam pemodelan komputer telah memungkinkan simulasi yang lebih presisi tentang interaksi kompleks antara faktor biologis, kimia, dan fisik yang memengaruhi distribusi dan perubahan karbon di berbagai skala (Chen & Tjandra, 2014; Kim dkk., 2019; Raman dkk., 2018; Wahyudi dkk., 2023b). Dengan terus berkembangnya teknologi dan pemahaman kita tentang biogeokimia karbon, peluang untuk meningkatkan keberlanjutan lingkungan dan mengurangi dampak perubahan iklim menjadi semakin terbuka.

Karbon merupakan unsur yang berperan dalam membentuk lingkungan kita dan menopang kehidupan (Wahyudi & Afdal, 2018). Kelangsungan semua kehidupan dan variabilitas iklim di planet kita terkait erat dengan siklus karbon. Peningkatan karbon antropogenik di atmosfer pasca revolusi industri telah mengubah kondisi planet bumi termasuk sistem biosfer (Wahyudi & Afdal, 2018). Variabilitas karbon laut juga mengalami perubahan dari waktu ke waktu yang berpengaruh pada produktivitas

laut (Wahyudi & Febriani, 2023). Oleh sebab itu, mempelajari biogeokimia karbon laut menjadi sangat penting.

Variabilitas iklim di Indonesia yang merupakan hasil dari dinamika laut dan atmosfer (Sprintall dkk., 2019) diketahui memengaruhi variabilitas biogeokimia karbon laut (Triana dkk., 2021; Wahyudi dkk., 2023a). Mekanisme hubungan antara iklim dan siklus biogeokimia laut tidak terjadi secara langsung tetapi iklim akan memengaruhi kondisi oseanik yang selanjutnya berdampak pada siklus biogeokimia laut.

Laut Indonesia memiliki peran krusial dalam siklus karbon laut global karena keberagaman karakteristik perairannya *i.e.*, keberagaman ekosistem, pengaruhnya terhadap pola sirkulasi laut di seluruh kawasan Indo-Pasifik, keberadaan Arus lintas Indonesia (ARLINDO), keberadaan laut marjinal, dan tata letak geografisnya (Sprintall dkk., 2019). Wilayah luas Indonesia, yang terletak di antara Samudra Hindia di barat dan Samudra Pasifik di timur, menjadi sangat strategis untuk pertukaran karbon antara atmosfer dan laut maupun transfer karbon antar samudra. Oleh karenanya, siklus biogeokimia karbon laut di Indonesia mencerminkan sifat dinamis, berdampak global, dan sangat berpengaruh pada sistem biosfer.

Indonesia dengan karakteristik wilayah tropis memiliki berbagai jenis ekosistem yang memungkinkan untuk tersedianya keragaman reservoir karbon. Transfer karbon yang terjadi merupakan proses yang lebih kompleks dibandingkan wilayah subtropis. Untuk itu, informasi terkait siklus biogeokimia karbon

laut Indonesia dapat sangat bermanfaat dalam menentukan kebijakan pembangunan nasional.

Naskah orasi ini mengulas lima hal. Pertama pada Bab II mengenai ‘Siklus Biogeokimia Karbon Laut’ yang menjelaskan gambaran umum siklus karbon di perairan laut yang terdiri dari berbagai reservoir dan proses aliran karbon. Bab ini juga mengulas mengenai asimilasi, sekuestrasi dan emisi karbon pada ekosistem karbon biru serta potensinya dalam penurunan emisi karbon, mitigasi perubahan iklim, dan peran dalam pembangunan ekonomi biru.

Bahasan kedua pada Bab III, mengenai ‘Transfer Biogeokimia Karbon Laut’ yang mengulas tentang transfer atau perpindahan karbon organik antar reservoir (tempat penyimpanan) karbon. Bahasan bab ini terdiri dari bahasan transfer karbon organik melalui mekanisme pompa biologis karbon dan transfer karbon pada sistem trofi (jaring makanan).

Bahasan ketiga pada Bab IV ‘Variabilitas Karbon Laut Indonesia dan Pengaruh Faktor Eksogen’ mengulas variabilitas temporal dan spasial karbon organik partikulat yang mana merupakan proksi penting dalam pengukuran karbon laut Indonesia. Karbon organik partikulat memiliki potensi signifikan dalam pompa biologis karbon di lautan. Faktor eksogen oseanik (*e.g.*, suhu laut permukaan, salinitas, dan klorofil-*a*) serta klimatik (*El Nino*, *Indian Ocean Dipole*) diulas karena perannya dalam memengaruhi variabilitas karbon di laut Indonesia.

Bahasan keempat, Bab V, adalah mengenai ‘Prakiraan Deret Waktu Variabilitas Karbon Laut Indonesia.’ Prakiraan deret waktu memiliki peran penting untuk dapat memprediksi variasi karbon organik di laut Indonesia. Prakiraan ini bermanfaat untuk memantau kesehatan dan produktivitas laut. Prakiraan deret waktu terhadap perubahan variabel biogeokimia juga bermanfaat untuk mitigasi kejadian ekstrim (*e.g.*, marak alga berbahaya, hipoksia, eutrofikasi, dsb.), pemantauan kesehatan ekosistem laut, dan pengambilan keputusan berbasis ilmu pengetahuan untuk pengelolaan laut berkelanjutan.

Selanjutnya, bahasan terakhir, Bab VI, mengenai ‘Relevansi Riset Siklus Biogeokimia Karbon Laut Terhadap Pembangunan Ekonomi Biru.’ Bab ini mengulas peran riset karbon biru dan prakiraan deret waktu karbon laut untuk menunjang pembangunan ekonomi biru di Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

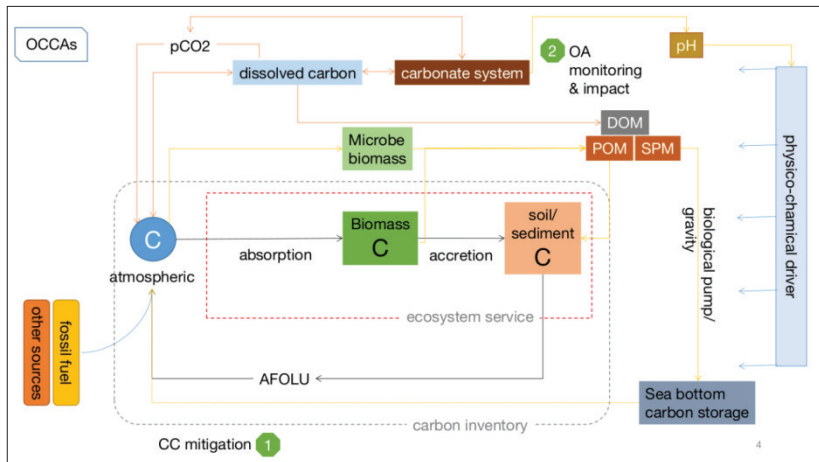
## II. SIKLUS BIOGEOKIMIA KARBON LAUT

Kesejahteraan semua kehidupan dan variabilitas iklim di planet kita terkait erat dengan siklus karbon global (Wahyudi & Afdal, 2018). Proses biogeokimia yang mendasar ini mengatur aliran dan transformasi senyawa karbon inorganik dan organik melalui atmosfer, laut, darat/terrestrial, dan makhluk hidup di bumi (Battin dkk., 2009; Falkowski dkk., 2000). Memahami siklus karbon sangat esensial untuk memahami dampak aktivitas manusia dalam emisi karbon (*e.g.*, pembakaran bahan bakar fosil dan alih guna lahan), terhadap iklim bumi dan untuk mengembangkan strategi mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan yang sedang berlangsung (Wahyudi & Afdal, 2018).

### A. Ikhtisar siklus karbon di laut Indonesia

Karbon, dalam berbagai bentuk, berperan dalam membentuk lingkungan kita dan menopang kehidupan. Unsur karbon terdapat di atmosfer sebagai karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), di lautan sebagai karbon inorganik terlarut (*dissolved inorganic carbon/DIC*), di biosfer sebagai bahan organik di dalam biomassa, dan di kerak bumi sebagai karbonat dan bahan bakar fosil (Birner dkk., 2023). Siklus karbon global adalah pertukaran dinamis karbon di antara tempat-tempat penyimpanan tersebut, yang terjadi melalui serangkaian proses alami seperti fotosintesis, respirasi, sirkulasi laut, dan pelapukan atau remineralisasi (Birner dkk., 2023).

Pentingnya siklus karbon di laut Indonesia dapat dikategorikan pada tiga hal berdasarkan alurnya (Gambar 1).



- Ket.: OCCAs = *Ocean Carbon Cycle Assessment*;  
 pCO<sub>2</sub> = tekanan parsial karbon dioksida;  
 AFOLU = *Agriculture, Forestry, Other land use change*;  
 OA = *ocean acidification*; pH = derajat keasaman;  
 DOM = *dissolved organic matter*;  
 POM = *particulate organic matter*;  
 SPM = *suspended particulate matter*; CC = *climate change*

Sumber: Wahyudi (2024)

**Gambar 1.** Siklus karbon secara umum di perairan laut Indonesia.

Pertama, siklus karbon di pesisir Indonesia yang melibatkan ekosistem pesisir bervegetasi (padang lamun dan mangrove). Proses biogeokimia karbon yang terjadi pada pesisir bervegetasi yang dikenal dengan ekosistem karbon biru meliputi asimilasi karbon dioksida menjadi karbon organik yang disimpan pada

biomassa, sekuestrasi dan akresi karbon organik pada sedimen, serta emisi karbon oleh aktivitas perubahan lahan pesisir. Proses biogeokimia karbon ini menjadi poin bahasan utama pada pengelolaan ekosistem karbon biru untuk mitigasi perubahan iklim (Wahyudi & Afdal, 2018).

Kategori kedua meliputi produksi karbon organik oleh biomassa plankton, mikroba serta serasah biomassa vegetasi pesisir. Dinamika biogeokimia yang terjadi meliputi produksi karbon organik partikulat (*particulate organic carbon/POC*) dan pompa biologis karbon (*i.e.*, pengendapan dan penyimpanan karbon organik partikulat di dasar laut). Proses ini juga berpengaruh pada dinamika karbon organik terlarut (*dissolved organic carbon/DOC*) ketika dalam prosesnya bersinggungan dengan proses remineralisasi, sistem karbonat dan karbon inorganik (Martin & Bianchi, 2023).

Kategori ketiga adalah proses kelarutan karbon yang secara kompleks dipengaruhi oleh variabilitas laut dan iklim. Proses ini berlangsung secara kimiawi dari karbon dioksida yang terlarut ke air laut disebabkan oleh perbedaan tekanan parsial karbon dioksida ( $p\text{CO}_2$ ). Proses ini berpengaruh pada sistem karbonat dan karbon inorganik. Observasi mengenai hal tersebut nantinya akan bermanfaat untuk kajian pengasaman laut dan dampaknya terhadap ekosistem (Afdal dkk., 2023).

Perairan Indonesia yang luas, di antara Samudra Hindia di sebelah barat dan Samudra Pasifik di sebelah timur, menjadikannya wilayah yang berpengaruh terhadap pola sirkulasi



laut di seluruh kawasan Indo-Pasifik (Sprintall dkk., 2019; Taufiqurrahman dkk., 2020). Pola sirkulasi ini berperan pada pertukaran karbon antara atmosfer dan lautan yang cukup dinamis, misalnya sirkulasi yang melibatkan Arus lintas Indonesia (ARLINDO) berpengaruh cukup signifikan pada variabilitas karbon organik partikulat (Wahyudi dkk., 2023a). Pengayaan karbon organik terjadi di perairan Indonesia yang sebagian besar dipengaruhi oleh dinamika pesisir dan sistem monsun (Triana dkk., 2021; Wahyudi dkk., 2023). Selain itu, iklim tropis dan perairan yang hangat mendorong produktivitas primer yang tinggi, yang mengarah pada penyerapan karbon yang substansial melalui fotosintesis vegetasi pesisir (Wahyudi dkk., 2017; Wahyudi dkk., 2020). Padang lamun dan mangrove yang luas di Indonesia juga berkontribusi terhadap kapasitas penyerapan karbon di Indonesia (Wahyudi dkk., 2017). Pesisir dan laut Indonesia juga secara dinamis mengatur sistem karbonat dan saturasi aragonit (Afdal dkk., 2023; 2024).

Namun, siklus karbon laut di Indonesia sedang menghadapi tantangan perubahan global. Meningkatnya suhu permukaan laut, pengasaman laut, dan aktivitas manusia seperti deforestasi, industrialisasi, dan penangkapan ikan yang berlebihan berpotensi mengganggu keseimbangan transfer karbon di perairan Indonesia (Wahyudi & Afdal, 2018; Wahyudi dkk., 2023a; Afdal dkk., 2023). Perubahan-perubahan ini dapat memengaruhi kesehatan ekosistem laut, mata pencaharian masyarakat pesisir, dan neraca karbon global.

## B. Asimilasi, sekuestrasi dan emisi karbon

Tiga komponen utama yang sangat relevan pada siklus karbon adalah asimilasi, sekuestrasi, dan emisi karbon (Howard dkk., 2018; Wahyudi dkk., 2018b; Wicaksono dkk., 2022). Asimilasi mengacu pada kemampuan organisme laut, seperti fitoplankton, mangrove, lamun dan makroalga, untuk mengambil karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) melalui proses fotosintesis (Indriani dkk., 2017; Angrelina dkk., 2019). Selama proses ini, karbon dioksida diubah menjadi materi organik biomassa, sekaligus menghasilkan oksigen sebagai produk sampingan yang penting untuk kehidupan.

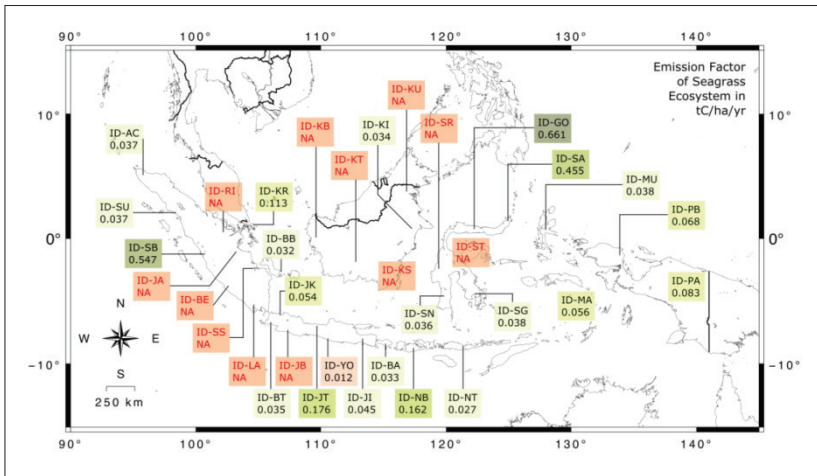
Asimilasi karbon pada ekosistem karbon biru (*e.g.*, mangrove dan padang lamun) tercatat mencapai nilai yang signifikan. Mangrove dapat mengasimilasi karbon sampai 11,87 Megagram karbon per hektar per tahun (Mg C/ ha/tahun) (Gu dkk., 2022). Padang lamun Labuan Bajo tercatat memiliki kemampuan asimilasi  $6,65 \pm 1,39$  Mg C/ha/tahun (Wicaksono dkk., 2022), sementara itu secara nasional, padang lamun Indonesia tercatat mampu mengasimilasi karbon sebesar 5,62–8,40 Mg C/ha/tahun (Wahyudi dkk., 2020).

Selanjutnya, sekuestrasi adalah proses penyimpanan karbon organik ke dalam ekosistem laut. Ekosistem padang lamun dan mangrove adalah contoh ekosistem laut yang mampu menyimpan karbon dalam jumlah besar dibandingkan dengan ekosistem vegetasi darat (Gunawan dkk., 2019; Nuraya dkk., 2019; Wahyudi dkk., 2020). Penyimpanan cadangan karbon pada

ekosistem pesisir (biomassa dan sedimen) dapat berlangsung pada kurun waktu yang lama. Hal ini berkontribusi secara signifikan dalam mengurangi konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer dan membantu mengurangi efek rumah kaca (Wahyudi dkk., 2020; Wahyudi dkk., 2022a). Total cadangan karbon pada biomassa (*atas/above-ground* dan *bawah/below-ground*) padang lamun Indonesia tercatat 0,03–5,99 Mg C/ha (Wahyudi dkk., 2020); cadangan sedimen padang lamun tercatat 293,3 - 558,4 Mg C/ha (Alongi dkk. 2016; Wahyudi dkk. 2018a). Sementara itu, ekosistem mangrove Indonesia memiliki cadangan karbon 579, 717, 890, dan 1061 Mg C/ha, masing-masing untuk rezim manajemen akuakultur, mangrove terdegradasi, mangrove yang mengalami regenerasi, dan mangrove yang tidak terganggu (Murdiyarto dkk., 2023).

Siklus karbon laut juga melibatkan proses emisi karbon. Emisi karbon terjadi saat proses dekomposisi karbon organik baik dari biomassa maupun sedimen dan menghasilkan karbon dioksida yang dilepas kembali ke atmosfer. Pada skala ekosistem, dekomposisi biomassa selaku cadangan karbon organik, dapat dipicu oleh alih guna lahan ekosistem pesisir. Emisi karbon dari alih lahan hutan mangrove secara global diperkirakan sebesar 0,02–0,12 Petagram karbon per tahun (Pg C/tahun) (Atwood dkk., 2017). Sedangkan di Indonesia, emisi dari ekosistem mangrove diperkirakan  $23,8 \pm 7,6$  Mg CO<sub>2</sub>/ha/tahun (rezim akuakultur), diikuti oleh mangrove yang mengalami regenerasi dan mangrove yang tidak terganggu sebesar masing-masing

13,5±4,5 dan 7,9±1,4 Mg CO<sub>2</sub>/ha/tahun (Murdiyarto dkk., 2023). Sedangkan emisi dari padang lamun diperkirakan antara 0,05 sampai 2,42 Mg CO<sub>2</sub>/ha/tahun dengan rata-rata cakupan nasional sebesar 0,46 Mg CO<sub>2</sub>/ha/tahun (Wahyudi & Febriani, 2021; Gambar 2).



Ket.: Faktor emisi ekosistem padang lamun di Indonesia (34 provinsi) dalam ton karbon per hektar per tahun (tC/ha/yr); kode provinsi mengacu pada ketentuan *International Organization for Standardization* (ISO 3166-2)

Sumber: Wahyudi & Febriani (2021)

**Gambar 2.** Faktor emisi ekosistem padang lamun di Indonesia

Nilai-nilai ini selanjutnya menjadi faktor emisi perubahan ekosistem mangrove dan padang lamun secara nasional di Indonesia. Faktor emisi merupakan konstanta penting dalam perhitungan neraca karbon dan target penurunan emisi pada dokumen *National Determined Contribution* (NDC).

### C. Penurunan emisi karbon sebagai agenda nasional

Upaya penurunan emisi karbon di Indonesia telah menjadi target bersama. Indonesia memiliki target penurunan emisi karbon sebesar 29–31,9% bila dilakukan secara mandiri atau 41–43,2% jika dilakukan dengan bantuan luar negeri (Wahyudi dkk., 2021a). Target ini secara eksplisit dicanangkan pada dokumen *National Determined Contribution* (NDC) Indonesia. Selanjutnya, program *Low Carbon Development Initiative* (LCDI) diluncurkan pada tahun 2020. Tantangan saat ini adalah memasukkan kontribusi sektor laut dan perikanan, sehingga mampu meningkatkan capaian penurunan emisi. Untuk mengimplementasikan aktivitas sebagai bagian dari pengurangan emisi karbon dalam LCDI, perlu ditetapkan metode penghitungan yang dapat diukur, dilaporkan, dan diverifikasi (*Measurable, Reportable, Verifiable/MRV*). Terkait hal ini, Wahyudi dkk. (2021a; 2022a) merumuskan metode inventarisasi karbon pada ekosistem padang lamun, terutama *offset* karbon untuk aktivitas konservasi padang lamun pada Kawasan Perlindungan Laut (*Marine Protected Area/MPA*).

*Offset* karbon merupakan upaya penurunan gas rumah kaca atau emisi karbon yang dibuat untuk mengimbangi (mengompensasi) emisi yang dihasilkan di tempat lain. Metode yang ditawarkan untuk perhitungan *offset* karbon (Tabel 1)

**Tabel 1.** Perhitungan offset karbon aktivitas konservasi padang lamun di Kawasan Konservasi Perairan (data dan informasi yang diperlukan, rumus perhitungan, tahapan perhitungan)

Variabel	Satuan	Rumus Formula
Total Kawasan Konservasi Perairan di provinsi	ha	
Total area terumbu (reef flat) di provinsi	ha	
Total area terumbu (reef flat) di Kawasan Konservasi Perairan	ha	
Area total padang lamun di provinsi (At)	ha	At
Total area padang lamun dalam Kawasan Konservasi Perairan (Am)	ha	Am
Persentase area padang lamun dalam Kawasan Konservasi Perairan dibanding dengan total luas padang lamun keseluruhan	%	
<b>Data ekologis</b>		
Biomass lamun	g/m <sup>2</sup>	
Kerapatan lamun	shoots/m <sup>2</sup>	
Persentase tutupan lamun	%	
<b>Cadangan karbon</b>		
Cadangan karbon biomassa atas (above- ground)	gC/m <sup>2</sup>	
Cadangan karbon biomassa bawah (below-ground)	gC/m <sup>2</sup>	
Cadangan karbon biomassa total	gC/m <sup>2</sup>	
Asimilasi/ sekuestrasi karbon	tonC/ha/y	
<b>Rerata cadangan karbon biomassa total (Cstock)</b>	tC/ha	Cstock

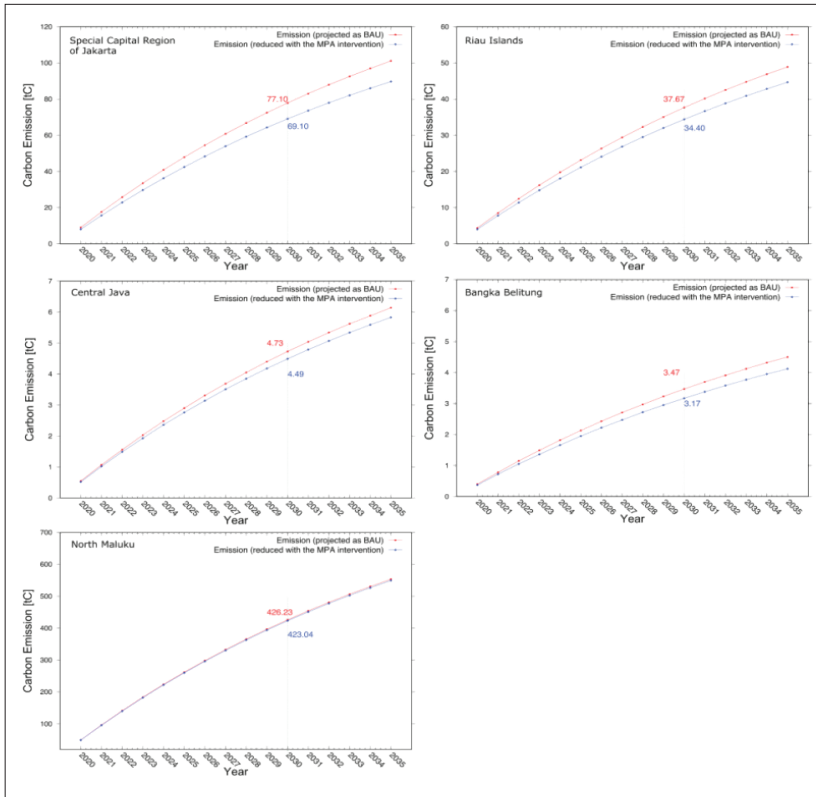
Variabel	Satuan	Rumus Formula
<b>Emisi baseline</b>		
Cadangan karbon total (stock total)	tC	Stock total = $At * C_{stock}$
Laju degradasi (Q)	ha/yr	$Q = \%Q * At$  (note: $\%Q = 5\%$ )
Faktor emisi (EF) (note: $\%Et$ is 4%)		$EF = C_{stock} * \%Et$
Emisi baseline (Ex)	tC/yr	$Ex = EF * Q$
<b>Kebocoran emisi</b>		
Cadangan karbon total (stock total)	tC	Stock total = $Am * C_{stock}$
Laju degradasi (Qu)	ha/yr	$Qu = \%Qu * Am$
Faktor emisi (EF1)		$EF1 = C_{stock} * \%Et$ (note: $\%Et$ is 2%)
Kebocoran emisi (El)	tC/yr	$El = EF1 * Qu$
<b>Penurunan emisi</b>		
Cadangan karbon total (stock total)	tC	Stock total = $Am * C_{stock}$
Laju degradasi (Qc)	ha/yr	$Qc = \%Qc * Am$
Faktor emisi (EF)		$EF = C_{stock} * \%Et$ (note: $\%Et$ is 4%)
Penurunan emisi (Er)		

Variabel	Satuan	Rumus Formula
Dengan kebocoran	tC/yr	$Er = - (EF*Qc) + (EI)$
Tanpa kebocoran	tC/yr	$Er = - (EF*Qc)$
Reduced emission (R)	tC	$R=Ex-Er$
Percentage of emission reduction	%	$\% = -(Er/Ex)*100$

Sumber: Wahyudi dkk. (2021a)

Tabel 1 meliputi: a) data dan informasi minimum yang diperlukan, b) pengembangan rumus perhitungan, dan c) langkah perhitungan: emisi baseline (dalam skenario *business as usual*), kebocoran emisi ketika mengimplementasikan aktivitas mitigasi, dan perhitungan pengurangan emisi (Wahyudi dkk., 2021a). Berdasarkan hasil riset (Wahyudi dkk., 2022a), diketahui bahwa di antara provinsi yang memiliki daerah konservasi padang lamun 5% hingga 75% dari total area pesisir, dapat berkontribusi pada penurunan emisi karbon antara 0,75% hingga 11,3% (Gambar 3).





Ket.: Proyeksi penurunan emisi karbon dari konservasi padang lamun di DKI Jakarta, Kepulauan Riau, Jawa Tengah, Bangka Belitung, Maluku Utara. BAU=*Business as Usual*; MPA=*Marine Protected Area*.

Sumber: Wahyudi dkk. (2022)

**Gambar 3.** Proyeksi penurunan emisi karbon dari konservasi padang lamun di lima provinsi di Indonesia

Investigasi lebih lanjut menunjukkan korelasi positif antara persentase area padang lamun yang dikonservasi dengan persentase penurunan emisi.

### III. TRANSFER BIOGEOKIMIA KARBON LAUT

Karbon dapat berpindah dari satu reservoir ke reservoir lainnya. Proses inilah yang lazim disebut transfer atau fluks karbon. Transfer biogeokimia karbon merujuk pada pergerakan karbon di antara berbagai reservoir ekosistem dan lingkungan, termasuk atmosfer, hidrosfer, litosfer, dan biosfer (Wahyudi dkk., 2023c). Proses ini melibatkan serangkaian peristiwa di mana karbon berpindah dari satu tempat ke tempat lain melalui berbagai proses.

Transfer biogeokimia karbon di laut tidak dapat dilepaskan dari konteks siklus karbon. Selain transfer karbon inorganik (Dai dkk., 2022), laut juga menjadi reservoir besar untuk transfer karbon organik (Wahyudi dkk., 2023c). Beberapa objek kajian dalam konteks pengukuran dan pemantauan laut untuk siklus karbon diantaranya adalah karbon organik partikulat (Triana dkk 2021; Wahyudi & Afdal, 2019; Wahyudi dkk., 2021b), pompa biologis karbon (Wahyudi dkk., 2016; Wahyudi dkk., 2017; Wahyudi dkk., 2021b), dan transfer karbon dalam sistem trofi (Wahyudi dkk., 2013; 2016; 2021b; 2022b; 2023c).

Kajian mengenai karbon organik dan pompa biologis karbon menunjukkan bahwa karbon organik partikulat dan terlarut merupakan proksi penting dalam pemantauan laut dan pesisir (Wahyudi & Afdal, 2019; Triana dkk., 2021; Martin & Bianchi, 2023). Transfer karbon organik partikulat dari air ke sedimen

pesisir Indonesia diperkirakan mencapai lebih dari 9 Tg C/tahun (Wahyudi dkk., 2016; Wahyudi dkk., 2021b).

Sementara itu, transfer karbon melalui sistem trofi terjadi sesuai dengan komunitas makhluk hidup yang terlibat dan ukuran jejaring makanan (Wahyudi dkk., 2013; 2015; 2022b). Total karbon yang berpindah dalam sistem trofi akan selalu tergantung pada lokasi, jenis ekosistem, dan reservoar yang terlibat (Wahyudi dkk., 2023c).

#### **A. Transfer karbon organik dan pompa biologis karbon**

Karbon organik partikulat dan karbon organik terlarut menjadi proksi yang cukup penting dalam pengukuran dan pemantauan laut dan pesisir (Triana dkk., 2021; Martin & Bianchi, 2023). Transfer karbon di dalam dan antar ekosistem pesisir dapat diukur dengan menentukan jumlah transfer karbon organik partikulat (Wahyudi & Afdal, 2019; Wahyudi dkk., 2021b). Materi partikulat pada ekosistem padang lamun Indonesia berkontribusi terhadap transfer karbon organik dari kolom air ekosistem ke sedimen permukaan sebesar 557,6–1.130 gC/m<sup>2</sup>/tahun (Wahyudi dkk., 2016; Wahyudi dkk., 2021b) atau maksimum 11,4 Mg C/ha/tahun. Jika mengacu pada potensi luas padang lamun Indonesia 875.967 ha (Wahyudi dkk., 2020), maka transfer karbon organik partikulat dari air ke sedimen pesisir Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 9,99 Tg C/tahun (Wahyudi dkk., 2016; Wahyudi dkk., 2021b)

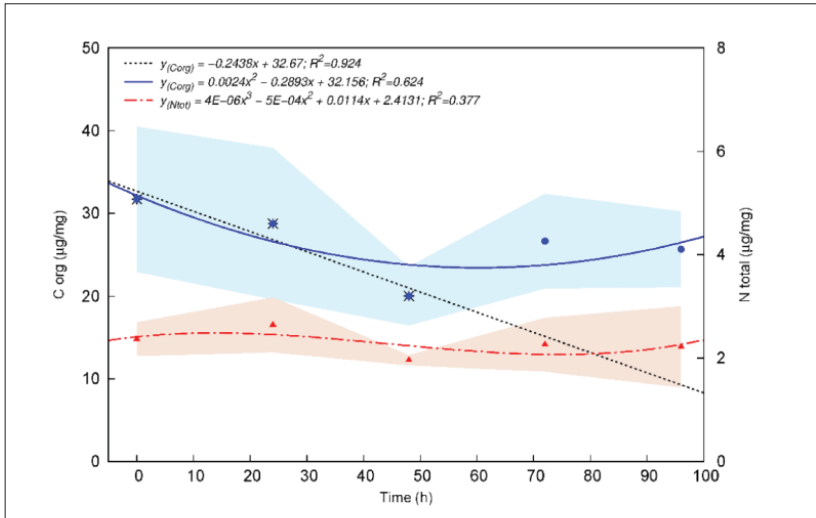
Karbon organik partikulat pada ekosistem pesisir berasal dari berbagai sumber *autochthonous* (detritus lamun dan makroalga,

plankton, agregat mikroorganisme dan material laut/*marine-end* lainnya) dan *allochthonous* (detritus tumbuhan C3 dan C4, serta material daratan/*terrestrial-end* lainnya) (Wahyudi dkk., 2016; Wahyudi & Afdal, 2019). Sementara itu, karbon organik partikulat pada permukaan laut terbuka umumnya berasal dari sumber *autochthonous*. Meskipun demikian, sampai lapisan kedalaman 100–300 m, sumber karbon organik partikulat merupakan campuran antara material laut dan daratan (Wahyudi dkk., 2019a; 2019b).

Karbon organik partikulat di lapisan permukaan laut, yang berasal dari sumber laut dan darat, pada akhirnya akan dipompa ke zona batipelagis (*i.e.*, zona pada 200–2500 meter di bawah permukaan laut) dan sedimen bawah permukaan (Honjo dkk., 2014; Wahyudi dkk., 2017; Triana dkk., 2021). Proses ini terjadi melalui mekanisme gaya gravitasi dan pencampuran massa air. Proses ini kemudian dikenal sebagai pompa biologis karbon (Siegel dkk., 2023). Potensi transfer karbon organik partikulat di laut tercatat sebesar ~10 Pg C/tahun (Siegel dkk., 2023) dengan sequestrasi total sebesar 1.300 Petagram karbon (Pg C) dalam bentuk massa materi partikulat (Nowicki dkk., 2022). Indonesia dengan luas wilayah perairan laut 640 juta hektar berpotensi memiliki transfer karbon organik sebesar 15,6 Mg C/ha/tahun.

Meskipun potensi sequestrasi karbon organik melalui pompa biologis cukup besar, hasil riset menunjukkan tidak semuanya kemudian berhasil diendapkan di sedimen laut (Martin & Bianchi, 2023; Wahyudi dkk., 2021b). Proses dekomposisi dan remineralisasi terjadi pada materi organik partikulat

selama berada di kolom air. Riset oleh Wahyudi dkk. (2021b) mengungkapkan bahwa laju dekomposisi materi partikulat tercatat 5,9–26,6  $\mu\text{gC}/\text{mg}/\text{hari}$ ; atau 0,6%–2,7% dari materi partikulat di kolom air (Gambar 4).



Ket.: Garis putus-putus hitam (dan simbol x) menunjukkan regresi linier dari laju dekomposisi karbon organik *suspended particulate matter/SPM* selama 48 jam; garis biru (dan lingkaran berwarna biru) menunjukkan regresi polinomial dari laju dekomposisi karbon organik untuk seluruh periode percobaan; garis putus-putus merah (dan segitiga berwarna merah) menunjukkan laju dekomposisi nitrogen total SPM. Area yang diarsir menunjukkan standar deviasi.

Sumber: Wahyudi dkk. (2021)

**Gambar 4.** Laju dekomposisi SPM dari ekosistem lamun yang diekspresikan dalam bentuk karbon organik ( $C_{\text{org}}$ ) dan nitrogen total ( $N_{\text{total}}$ ).

Perbandingan antara estimasi transfer total materi partikulat sebesar  $\sim 10$  Pg C/tahun dengan total karbon yang diendapkan sebesar 0,02–0,2 Pg C/tahun, maka ada kemungkinan besar materi partikulat pada akhirnya mengalami remineralisasi dan dekomposisi, serta mengembalikan karbon organik pada bentuk

karbon inorganik terlarut dan karbondioksida meski dalam kurun waktu yang lama antara 45–150 tahun (Siegel dkk., 2023).

## **B. Transfer karbon dalam sistem trofi**

Selain pompa biologis karbon dengan mekanisme gaya gravitasi dan pencampuran massa air, transfer karbon juga terjadi dalam sistem trofi jejaring makanan (Wahyudi dkk., 2013; Wahyudi dkk., 2015; Indriana dkk., 2018; Wahyudi dkk., 2022b). Meskipun demikian, Siegel dkk. (2023) mengategorikan proses ini termasuk dalam pompa biologis karbon juga dengan mekanisme migrasi reservoir organisme.

Karbon organik pada organisme autotrof ekosistem pesisir berbatu mengalami transfer menuju reservoir komunitas kepiting subtropis hirisogani (*Gaetice depressus*) sebesar 25,2 mgC/m<sup>2</sup>/hari (Wahyudi dkk., 2013; Wahyudi dkk., 2015). Selanjutnya, karbon organik pada reservoir komunitas kepiting hirisogani mengalami transfer kembali ke lingkungan sebesar 5,6 mgC/m<sup>2</sup>/hari, sehingga sekitar 75% karbon organik mengalami asimilasi pada reservoir komunitas kepiting tersebut (Wahyudi dkk., 2015). Selanjutnya, diketahui juga bahwa komunitas teripang pasir *Holothuria scabra* secara individu memberikan kontribusi transfer karbon organik ke lingkungan sebesar 210 mgC/hari dengan kemampuan asimilasi karbon dari pakan sebesar maksimal 58% (Indriana dkk., 2018; Wahyudi dkk., 2022b)

Penelitian lainnya menunjukkan proses serupa terkait transfer karbon organik melalui jejaring makanan dan sistem trofi yang juga terkait erat dengan pengayaan material lainnya

seperti logam runtuhan (Wahyudi dkk., 2023c). Penelitian ini memanfaatkan penanda alami isotop stabil karbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) dan nitrogen ( $\delta^{15}\text{N}$ ). Hasilnya menyebutkan bahwa karbon organik, logam kadmium (Cd) dan besi (Fe) mengalir mengikuti sistem trofi mulai dari organisme autotrof (produsen primer) sampai pada level predator (Wahyudi dkk., 2023c).

#### IV. VARIABILITAS KARBON LAUT INDONESIA DAN PENGARUH FAKTOR EKSOGEN

Materi karbon organik pada sistem biosfer laut yang dapat menjadi proksi pengukuran dan pengamatan variabilitas laut adalah karbon organik partikulat yang merupakan variabel penting dalam proses pompa biologis karbon (*biological carbon pump*) di laut terbuka. Variabel karbon organik partikulat sangat terkait erat dengan nutrisi, klorofil, dan produktivitas primer (Wahyudi dkk., 2023a). Selain itu, karbon organik partikulat sangat dipengaruhi oleh fenomena iklim (e.g., *Indian Ocean Dipole/IOD*, *El Niño*; Tabel 2) dan variabel oseanik (suhu dan salinitas) (Triana dkk., 2021). Oleh karenanya, pengukuran dan pengamatan terhadap variabilitas karbon organik partikulat dapat memberikan informasi yang cukup komprehensif terhadap perubahan laut dan potensi dampaknya.

**Tabel 2.** Terjadinya puncak tinggi konsentrasi karbon organik partikulat (POC) di perairan Indonesia bersamaan dengan kejadian *El Niño Southern Oscillation (ENSO)* dan *Indian Ocean Dipole (IOD)*

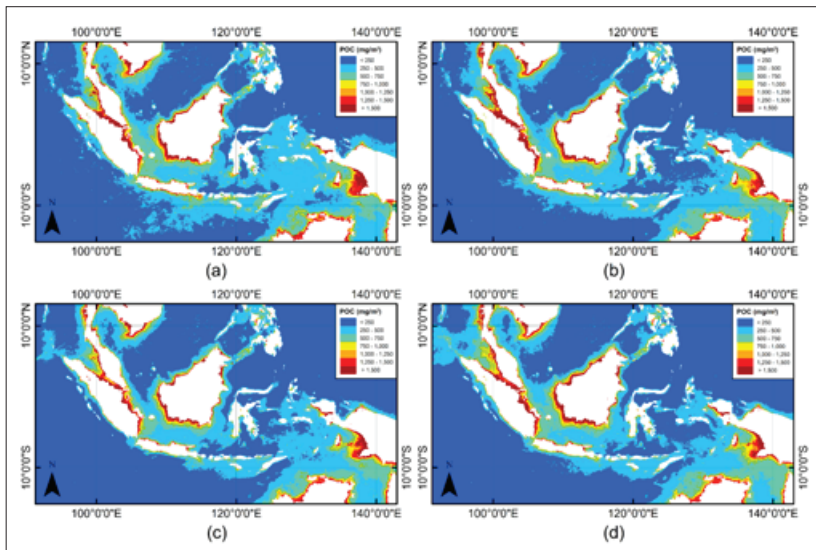
Tahun	ENSO	IOD
2003	Moderate <i>El Niño</i>	Moderate IOD+
2006	La Niña	Strong IOD+
2011	La Niña	Moderate IOD- to moderate IOD+
2015	Strong <i>El Niño</i>	Moderate IOD- to moderate IOD+
2019	Moderate <i>El Niño</i>	Strong IOD+

Sumber: Triana dkk. (2021)



## A. Variabilitas spasio-temporal karbon organik partikulat

Triana dkk (2021) mengeksplorasi variasi spasial dan temporal karbon organik partikulat (*particulate organic carbon/POC*) permukaan di perairan Indonesia di empat sub-kawasan (perairan barat Sumatra, Selat Sunda, perairan Sawu, dan Laut Halmahera). POC menunjukkan gradien dari yang tertinggi di Laut Halmahera hingga yang terendah di perairan barat Sumatra, dengan tren yang semakin meningkat dari daerah lepas pantai ke arah pesisir. Konsentrasi tinggi POC yang meningkat terutama pada area dengan muara sungai-sungai besar, terutama di Selat Malaka, perairan timur Sumatera, perairan barat dan selatan Kalimantan, dan Laut Arafura bagian utara (Gambar 5). Proses



Sumber: Triana dkk. (2021)

Ket.: a) 2002, b) 2008, c) 2014, d) 2020

**Gambar 5.** Distribusi spasial dari rata-rata POC tahunan perairan laut Indonesia.

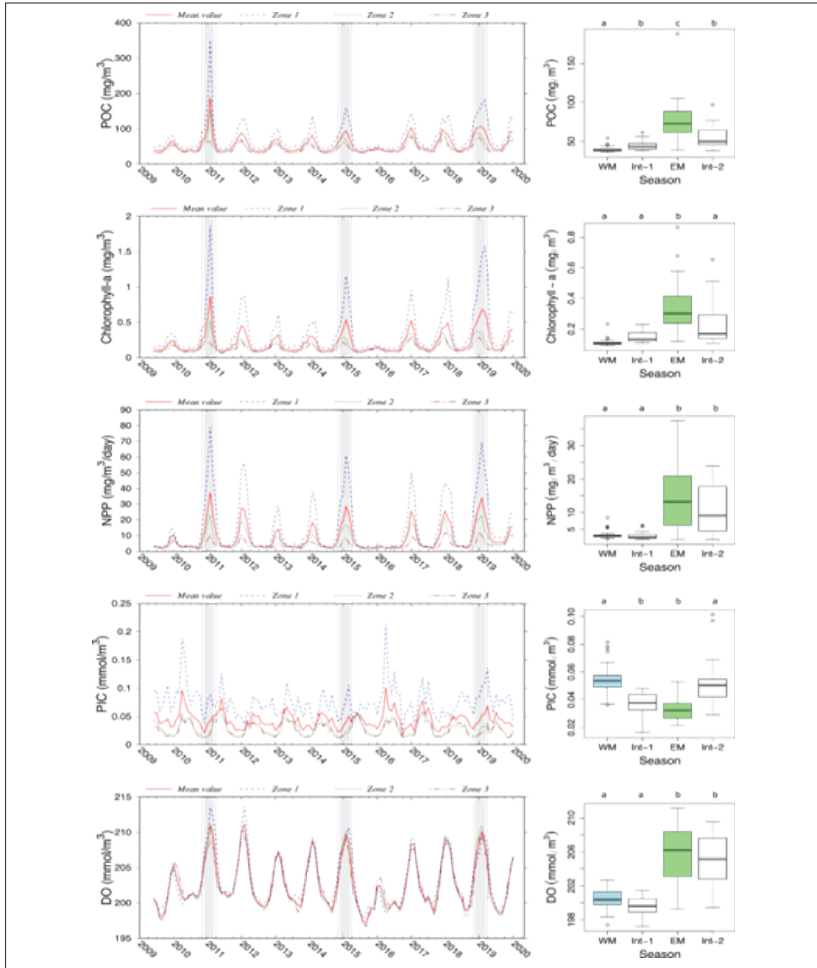
fisika-kimia laut dan pengaruh antropogenik berkontribusi terhadap fluktuasi POC secara spasial dan temporal.

Setiap tahunnya, POC laut Indonesia mencapai konsentrasi puncak selama musim monsun tenggara, yang juga berkorelasi dengan peningkatan konsentrasi klorofil-*a* dan penurunan suhu permukaan laut (*sea surface temperature/SST*). Sementara itu, pada musim monsun barat laut, perairan laut Indonesia menunjukkan POC yang lebih rendah, yang terkait dengan penurunan klorofil-*a* dan peningkatan SST (Triana dkk., 2021). Wahyudi dkk. (2023a) menjelaskan bahwa musim monsun timur/tenggara (Juli–September) merupakan periode dimana POC, klorofil-*a*, produktivitas primer bersih (*net primary production/NPP*), karbon inorganik partikulat (*particulat inorganic carbon/PIC*) dan oksigen terlarut (*dissolved oxygen/DO*) mengalami peningkatan signifikan dibandingkan pada musim-musim lainnya (Gambar 6). Catatan mengenai periodisasi musim monsun terdapat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Periodisasi monsun di Indonesia

Tahun	Belahan bumi utara	Belahan bumi selatan
Des, Jan, Feb, [Mar]	Monsun timur laut	Monsun barat [barat laut]
[Mar], Apr, Mei	Peralihan I	Peralihan I
Jun, Jul, Agu, [Sep]	Monsun barat daya	Monsun timur [tenggara]
[Sep], Okt, Nov	Peralihan II	Peralihan II

Sumber: Wahyudi dkk. (2023b)



Sumber: Wahyudi dkk. (2023)

Ket.: Area yang diarsir menunjukkan periode yang bersamaan dengan kejadian IOD dan *El Niño*. WM = monsun barat, Int-1 dan Int-2 = musim peralihan pertama dan kedua, EM = monsun timur. *Boxplot* di panel kanan merupakan rata-rata dari Zona 1, 2, dan 3. Notasi huruf pada plot kotak menunjukkan hasil uji (*Kruskal-Wallis* dengan uji *Posthoc Dunn test*,  $p < 0,05$ ).

**Gambar 6.** Distribusi temporal karbon organik partikulat (POC), klorofil-*a*, produktivitas primer bersih (NPP), karbon inorganik partikulat (PIC) dan oksigen terlarut (DO) untuk wilayah perairan upwelling selatan Jawa selama 2010-2020

## B. Faktor eksogen oseanik dan klimatik

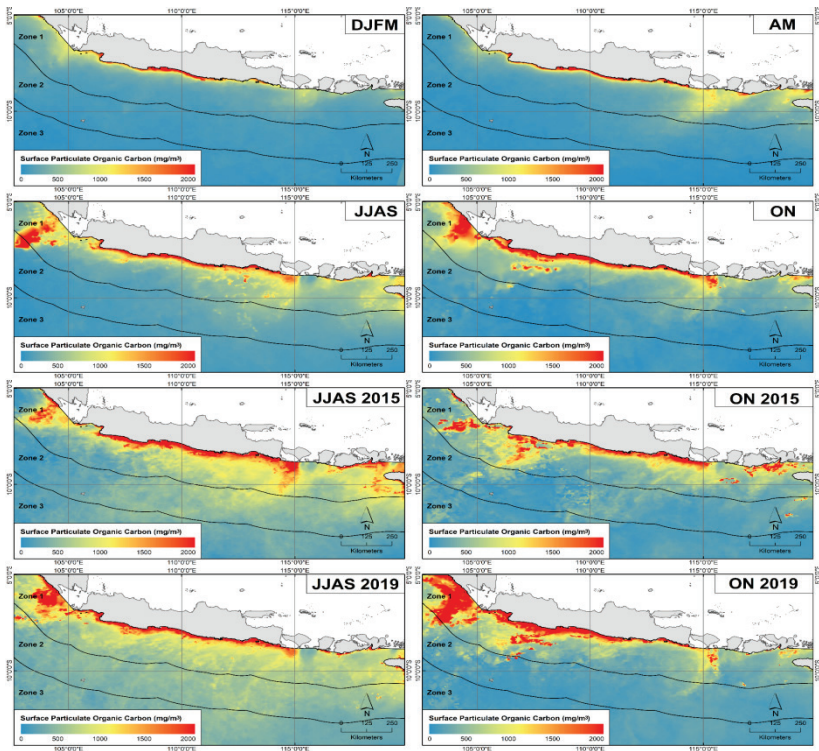
Selain memiliki pengaruh signifikan terhadap variabilitas karbon, beberapa variabel oseanografi fisik (*e.g.*, suhu, salinitas) dan iklim (*e.g.*, sistem monsun, *El Niño*, dan IOD) juga berpengaruh pada variabilitas respon biogeokimiawi. Faktor eksternal yang berpengaruh pada variabel biogeokimiawi ini disebut sebagai faktor eksogen.

POC menunjukkan peningkatan yang signifikan pada tahun 2003, 2006, 2011, 2015, dan 2019 bersamaan dengan periode *El Niño* dan IOD (Tabel 2). Berdasarkan *Oceanic Niño Index* dan *Dipole Mode Index*, puncak tertinggi klorofil-*a* dan POC terjadi di perairan selatan Pulau Jawa bersamaan dengan kejadian IOD+. Pengayaan POC juga signifikan terjadi saat *El Niño* pada tahun 2015 (Triana dkk., 2021; Triana dkk., 2023; Wahyudi dkk, 2023a). Peningkatan konsentrasi POC laut Indonesia sebagai dampak simultan *El Niño* dan IOD+ setara dengan dampak simultan *La Niña* dan IOD- (Triana dkk., 2021).

Selain faktor klimatik *El Niño* dan IOD, telah jamak diketahui bahwa *upwelling* juga muncul sebagai faktor fisik yang memengaruhi variasi spasial dan temporal parameter biogeokimia. Respon biogeokimiawi karbon organik partikulat dan nutrien di laut selatan Jawa menunjukkan peningkatan konsentrasi yang cukup signifikan pada periode *upwelling* antara bulan Juni sampai November (Wahyudi dkk., 2023a).

Selanjutnya, apabila *upwelling* terjadi bersamaan dengan terjadinya *El Niño* dan IOD (misalnya pada tahun 2015 dan

2019), maka pengayaan konsentrasi karbon organik, klorofil-*a*, dan nutrisi dapat mencapai dua atau tiga kali lipat (Wahyudi dkk., 2023a) seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Sumber: Wahyudi dkk. (2023a)

Ket.: Variabilitas spasial karbon organik partikulat (POC) ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ); nilai rata-rata musiman untuk semua tahun (2010–2020) dibandingkan dengan periode upwelling (JJAS=Juni—September dan ON=Oktober—November) pada tahun 2015 dan 2019.

**Gambar 7.** Distribusi spasial karbon organik partikulat (POC), untuk wilayah perairan upwelling selatan Jawa.

Arus lintas Indonesia (ARLINDO) juga berpotensi memengaruhi pengayaan karbon seperti yang ditunjukkan oleh distribusi spasial POC, NPP, dan klorofil-*a*, yang menunjukkan tren yang berbeda di Selat Lombok yang merupakan jalur ARLINDO (Wahyudi dkk., 2023a). Namun, banyak faktor yang dapat memengaruhi terjadinya *upwelling* dan tingkat potensi pengayaan karbon setiap tahun (Wahyudi dkk., 2023a). Misalnya, konsentrasi POC dipengaruhi oleh musim dan konsentrasinya spesifik di setiap area yang mengalami pertukaran air (Fan dkk., 2018).

Telah dijelaskan di atas bahwa faktor iklim seperti sistem monsun, *El Niño*, dan IOD dapat memengaruhi variabilitas karbon dan nutrien di laut. Nutrien nitrat dan fosfat merespon dinamika oseanik dan klimatik dengan tren yang mirip dengan POC, namun nutrien silikat memiliki respon berbeda dimana pengayaan tidak terjadi saat periode fenomena iklim *El Niño*, dan IOD (Wahyudi dkk., 2023a).

Respon biogeokimiawi terhadap dinamika klimatik dan oseanik terjadi juga pada beberapa variabel biogeokimia yang lain. Dua dari beberapa diantaranya adalah oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*), dan logam runtuhan. Penurunan kadar oksigen terlarut—dikenal dengan deoksigenasi—terkait erat dengan pemanasan suhu permukaan laut, dan peningkatan salinitas (Triana dkk., 2023). Laju deoksigenasi di laut Indonesia diperkirakan sebesar  $0,86 \pm 0,03$  mmol/m<sup>3</sup>/tahun. DO permukaan menurun secara signifikan setelah fenomena *El Niño* berakhir,

sementara tidak ada efek yang menonjol pada DO permukaan ketika *La Niña* terjadi (Triana dkk., 2023).

DO akan berbanding terbalik dengan suhu permukaan laut. Setiap perubahan peristiwa iklim seperti IOD, *El Niño*, dan *La Niña* yang memengaruhi suhu permukaan laut, maka pada akhirnya akan berpengaruh pada DO (Triana dkk., 2023). Korelasi positif yang signifikan antara *dipole mode index (DMI)* dan DO permukaan di perairan laut Indonesia menunjukkan bahwa ketika terjadi kejadian IOD+, maka SST akan menurun dan konsentrasi DO permukaan akan meningkat. Sementara itu, ketika terjadi peristiwa IOD-, SST akan meningkat dan konsentrasi DO permukaan akan berkurang (Triana dkk., 2023).

Pada kasus logam runutan, faktor klimatik memang tidak secara langsung memberikan pengaruh pada variabilitas logam runutan (Lestari dkk., 2021). Meskipun demikian, diketahui bahwa faktor klimatik sangat berpengaruh terhadap *upwelling* Sumatra-Jawa (Wahyudi dkk., 2023a). Sementara itu, proses *upwelling* Sumatra-Jawa dapat memicu perpindahan air laut yang kaya nutrisi mengangkut logam dari lapisan bawah, yang menyebabkan peningkatan logam runutan kadmium (Cd) dan tembaga (Cu). Aktivitas *upwelling* yang intens terjadi pada periode Juli sampai September di laut selatan Jawa (Baumgart dkk., 2010), dan proses ini dapat meningkatkan konsentrasi Cd dan Cu terlarut (Lestari dkk., 2021).

Berdasarkan ulasan di atas, fenomena iklim sangat berpengaruh terhadap siklus biogeokimia. Namun mekanisme hubungan antara fenomena iklim dan siklus biogeokimia tidak bersifat langsung. Iklim akan memengaruhi kondisi oseanik, dan perubahan oseanik inilah yang selanjutnya direspon oleh variabel biogeokimia. Lebih jauh, respon dan dinamika siklus biogeokimia dari pengaruh faktor klimatik dan oseanik akan berbeda sesuai dengan jenis variabelnya. Variabel POC, DO, nutrien dan logam berat terlarut memberikan respon yang berbeda terhadap dinamika klimatik dan oseanik. Oleh karenanya, dalam rangka pengelolaan laut berkelanjutan, maka diperlukan observasi, pengukuran, dan prakiraan proksi variabel biogeokimia laut yang tepat dan presisi.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

## V. PRAKIRAAN DERET WAKTU VARIABILITAS KARBON LAUT INDONESIA

Telah diketahui bahwa peningkatan signifikan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) di atmosfer menyebabkan perubahan pada siklus karbon dan biogeokimia unsur, yang selanjutnya memicu pemanasan global, perubahan iklim, pengasaman laut, dan respons tidak langsung berupa deoksigenasi (Triana dkk., 2023; Wahyudi dkk., 2023b). Penelitian sebelumnya telah menekankan bahwa peningkatan  $\text{CO}_2$  akan meningkatkan produksi karbon organik partikulat (POC) secara linear melalui peningkatan partikel eksopolimer transparan (*transparent exopolymer particle/TEP*) maupun fitoplankton (Engel, 2002). POC selanjutnya dikenal sebagai salah satu proksi penting untuk pemantauan dan pengukuran dinamika karbon (Close & Henderson, 2020; Wahyudi dkk., 2023b). Oleh karenanya, untuk menilai dampak potensial dari tingginya  $\text{CO}_2$ , perlu dilakukan pengukuran dinamika karbon dalam siklus karbon laut antara lain dengan menggunakan pengukuran POC (Wahyudi dkk., 2023b), sistem karbonat (Afdal dkk., 2023), atau saturasi aragonit (Afdal dkk., 2024).

### A. Model prakiraan deret waktu

Variabilitas karbon laut lazimnya dikaji dengan pendekatan data lampau (*hindcast*) dan data pengukuran (observasi) saat ini (*e.g.*, Triana dkk., 2021; Wahyudi dkk., 2023a). Namun, kebutuhan

pemangku kepentingan kiranya memerlukan pendekatan prediksi atau prakiraan untuk mengoptimalkan kebijakan pengelolaan laut. Prakiraan deret waktu untuk indeks iklim, perikanan, dan suhu permukaan laut telah diimplementasikan (e.g., Chen & Tjandra, 2014; Kim dkk., 2019; Raman dkk., 2018; Tresnawati dkk., 2024). Namun prakiraan deret waktu untuk variabilitas karbon belum pernah dilakukan.

Berdasarkan pertimbangan diatas, maka prakiraan (*forecast*) diperlukan untuk mengetahui produktivitas laut Indonesia dengan memprediksi parameter-parameter penting seperti POC, klorofil-*a*, suhu permukaan laut, dan oksigen terlarut (Triana dkk., 2023; Wahyudi dkk., 2023b; Tresnawati dkk., 2024). Pendekatan yang dapat digunakan untuk melakukan prakiraan deret waktu antara lain dengan menggunakan pemodelan dan pembelajaran mesin (*machine learning*). Pemodelan dengan pembelajaran mesin dapat berupa model linear (Chen & Chandra, 2014; Wahyudi dkk., 2023b) maupun model non linear (Tresnawati dkk., 2024).

Pendekatan model prakiraan pembelajaran mesin *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average* (SARIMA) (Wahyudi dkk., 2023b) dan *SARIMA with eXogenous Factor* (SARIMAX) (Wahyudi dkk., *under-review*) dapat digunakan untuk melakukan prakiraan. SARIMA menggabungkan komponen-komponen autoregresif/*autoregressive* (AR), diferensiasi/*differencing* (I), dan rerata bergerak/*moving average* (MA), untuk memperhitungkan efek kecenderungan variabel, tren dan ketidakteraturan jangka pendek. Pemilihan orde yang tepat untuk setiap komponen sangat penting untuk keakuratan model dalam

menangkap pola yang ada pada data deret waktu (Peixeiro, 2022). SARIMAX merupakan perluasan dari SARIMA, yang memasukkan variabel eksogen, sehingga memungkinkan model untuk menambahkan faktor eksternal yang berpengaruh pada data deret waktu, sehingga lebih fleksibel dan mampu menangkap informasi tambahan untuk meningkatkan akurasi prakiraan. SARIMA dan SARIMAX merupakan teknik pemodelan statistik yang telah lama digunakan untuk bidang ekonomi, epidemiologi dan perikanan (Kim dkk., 2019; Raman dkk., 2018). Penggunaannya pada bidang oseanografi pertama kali dilakukan oleh Wahyudi dkk., (2023b) untuk variabel POC.

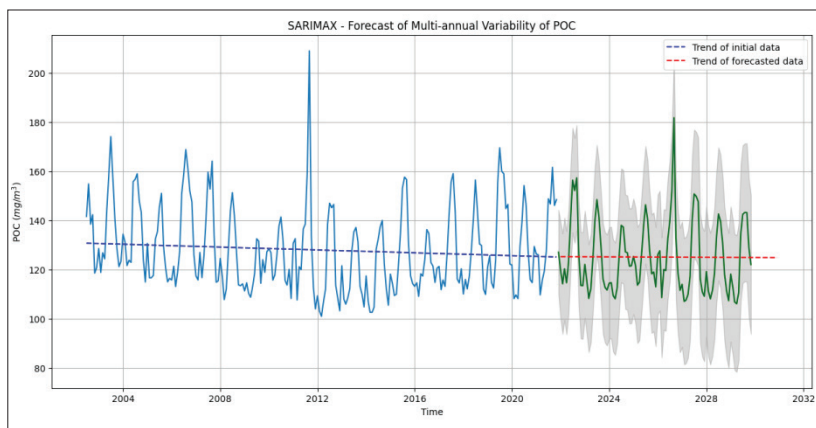
Data berseri yang digunakan Wahyudi dkk. (2023b) untuk melatih model pembelajaran mesin adalah kombinasi data *in-situ* dan data produk/ model numerik dari penginderaan jauh/ satelit. Validitas prediksi dapat digunakan untuk periode kurang dari 5 (lima) tahun ke depan dengan koefisien korelasi sebesar 0,83 dan 0,65 masing-masing untuk seri data POC bulanan dan musiman. Koefisien korelasi prakiraan seri data bulanan lebih tinggi dari ambang batas (0,75); oleh karena itu, prakiraan SARIMA yang digunakan dapat dianggap layak dan valid.

Sebelum mengimplementasikan model prakiraan deret waktu, validasi dan koreksi data produk satelit (atau data model numerik) harus dilakukan dengan menggunakan data hasil pengukuran *in-situ*, khususnya di wilayah perairan marjinal seperti di perairan Indonesia yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi. Estimasi variabel biogeokimia dan oseanografi berbasis penginderaan jauh untuk pesisir dan paparan benua lebih kompleks dibandingkan untuk laut terbuka (Brewin dkk., 2023;

Martin & Bianchi, 2023). Properti optik yang digunakan untuk penginderaan jauh pada laut terbuka hanya berdasarkan variabel klorofil dan kelimpahan fitoplankton saja. Sementara itu, properti optik pada pesisir dan paparan benua dipengaruhi oleh variabel fitoplankton, klorofil-a, *colored dissolved organic matter (CDOM)*, dan *suspended particulate matter (SPM)* (Martin & Bianchi, 2023). Selain itu, variasi spektral tangkapan satelit terhadap laut pesisir dan paparan benua akan bervariasi secara spasial dan temporal. Oleh karena alasan-alasan tersebut, pengukuran *in-situ* diperlukan untuk wilayah laut marjinal.

## B. Prakiraan deret waktu karbon organik partikulat (POC)

Berdasarkan seri data lampau/*hindcast*, rerata bulanan konsentrasi POC di laut Indonesia menunjukkan kecenderungan menurun (Gambar 8).



Ket.: Prakiraan deret waktu rerata bulanan karbon organik partikulat (POC) ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 2021-2030.  
 Sumber: Wahyudi dkk. (2023b) dimodifikasi

**Gambar 8.** Prakiraan deret waktu variabilitas multi tahunan POC di perairan laut Indonesia.

Kecenderungan menurun juga ditunjukkan oleh seri data bulanan untuk hasil prakiraan/*forecast* (Wahyudi dkk., 2023b). Penyebab kecenderungan penurunan konsentrasi POC antara lain peningkatan suhu permukaan laut, pengasaman, dekomposisi, dan kadar oksigen terlarut (Wahyudi dkk., 2023b).

Peningkatan suhu dan pengasaman laut menjadikan biomasa fitoplankton mengalami penurunan (Lim dkk., 2022), selain itu juga menyebabkan berkurangnya ukuran agregat *Transparent Exopolimer/TEP* (Cisternas-Novoa dkk., 2019). Karena fitoplankton dan TEP merupakan komponen utama POC, maka proses agregasi yang terhambat karena kondisi peningkatan suhu permukaan laut dapat menyebabkan penurunan POC (Wahyudi dkk., 2023b).

Selain itu, penurunan laju dekomposisi berpotensi mengakibatkan penurunan konsentrasi POC. Menurut Pavia dkk. (2019), pemanasan permukaan air laut dapat mengurangi penimbunan karbon di laut dan produksi POC karena penyebaran alga pada wilayah oligotrofik yang lebih luas. Kenaikan suhu permukaan laut juga dapat mempercepat laju dekomposisi POC. Proses dekomposisi POC dipengaruhi oleh tingkat oksigen terlarut (Ma dkk., 2021); karena tingkat oksigen terlarut cenderung menurun seiring dengan kenaikan suhu permukaan laut (Triana dkk., 2023), sehingga dekomposisi POC dapat meningkat akibat pemanasan laut, yang pada gilirannya mengakibatkan penurunan konsentrasi POC.

### C. Variabel eksogen terhadap validitas model prakiraan

Karena variabilitas temporal POC dipengaruhi oleh faktor fisik, kimia, dan iklim, maka tidak cukup hanya mengandalkan SARIMA untuk melakukan prakiraan. Wahyudi dkk. (2023b) menekankan bahwa jenis prakiraan yang layak dapat melibatkan penggunaan seri data bulanan dengan skenario multi-tahunan ( $s = 60$ ). Sehingga, menambahkan faktor eksogen seperti *Dipole Mode Index* (untuk IOD) atau indeks NINO3 (untuk *El Niño*) dapat meningkatkan ketangguhan prakiraan. Karena IOD dan *El Niño* memengaruhi dinamika POC di laut Indonesia (Triana dkk., 2021), maka keduanya juga akan memengaruhi prakiraan POC. Selain itu, dinamika POC dipengaruhi oleh suhu permukaan laut, masukan dari daratan, produksi primer, klorofil-*a*, dan perubahan salinitas (Lim dkk., 2022; Triana dkk., 2021; Wahyudi dkk., 2023b). Parameter-parameter tersebut dapat dipakai sebagai faktor eksogen saat pengembangan model prakiraan deret waktu.

Puncak POC yang tinggi di perairan laut Indonesia sangat mungkin terjadi pada tahun 2024, 2027 dan 2029 (Gambar 8; Wahyudi dkk., 2023b). Prakiraan lima hingga enam tahun dianggap valid, seperti yang juga disarankan oleh Wahyudi dkk. (2023b) dan Séférian dkk. (2018); hal ini sangat mungkin jika prakiraan deret waktu POC melibatkan faktor eksogen.

### D. Prakiraan dan pemantauan karbon laut

Kebutuhan akan prakiraan (*forecast*) semakin meningkat karena meningkatnya kebutuhan untuk mengetahui produktivitas dan

keamanan laut (Chen & Tjandra, 2014; Kim dkk., 2019; Raman dkk., 2018). Telah diketahui bahwa prakiraan laut diperlukan untuk deteksi dini pengayaan bahan organik yang akan mendorong marak alga berbahaya (Davidson dkk., 2016; Izadi dkk., 2021). Penelitian sebelumnya juga menyoroti perlunya memperkirakan konsentrasi klorofil-*a* di laut untuk prediksi distribusi ikan (Cai dkk., 2022). Prediksi dan prakiraan berbasis model juga telah mengungkapkan kondisi keasaman laut dan kejenuhan aragonit di masa depan (Afdal dkk., 2024). Selain itu, prakiraan perubahan iklim telah dibuat dengan menggunakan prediksi berdasarkan data lampau/*hindcast* (Diffenbaugh & Barner, 2023). Dengan mempertimbangkan konteks kebutuhan ini, maka prakiraan karbon laut (misalnya POC) juga diperlukan untuk memajukan pengetahuan kita tentang dinamika karbon di lautan sekaligus menjawab kebutuhan untuk mengetahui produktivitas dan keamanan laut, serta untuk mendukung pembangunan ekonomi biru.

Pengayaan karbon organik dan nutrien dapat memicu pengayaan perairan yang dapat diikuti dengan eutrofikasi, marak alga atau ubur-ubur, dan deoksigenasi (Wahyudi dkk., 2023a). Sehingga, melakukan prakiraan deret waktu untuk variabel karbon organik (semisal POC) dan nutrien sangat penting untuk dapat memitigasi respon biologis terhadap perubahan fisik dan kimiawi perairan laut. Meskipun kebutuhan tersebut ada di depan mata, namun model prakiraan deret waktu karbon perlu ditingkatkan.

Penelitian di masa depan untuk mendapatkan prakiraan variabilitas spasial POC akan menjadi tantangan tersendiri,



tetapi juga menjanjikan karena hasilnya akan bermanfaat bagi studi pesisir dan laut marjinal. Konsentrasi POC di laut marjinal dan daerah dekat pesisir sangat dipengaruhi oleh dinamika masukan dari material daratan (Wahyudi & Afdal, 2019; Triana dkk., 2021). Selain itu, penelitian sebelumnya telah menyoroti bahwa data lampau POC yang diperoleh dari model numerik atau satelit harus divalidasi secara lokal (Lee dkk, 2020; Brewin dkk., 2023). Untuk alasan ini, konsentrasi POC akan menjadi spesifik untuk setiap lokasi, sehingga prakiraan variabilitas spasial akan diperlukan.

Penerapan SARIMAX untuk prakiraan variabilitas spasial sangat potensial dan dapat dilakukan melalui penerapan model pembelajaran mesin untuk setiap titik yang mewakili area spasial lokasi penelitian (Chen & Tjandra, 2014). Kedepan, kita diharapkan dapat memprediksi potensi variabilitas spasial karbon laut pada lima atau enam tahun yang akan datang. Model linear semacam SARIMAX dan analisis *big data* akan dibutuhkan jika kita ingin menghasilkan prakiraan variabilitas spasial yang valid. Lebih lanjut, dengan perkembangan pembelajaran mesin dengan berbagai model non-linear (*e.g.*, Tresnawati dkk., 2024) juga diharapkan dapat menghasilkan prakiraan yang lebih baik lagi.

## VI. RELEVANSI RISET SIKLUS BIOGEOKIMIA KARBON LAUT TERHADAP PEMBANGUNAN EKONOMI BIRU

Ekonomi Biru (*blue economy*) adalah konsep yang mencakup berbagai aspek ekonomi yang berhubungan dengan laut dan sumber daya alam yang terkait (World Bank, 2024). Istilah “biru” dalam konteks ini mengacu pada laut yang identik dengan warna biru. Konsep ini bertujuan untuk mempromosikan pemanfaatan sumber daya laut secara berkelanjutan, termasuk pengelolaan ekosistem laut, pengembangan ekonomi kelautan, budidaya laut, pariwisata bahari, transportasi, energi terbarukan, penelitian dan inovasi, serta pelestarian lingkungan (Wahyudi, 2021). Ekonomi biru mempertimbangkan pentingnya kesejahteraan manusia dan perlindungan lingkungan laut secara seimbang. Ekonomi Biru merupakan “pendekatan yang terintegrasi, holistik, lintas sektor, dan lintas pemangku kepentingan yang menciptakan nilai tambah dan rantai nilai sumber daya laut dan perairan tawar secara inklusif dan berkelanjutan” (ASEAN Blue Economy Framework, 2023).

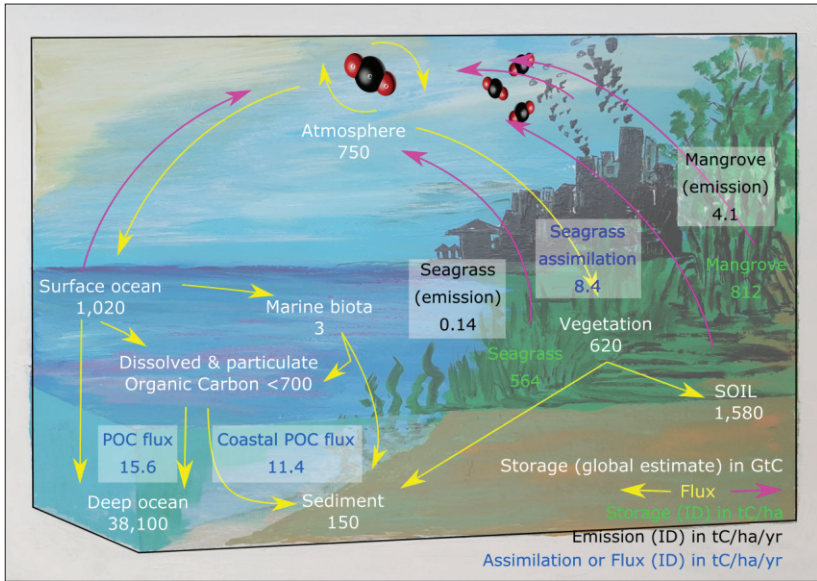
Peran riset siklus biogeokimia terhadap pembangunan ekonomi biru menyoroti pentingnya pemahaman terhadap interaksi kompleks antara proses biologis, geologis, dan kimia dalam ekosistem laut untuk mendorong perkembangan ekonomi yang berkelanjutan di sektor kelautan. Pemahaman terhadap siklus biogeokimia karbon dapat membantu kita mengidentifikasi

dampak antropogenik dan perubahan iklim terhadap lingkungan laut serta sumber daya alam yang digunakan untuk kegiatan ekonomi biru, seperti perikanan dan pariwisata bahari. Kita dapat mengembangkan strategi pengelolaan yang berkelanjutan dan berbasis bukti untuk memastikan bahwa pembangunan ekonomi biru tidak hanya memberikan manfaat jangka pendek, tetapi juga menjaga keseimbangan ekosistem laut yang penting bagi keberlangsungan hidup manusia dan lingkungan secara keseluruhan.

#### **A. Peran riset karbon biru (*blue carbon*)**

Salah satu reservoir karbon laut Indonesia yang perlu mendapatkan perhatian adalah ekosistem karbon biru padang lamun di wilayah pesisir. Luas ekosistem padang lamun di Indonesia adalah 875.967 ha (Wahyudi dkk., 2020). Mengacu pada potensi luas padang lamun ini, maka asimilasi karbon padang lamun mencapai 8,40 Mg C/ha/tahun. Total cadangan karbon pada biomassa padang lamun Indonesia tercatat mencapai 5,99 Mg C/ha. Sementara itu, emisi dari perubahan lahan padang lamun diperkirakan antara 0,05 sampai 2,42 Mg CO<sub>2</sub>/ha/tahun dengan rata-rata cakupan nasional sebesar 0,46 Mg CO<sub>2</sub>/ha/tahun atau setara 0.14 Mg C/ha/yr (Gambar 9).

Kegiatan konservasi padang lamun memiliki peran kunci dalam menurunkan emisi karbon, dengan potensi kontribusi hingga 11,3%. Kegiatan konservasi padang lamun sangat potensial untuk digunakan sebagai kredit karbon. Kredit karbon adalah instrumen keuangan yang diterbitkan atau dibeli oleh



Sumber: ilustrasi oleh A. J. Wahyudi (<https://www.artmajeur.com/ajw0/en/artworks/17737012/illustration-carbon-cycle>); data oleh berbagai sumber dalam naskah orasi ini

Ket.: Gt C: gigaton karbon; tC/ha: ton karbon per hektar; tC/ha/yr: ton karbon per hektar per tahun. 1 ton karbon (tC) = 1 megagram karbon (Mg C) = 3.667 ton karbondioksida ekuivalen (tCO<sub>2</sub>e). ID: data laut Indonesia; POC: *particulate organic carbon* (karbon organik partikulat). Simpanan karbon (*storage*) mangrove dan lamun masing-masing terdiri atas simpanan total biomass dan sedimen.

**Gambar 9.** Kontribusi siklus karbon di laut Indonesia terhadap siklus karbon global.

organisasi atau individu untuk mengimbangi atau mengurangi emisi gas rumah kaca. Konsepnya didasarkan pada upaya untuk mengurangi jumlah emisi gas rumah kaca secara keseluruhan dengan cara mempromosikan atau mendukung kegiatan-kegiatan yang menghasilkan atau menyimpan karbon dioksida atau gas rumah kaca lainnya misalnya konservasi padang lamun (Friess dkk., 2022).

Konservasi ekosistem padang lamun menjadi strategi efektif untuk mendukung pembangunan ekonomi biru, menciptakan nilai tambah melalui peningkatan kualitas ekosistem padang lamun yang mendukung sektor pariwisata berbasis laut, pengembangan akuakultur berkelanjutan, dan sumber daya perikanan (Choudary dkk., 2021).

Potensi penurunan emisi karbon dari aktivitas konservasi ini belum termasuk reservoir karbon laut yang lain seperti ekosistem mangrove, terumbu karang, dan ekosistem pelagik. Karbon juga dapat mengalami proses asimilasi, sekuestrasi, dan emisi di berbagai reservoir tersebut. Proses transfer karbon juga selalu terjadi di dalam setiap reservoir maupun antar reservoir. Potensi transfer karbon yang melibatkan karbon organik partikulat tercatat cukup signifikan (Triana dkk 2021; Wahyudi & Afdal, 2019; Wahyudi dkk., 2021b).

## **B. Peran prakiraan (*forecast*) variabilitas karbon laut**

Prakiraan variabilitas karbon laut memiliki peran penting dalam pembangunan ekonomi biru karena karbon laut memainkan peran kunci dalam mengatur iklim global dan menyediakan layanan ekosistem yang vital (Wahyudi dkk, 2022b; 2023b). Dengan memahami variasi karbon laut, termasuk penyerapan dan pelepasannya ke atmosfer, kita dapat mengembangkan strategi adaptasi dan mitigasi yang lebih efektif terhadap perubahan iklim

Prakiraan karbon laut, terutama konsentrasi karbon organik partikulat (POC), berpotensi memberikan kontribusi positif

pada pembangunan ekonomi biru melalui beberapa mekanisme. Pertama, sebagai salah satu proksi pemantauan produktivitas laut, informasi dari prakiraan variabilitas POC ini dapat memfasilitasi pemantauan dan pengelolaan yang lebih efisien terhadap sumber daya laut. Hal ini dapat memberikan wawasan yang diperlukan oleh pemangku kepentingan di sektor ekonomi biru untuk mengambil langkah-langkah yang sesuai dengan kondisi ekosistem laut yang berubah. Kedua, prakiraan tersebut dapat membantu memberikan prakiraan kejadian ekstrim seperti marak alga, eutrofikasi atau deoksigenasi, memungkinkan adopsi tindakan preventif atau mitigasi. Prakiraan terhadap kejadian ekstrim akan bermanfaat untuk sektor wisata bahari, produktivitas dan kesehatan laut (Chen & Tjandra, 2014; Kim dkk., 2019; Raman dkk., 2018; Wahyudi dkk., 2023b). Ketiga, informasi prakiraan yang diperoleh dapat menjadi dasar untuk riset dan inovasi, mendorong pengembangan teknologi baru dan praktik pengelolaan laut yang berkelanjutan, dimana semuanya mendukung pembangunan ekonomi biru Indonesia. Terakhir, prakiraan karbon laut dapat membantu pemantauan keberlanjutan lingkungan, memastikan bahwa pertumbuhan ekonomi biru tidak hanya menguntungkan secara ekonomi tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan lingkungan laut jangka panjang.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## VII. KESIMPULAN

Siklus biogeokimia karbon laut perlu dipelajari secara komprehensif melalui observasi *in-situ*, model, dan data satelit untuk memahami dinamika karbon dan mengelola ekosistem laut. Kajian ini meliputi estimasi cadangan karbon ekosistem karbon biru di Indonesia, emisi ekosistem padang lamun, variabilitas karbon organik partikulat (POC) di laut, dan prakiraan konsentrasi karbon organik di masa depan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa asimilasi karbon padang lamun di Indonesia mencapai 8,40 Mg C/ha/tahun dengan total cadangan karbon pada biomassa mencapai 5,99 Mg C/ha. Emisi dari perubahan lahan padang lamun nasional diperkirakan sekitar 0,46 Mg CO<sub>2</sub>/ha/tahun. Proses pompa biologis karbon memindahkan sekitar 9,99 Tg C/tahun dari kolom air ke sedimen pesisir Indonesia.

Riset biogeokimia laut penting untuk mendukung mitigasi perubahan iklim dengan strategi berbasis alam, serta memantau kesehatan dan produktivitas laut melalui prakiraan deret waktu variabilitas biogeokimia. Variabilitas iklim seperti *El Niño* dan *Indian Ocean Dipole (IOD)* memengaruhi pengayaan karbon laut, dengan puncak konsentrasi karbon organik partikulat (POC) terjadi selama musim monsun tenggara. Prakiraan variabilitas biogeokimia di masa depan membantu mitigasi risiko ekstrim seperti marak alga berbahaya dan hipoksia, serta meningkatkan pemanfaatan potensi ekonomi biru laut Indonesia.



Riset biogeokimia laut dapat mendorong kolaborasi dalam pemahaman siklus biogeokimia karbon, yang krusial untuk kesehatan ekosistem laut. Riset ini bermanfaat untuk keberlanjutan ekonomi biru Indonesia.

## VIII. PENUTUP

Ketidakpastian iklim global dan perubahan variabel laut yang cepat menuntut pendekatan holistik dan terpadu dalam memahami serta mengelola dinamika karbon di sistem laut. Tantangan utama adalah meningkatkan resolusi dan cakupan data observasi *in-situ* mengingat kompleksitas siklus biogeokimia karbon. Proses akuisisi data laut menghadapi kendala terbatasnya peralatan analisis laboratorium dan teknologi akuisisi data lapangan. Integrasi data dari berbagai sumber, termasuk model dan produk satelit, perlu diperkuat untuk meningkatkan akurasi dan pemahaman terhadap variabilitas karbon laut.

Tantangan mitigasi dan adaptasi perubahan iklim membutuhkan keterlibatan aktif dari berbagai pemangku kepentingan, seperti pemerintah, lembaga riset, dan masyarakat. Peningkatan kebijakan perlindungan ekosistem karbon biru, seperti padang lamun, serta langkah-langkah adaptasi terarah, menjadi kunci menjaga keseimbangan siklus biogeokimia karbon. Kesadaran akan hubungan erat antara siklus biogeokimia karbon dan kesehatan ekosistem laut dapat memotivasi tindakan kolektif dari pengambil kebijakan hingga masyarakat. Kolaborasi antara ilmuwan, pemerintah, dan masyarakat penting untuk menghadapi tantangan mendatang dan menjaga keberlanjutan ekosistem laut Indonesia.

Riset biogeokimia karbon laut membuka pemahaman mendalam tentang peran laut Indonesia dalam dinamika karbon

global. Tantangan dan peluang masa depan menuntut kerjasama erat dan tindakan kolektif untuk menjaga kelangsungan hidup ekosistem laut Indonesia yang berharga.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terima Kasih yang tak terhingga saya ucapkan kepada Allah SWT, Tuhan semesta alam, dan Rosulullah Muhammad SAW atas bimbingannya dalam Islam. Berkenaan dengan orasi ilmiah ini, saya mengucapkan terima kasih kepada Presiden Republik Indonesia, Ir. H. Joko Widodo; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Prof. Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc; Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian M.Sc, DESD, ASEAN Eng.; Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D.; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah: Prof. Dr. Zainal Arifin, M.Sc., Prof. Dr. Augy Syahailatua, M.Sc., Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc.; Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, M.A.; Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia, Ratih Retno Wulandari, M.Si; Kepala Organisasi Riset Kebumian dan Maritim, Prof. Dr. Ocky Karna Radjasa, M.Sc; Kepala Pusat Riset Oseanografi, Udhi Eko Hernawan, Ph.D.; Panitia Pelaksana Pengukuhan; dan pihak-pihak lain yang berkenaan.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada keluarga: Ibu dan Bapak (Ninik Cahyawati, Kusnadi, Wenarni Dantefa, Ujang Bakdi), istri dan anak-anak (Febty Febriani, Fatah R. Wahyuriansyah, Fawwaz R. Wahyuriansyah); serta keluarga besar Kusnadi dan Ujang Bakdi. Terima kasih atas dukungan

yang besar dan tak ternilai serta pendampingan dalam menjalani profesi sebagai peneliti.

Ucapan terima kasih berikutnya saya sampaikan kepada, para guru dan senior: Prof. Dr. Dwi Listyo Rahayu, Prof. Dr. Suharsono, Prof. Pramudji, Prof. Dr. Augy Syahailatua, Prof. Dr. Zainal Arifin, Dr. Dirhamsyah, Prof. Dr. Takeo Hama, Prof. Dr. Masakazu Aoki, Prof. Dr. Shigeki Wada, Dr. Tri Ardyati, Prof. Dr. Tri Agus Siswoyo, Dr. Nurul Dhewani Mirah Sjafrie, Ibu Rianta Pratiwi, Ibu Ricky Rositasari, Bapak Muswerry Mochtar, Bapak Indra Aswandi, Prof. Dr. Yukio Masumoto, Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, Prof. Dr. Nurul Taufiqurrahman, Prof. Dr. Ocky Karna Radjasa, Prof. Dr. Agus Haryono, dan guru-guru saya yang sangat berjasa dan telah memberikan inspirasi dan bimbingan yang tak ternilai.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada para kolega: Dr. Udhi Eko Hernawan, Dr. Patrick Martin, Afdal, Rachma Puspitasari, Lestari, Hanif Budi Prayitno, Harmesa, Edwards Taufiqurrahman, Karlina Triana, Camellia Kusuma Tito, Dr. Faisal Hamzah, Dr. Idha Yulia Ikhsani, Ita Wulandari, Suratno, Woo Oon Yee, Heng Su Ping, Zhang Meilun, Dr. Bernhard Mayer, Dr. Yuhi Satoh, Dr. Hiroshi Ogawa, Lisa Fajar Indriana, Sofia Yuniar Sani, Suci Lastrini, Muh. Taufik Kaisupy, Siti Sulha, Deny Sutisna, Deni Sutansyah, Ngadimo, Siti Kholiyah, Octi Selviyana, Madisaeni, Dr. Anna Fadliah Rusydi, Dr. Haznan Abimanyu, Dr. Agus Fanar Syukri, Prof. Dr. Muh. Reza Cordova, Dr. Intan Suci Nurhati, Prof. Dr. Adi Purwandana, Nurfitriah Ramadhani, Risnawati Fauziah, Emi Hidayati, serta

kolega lainnya yang tidak dapat saya sebutkan satu-persatu. Hal yang sama juga ingin saya sampaikan kepada kolega SDN Kalirejo 01 (1989-1995), SMPN 1 Ngraho (1995-1998), SMUN 2 Bojonegoro (1998-2001), BioUB angkatan 2001, Forkalam UB, dan anggota *Aoki - Hama Laboratory* di *University of Tsukuba* (2010-2013).

Terima kasih saya ucapkan kepada semua pihak yang telah memberikan berbagai inspirasi dalam menjalani aktivitas dan mendalami hobi, sehingga saya bisa menghasilkan berbagai karya tulis ilmiah (<https://scholar.google.com/citations?user=P3Ze8vwAAAAJ&hl=en>) dan karya seni lukis (<https://www.artmajeur.com/ajw0>). Lebih dari 70 lukisan telah saya hasilkan selama tiga tahun terakhir sebagai bentuk dimana *'art and science collide.'*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afdal, A., Prayitno, H. B., **Wahyudi, A. J.**, & Lastrini, S. (2020). *Variasi Fluks CO<sub>2</sub> Udara-Laut di Perairan Pesisir Pulau Bintan. OLDI (Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia)*, 5(3), 145–160. <https://doi.org/10.14203/OLDI.2020.V5I3.266>
- Afdal, Bengen, D. G., **Wahyudi, A. J.**, Rastina, Prayitno, H. B., & Koropitan, A. F. (2023). *Variation of CO<sub>2</sub> fluxes, net ecosystem production, and calcification in tropical waters of seagrass and coral reef. Regional Studies in Marine Science*, 68, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103290>
- Afdal, Bengen, D. G., **Wahyudi, A. J.**, Rastina, Prayitno, H. B., Hamzah, F., & Koropitan, A. F. (2024). *Spatial variability of aragonite saturation state (Ω<sub>arag</sub>) in Indonesian coastal waters. Marine Environmental Research*, 195, 106377. <https://doi.org/10.1016/J.MARENRES.2024.106377>
- Alongi, D. M., Murdiyarso, D., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Hutahaean, A., Crooks, S., Lovelock, C. E., Howard, J., Herr, D., Fortes, M., Pidgeon, E., & Wagey, T. (2016). *Indonesia's blue carbon: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon. Wetlands Ecology and Management*, 24(1), 3–13. <https://doi.org/10.1007/S11273-015-9446-Y/FIGURES/4>
- Angrelina, I., Sartimbul, A., & **Wahyudi, A. J.** (2019). The potential of seagrass beds on the coast of Putri Menjangan as a carbon sequestration ecosystem on Bali Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 241(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/241/1/012010>
- ASEAN (2023). *ASEAN Blue Carbon Framework*. <https://asean.org/asean-blue-economy-framework/> Diakses 4 April 2024



- Atwood, T. B., Connolly, R. M., Almahasheer, H., Carnell, P. E., Duarte, C. M., Lewis, C. J. E., Irigoien, X., Kelleway, J. J., Lavery, P. S., Macreadie, P. I., Serrano, O., Sanders, C. J., Santos, I., Steven, A. D. L., & Lovelock, C. E. (2017). Global patterns in mangrove soil carbon stocks and losses. *Nature Climate Change* 2017 7:7, 7(7), 523–528. <https://doi.org/10.1038/nclimate3326>
- Bank Dunia (2024). *What is the Blue Conomy?* <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2017/06/06/blue-economy>. Diakses 21 April 2024
- Battin, T. J., Luysaert, S., Kaplan, L. A., Aufdenkampe, A. K., Richter, A., & Tranvik, L. J. (2009). The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience* 2009 2:9, 2(9), 598–600. <https://doi.org/10.1038/ngeo618>
- Baumgart, A., Jennerjahn, T., Mohtadi, M., & Hebbeln, D. (2010). Distribution and burial of organic carbon in sediments from the Indian Ocean upwelling region off Java and Sumatra, Indonesia. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(3), 458–467. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.12.002>
- Birner, B., Rödenbeck, C., Dohner, J. L., Schwartzman, A., & Keeling, R. F. (2023). Surprising stability of recent global carbon cycling enables improved fossil fuel emission verification. *Nature Climate Change* 2023 13:9, 13(9), 961–966. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01761-x>
- Brewin, R. J. W., Sathyendranath, S., Kulk, G., Rio, M. H., Concha, J. A., Bell, T. G., Bracher, A., Fichot, C., Frölicher, T. L., Galí, M., Hansell, D. A., Kostadinov, T. S., Mitchell, C., Neeley, A. R., Organelli, E., Richardson, K., Rousseaux, C., Shen, F., Stramski, D., ... Woolf, D. K. (2023). Ocean carbon from space: Current status and priorities for the next decade. *Earth-Science Reviews*, 240, 104386. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2023.104386>

- Cai, L., Tang, R., Yan, X., Zhou, Y., Jiang, J., & Yu, M. (2022). The spatial-temporal consistency of chlorophyll-a and fishery resources in the water of the Zhoushan archipelago revealed by high resolution remote sensing. *Frontiers in Marine Science*, 9, 2053. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2022.1022375/BIBTEX>
- Chen, Y., & Tjandra, S. (2014). Daily Collision Prediction with SARI-MAX and Generalized Linear Models on the Basis of Temporal and Weather Variables. *Transportation Research Record* 2432, 26–36. <https://doi.org/10.3141/2432-04>
- Choudhary, P., G, V. S., Khade, M., Savant, S., Musale, A., G, R. K. K., Chelliah, M. S., & Dasgupta, S. (2021). Empowering blue economy: From underrated ecosystem to sustainable industry. *Journal of Environmental Management*, 291, 112697. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112697>
- Cisternas-Novoa, C., Lee, C., Tang, T., de Jesus, R., & Engel, A. (2019). Effects of higher CO<sub>2</sub> and temperature on exopolymer particle content and physical properties of marine aggregates. *Frontiers in Marine Science*, 5(JAN). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00500>
- Close, H. G., & Henderson, L. C. (2020). Open-Ocean Minima in  $\delta^{13}\text{C}$  Values of Particulate Organic Carbon in the Lower Euphotic Zone. *Frontiers in Marine Science*, 7, 739. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2020.540165/BIBTEX>
- Dai, M., Su, J., Zhao, Y., Hofmann, E. E., Cao, Z., Cai, W. J., Gan, J., Lacroix, F., Laruelle, G. G., Meng, F., Mu die Iler, J. D., Regnier, P. A. G., Wang, G., & Wang, Z. (2022). Carbon Fluxes in the Coastal Ocean: Synthesis, Boundary Processes, and Future Trends, 50, 593–626. <https://doi.org/10.1146/AN-NUREV-EARTH-032320-090746>
- Davidson, K., Anderson, D. M., Mateus, M., Reguera, B., Silke, J., Sourisseau, M., & Maguire, J. (2016). Forecasting the Risk of Harmful Aalgal Blooms: Preface to the Asimuth Special Issue. *Harmful Algae*, 53, 1. <https://doi.org/10.1016/J.HAL.2015.11.005>

- Diffenbaugh, N. S., & Barnes, E. A. (2023). Data-driven predictions of the time remaining until critical global warming thresholds are reached. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(6), e2207183120. [https://doi.org/10.1073/PNAS.2207183120/SUPPL\\_FILE/PNAS.2207183120.SAPP.PDF](https://doi.org/10.1073/PNAS.2207183120/SUPPL_FILE/PNAS.2207183120.SAPP.PDF)
- Engel, A. (2002). Direct relationship between CO<sub>2</sub> uptake and transparent exopolymer particles production in natural phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24(1), 49–53. <https://doi.org/10.1093/PLANKT/24.1.49>
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Hogberg, P., Linder, S., Mackenzie, F. T., Moore, B., Pedersen, T., Rosental, Y., Seitzinger, S., Smetacek, V., & Steffen, W. (2000). The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science*, 290(5490), 291–296. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.290.5490.291>
- Fan, H., Wang, X., Zhang, H., & Yu, Z. (2018). Spatial and temporal variations of particulate organic carbon in the Yellow-Bohai Sea over 2002-2016. *In Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26373-w>
- Friess, D. A., Howard, J., Huxham, M., Macreadie, P. I., & Ross, F. (2022). Capitalizing on the global financial interest in blue carbon. *PLOS Climate*, 1(8), e0000061. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PCLM.0000061>
- Gu, X., Zhao, H., Peng, C., Guo, X., Lin, Q., Yang, Q., & Chen, L. (2022). The mangrove blue carbon sink potential: Evidence from three net primary production assessment methods. *Forest Ecology and Management*, 504, 119848. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.119848>
- Gunawan, J. V., Parengkuan, M., **Wahyudi, A. J.**, & Zulpikar, F. (2019). Estimasi Stok Karbon pada Biomassa Lamun di Pulau Semak Daun, Kepulauan Seribu. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 4(2), 89. <https://doi.org/10.14203/oldi.2019.v4i2.229>

- Howard, J. L., Creed, J. C., Aguiar, M. V. P., & Fouquerean, J. W. (2018). CO<sub>2</sub> released by carbonate sediment production in some coastal areas may offset the benefits of seagrass “Blue Carbon” storage. *Limnology and Oceanography*, 63(1), 160–172. <https://doi.org/10.1002/LNO.10621>
- Indriana, L. F., **Wahyudi, A. J.**, & Kunzmann, A. (2018). Assimilation Dynamics of Different Diet Sources by the Sea Cucumber *Holothuria scabra*, with Evidence from Stable Isotope Signature. *Annual Research & Review in Biology*, 28(2), 1–10. <https://doi.org/10.9734/arrb/2018/42591>
- Indriani, ., **Wahyudi, A. J.**, & Yona, D. (2017). Cadangan Karbon di Area Padang Lamun Pesisir Pulau Bintan, Kepulauan Riau. *OLDI (Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia)*, 2(3), 1–11. <https://doi.org/10.14203/OLDI.2017.V2I3.99>
- Izadi, M., Sultan, M., Kadiri, R. El, Ghannadi, A., & Abdelmohsen, K. (2021). A Remote Sensing and Machine Learning-Based Approach to Forecast the Onset of Harmful Algal Bloom. *Remote Sensing* 13(19), 3863. <https://doi.org/10.3390/RS13193863>
- Kim, T., Shin, J. Y., Kim, H., Kim, S., & Heo, J. H. (2019). The Use of Large-Scale Climate Indices in Monthly Reservoir Inflow Forecasting and Its Application on Time Series and Artificial Intelligence Models. *Water* 2019, Vol. 11, Page 374, 11(2), 374. <https://doi.org/10.3390/W11020374>
- Lee, D., Son, S. H., Joo, H. T., Kim, K., Kim, M. J., Jang, H. K., Yun, M. S., Kang, C. K., & Lee, S. H. (2020). Estimation of the Particulate Organic Carbon to Chlorophyll-a Ratio Using MODIS-Aqua in the East/Japan Sea, South Korea. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 840, 12(5), 840. <https://doi.org/10.3390/RS12050840>
- Lestari, L., Harmesa, H., Taufiqurrahman, E., Budiyanto, F., & **Wahyudi, A. J.** (2021). Assessment of potential variability of cadmium and copper trace metals using hindcast estimates. *Environmental monitoring and assessment*, 193(11), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S10661-021-09501-4>

- Lim, H.-G., Dunne, J. P., Stock, C. A., & Kwon, M. (2022). Attribution and predictability of climate-driven variability in global ocean color. *Journal of geophysical research: oceans*, 127(10), e2022JC019121. <https://doi.org/10.1029/2022JC019121>
- Ma, J., Song, J., Li, X., Wang, Q., Zhong, G., Yuan, H., Li, N., & Duan, L. (2021). The OMZ and Its Influence on POC in the Tropical Western Pacific Ocean: Based on the Survey in March 2018. *Frontiers in earth science*, 9, 492. <https://doi.org/10.3389/FEART.2021.632229/BIBTEX>
- Martin, P., & Bianchi, T. S. (2023). Organic carbon cycling and transformation. reference module in earth systems and environmental sciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00061-5>
- Murdiyarso, D., Krisnawati, H., Adinugroho, W. C., & Sasmito, S. D. (2023). Deriving emission factors for mangrove blue carbon ecosystem in Indonesia. *Carbon balance and management*, 18(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S13021-023-00233-1/FIGURES/4>
- Nowicki, M., DeVries, T., & Siegel, D. A. (2022). Quantifying the carbon export and sequestration pathways of the ocean's biological carbon pump. *Global biogeochemical cycles*, 36(3), e2021GB007083. <https://doi.org/10.1029/2021GB007083>
- Nuraya, T., Koropitan, A. F., & **Wahyudi, A. J.** (2019). Sediment Carbon Stock of West Kalimantan Mangrove Forests. *Marine research in Indonesia*, 44(1), 27–35. <https://doi.org/10.14203/mri.v44i1.545>
- Pavia, F. J., Anderson, R. F., Lam, P. J., Cael, B. B., Vivancos, S. M., Fleisher, M. Q., Lu, Y., Zhang, P., Cheng, H., & Lawrence Edwards, R. (2019). Shallow particulate organic carbon regeneration in the South Pacific Ocean. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 116(20), 9753–9758. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1901863116/-/DC-SUPPLEMENTAL>

Peixeiro, M. (2022). Time series forecasting in python. *Manning*, 1–456.

<https://www.manning.com/books/time-series-forecasting-in-python-book>

Raman, R. K., Mohanty, S. K., Bhatta, K. S., Karna, S. K., Sahoo, A. K., Mohanty, B. P., & Das, B. K. (2018). Time series forecasting model for fisheries in Chilika lagoon (a Ramsar site, 1981), Odisha, India: a case study. *Wetlands ecology and management*, 26(4), 677–687. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11273-018-9600-4>

Siegel, D. A., Devries, T., Cetinić, I., & Bisson, K. M. (2023). Quantifying the Ocean’s Biological Pump and Its Carbon Cycle Impacts on Global Scales. *Annual review of marine science*, 15, 329–356. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-MARINE-040722-115226>

Sprintall, J., Gordon, A. L., Wijffels, S. E., Feng, M., Hu, S., Koch-Larrouy, A., Phillips, H., Nugroho, D., Napitu, A., Pujiana, K., Dwi Susanto, R., Sloyan, B., Yuan, D., Riama, N. F., Siswanto, S., Kuswardani, A., Arifin, Z., **Wahyudi, A. J. A. J.**, Zhou, H., ... Setiawan, A. (2019). Detecting change in the Indonesian seas. *Frontiers in marine science*, 6(JUN), 257. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00257>

Taufiqurrahman, E., **Wahyudi, A. J.**, & Masumoto, Y. (2020). The Indonesian throughflow and its impact on biogeochemistry in the Indonesian seas. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 37(1), 29–35. <https://doi.org/10.29037/ajstd.596>

Tresnawati, R., Wirasatriya, A., Wibowo, A., Susanto, R. D., Widaratih, R., Setiawan, J. D., Maro, J. F., Dollu, E. A., Fitria, S., & Kurang, R. Y. (2024). Long term of sea surface temperature prediction for Indonesia seas using multi time-series satellite data for upwelling dynamics projection. *Remote sensing applications: society and environment*, 33, 101117. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2023.101117>

- Triana, K., **Wahyudi, A. J.**, Murakami-Sugihara, N., & Ogawa, H. (2021). Spatial and temporal variations in particulate organic carbon in Indonesian waters over two decades. *Marine and freshwater research*, 72(12), 1782–1797. <https://doi.org/10.1071/MF20264>
- Triana, K., **Wahyudi, A. J.**, Surinati, D., & Kartikoputro, E. (2023). Investigating ocean deoxygenation and the oxygen minimum zone in the Central Indo Pacific region based on the *hindcast* datasets. *Environmental monitoring and assessment*, 195(1), 28. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10615-6>
- Wahyudi, A. J.** (2014). Trends and future projections for marine biogeochemistry research in Indonesia (Tren dan proyeksi penelitian biogeokimia laut di Indonesia). In *ILMU KELAUTAN: Indonesian journal of marine sciences (Vol. 19, Issue 3, pp. 121–130)*. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijms/article/view/8514>
- Wahyudi, A. J.** (2021). Menakar korelasi perubahan iklim dan lingkungan terhadap ekonomi biru. <https://www.kompas.com/sains/read/2021/09/15/160500823/menakar-korelasi-perubahan-iklim-dan-lingkungan-terhadap-ekonomi-biru?page=all>. Diakses 5 April 2024
- Wahyudi, A. J.** (2024). Potential of organic carbon pool in the ocean: approaches for naturally and artificially capturing and retaining carbon. *IOP conference series: earth and environmental science*, 1350(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1350/1/012021>
- Wahyudi, A. J.**, Afdal, Abimanyu, H., Suratno, Syukri, A. F., Yuliana, C. I., Surinati, D., Meirinawati, H., Irawan, A., & Dharmawan, I. W. E. (2017). Menyerap karbon: layanan ekosistem pesisir untuk mitigasi perubahan iklim. Gadjah Mada University Press.
- Wahyudi, A. J.**, & Afdal. (2018). Climate change mitigation: From carbon cycle to policy. *AIP conference proceedings*, 2019(1), 040019. <https://doi.org/10.1063/1.5061889>

- Wahyudi, A. J., & Afdal.** (2019). The origin of the suspended particulate matter in the seagrass meadow of tropical waters, an evidence of the stable isotope signatures. *Acta oceanologica sinica*, 38(1), 136–143. <https://doi.org/10.1007/s13131-019-1380-z>
- Wahyudi, A. J., & Febriani, F.** (2021). Country-specific emission factor for developing a tier 3 system of Indonesia's seagrass carbon inventory. *IOP conference series: earth and environmental science*, 944(1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012058>
- Wahyudi, A. J., Afdal, A., & Meirinawati, H.** (2019a). Stable carbon isotope signature of particulate organic matter in the southwestern Sumatran waters of the Eastern Indian ocean. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 36(2), 35–43. <https://doi.org/10.29037/ajstd.555>
- Wahyudi, A. J., Afdal, A., Adi, N. S.** (2018a) Summary for policy maker: The potentials of carbon stock and sequestration of Indonesia's mangrove and seagrass ecosystem. *Indonesian institute of sciences*. <http://oceanografi.lipi.go.id/hasilpenelitian/lihatpdf/37> Accessed 20 Sep 2018
- Wahyudi, A. J., Afdal, Prayudha, B., Dharmawan, I. W. E. E., Irawan, A., Abimanyu, H., Meirinawati, H., Surinati, D., Syukri, A. F., Yuliana, C. I., & Yuniati, P. I.** (2018b). Carbon sequestration index as a determinant for climate change mitigation: Case study of Bintan Island. *IOP Conference series: earth and environmental science*, 118(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012050>
- Wahyudi, A. J., Febriani, F., & Triana, K.** (2023b). Multi-temporal variability forecast of particulate organic carbon in the Indonesian seas. *Environmental monitoring and assessment*, 195(3), 1–20. <https://doi.org/10.1007/S10661-023-10981-9>



- Wahyudi, A. J.,** Hernawan, U. E., Alifatri, L. O., Prayudha, B., Sani, S. Y., Febriani, F., & Ulumuddin, Y. I. (2022a). Carbon-offset potential from tropical seagrass conservation in selected areas of Indonesia. *Marine pollution bulletin*, 178, 113605. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113605>
- Wahyudi, A. J.,** Indriana, L. F., Firdaus, M., Prayitno, H. B., & Meirinawati, H. (2022b). Rate and efficiency of organic carbon assimilation by aquacultured juvenile sandfish *holothuria scabra*. *Sains Malaysiana*, 51(11), 3523–3537. <https://doi.org/http://doi.org/10.17576/jsm-2022-5111-02>
- Wahyudi, A. J.,** Iskandar, M. R., Meirinawati, H., Afdal, ., Vimono, I. B., Afianti, N. F., Sianturi, O. R., Wirawati, I., Darmayati, Y., Helfinalis, ., & Sidabutar, T. (2017). Organic matter and nutrient profile of the two-current-regulated-zone in the southwestern Sumatran waters (Ssw). *Marine research in Indonesia*, 42(1), 19–35. <https://doi.org/10.14203/mri.v42i1.124>
- Wahyudi, A. J.,** Meirinawati, H., Prayitno, H. B., Suratno, Surinati, D., & Hernawan, U. E. (2019b). The material origin of the particulate organic matter (POM) in the Eastern Indonesian waters. *AIP Conference proceedings*, 2175(1), 020047. <https://doi.org/10.1063/1.5134611>
- Wahyudi, A. J.,** Prayudha, B., Hafitz, M., Alifatri, L. O., Hernawan, U. E., Salatalohi, A., & Febriani, F. (2021a). Introducing a method for calculating carbon emission reduction on the seagrass ecosystem for Indonesia's low carbon development initiative. *IOP Conference series: earth and environmental science*, 789(1), 12014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/789/1/012014>
- Wahyudi, A. J.,** Rahmawati, S., Irawan, A., Hadiyanto, H., Prayudha, B., Hafizt, M., Afdal, A., Adi, N. S., Rustam, A., Hernawan, U. E., Rahayu, Y. P., Iswari, M. Y., Supriyadi, I. H., Solihudin, T., Ati, R. N. A., Kepel, T. L., Kusumaningtyas, M. A., Daulat, A., Salim, H. L., ... Kiswara, W. (2020). Assessing carbon stock and sequestration of the tropical seagrass meadows in Indonesia. *Ocean science journal*, 55(1), 85–97. <https://doi.org/10.1007/s12601-020-0003-0>

- Wahyudi, A. J.**, Rahmawati, S., Prayudha, B., Iskandar, M. R. R., & Arfianti, T. (2016). Vertical carbon flux of marine snow in *Enhalus acoroides*-dominated seagrass meadows. *Regional studies in marine science*, 5, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.01.003>
- Wahyudi, A. J.**, Suratno, Puspitasari, R., Arbi, U. Y., Oktaviyani, S., Purbonegoro, T., & Irawan, A. (2023c). Enrichment potential of carbon and metals through biogeochemical pools of particulate matter and organisms of the coastal and continental margin. *Regional studies in marine science*, 67, 103215. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2023.103215>
- Wahyudi, A. J.**, Triana, K., Afdal, A., Prayitno, H. B., Taufiqurrahman, E., Meirinawati, H., Puspitasari, R., Lestari, L., & Lastrini, S. (2021b). The decomposition rate of the organic carbon content of suspended particulate matter in the tropical seagrass meadows. *Acta oceanologica sinica*, 40(8), 44–52. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1802-6>
- Wahyudi, A. J.**, Triana, K., Masumoto, Y., Rachman, A., Firdaus, M. R., Iskandar, I., & Meirinawati, H. (2023a). Carbon and nutrient enrichment potential of South Java upwelling area as detected using hindcast biogeochemistry variables. *Regional studies in marine science*, 59, 102802. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2022.102802>
- Wahyudi, A. J.**, Wada, S., Aoki, M., & Hama, T. (2013). Stable isotope signature and pigment biomarker evidence of the diet sources of *Gaetice depressus* (Crustacea: Eubrachyura: Varunidae) in a boulder shore ecosystem. *Plankton and benthos research*, 8(2), 55–67. <https://doi.org/10.3800/pbr.8.55>
- Wahyudi, A. J.**, Wada, S., Aoki, M., & Hama, T. (2015). *Gaetice depressus* (Crustacea, Varunidae): Species profile and its role in organic carbon and nitrogen flow. *Ocean science journal*, 50(2). <https://doi.org/10.1007/s12601-015-0036-y>

Wicaksono, P., Maishella, A., **Wahyudi, A. J.**, & Hafizt, M. (2022). Multitemporal seagrass carbon assimilation and aboveground carbon stock mapping using Sentinel-2 in Labuan Bajo 2019–2020. *Remote sensing applications: society and environment*, 27, 100803. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2022.100803>

## DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

### Buku Internasional

1. Rahayu, D. L., & **Wahyudi, A. J.** (2008). *Common littoral hermit crabs of Indonesia* (Susetiono, Y. Shirayama, & A. Asakura (eds.)). Kyoto University Press.
2. Rahmawati, S., Hernawan, U. E., McMahon, K., Prayudha, B., Prayitno, H. B., **Wahyudi, A. J.**, & Vanderklift, M. (2019). *Blue carbon in seagrass ecosystem - guideline for the assessment of carbon stock and sequestration in Southeast Asia*. Gadjah Mada University Press.

### Buku Nasional

3. **Wahyudi, A. J.**, Sjafrie, N. D. M., Sutisna, D., Arbi, U. Y., Oktaviani, S., Ibrahim, P. S., Hidayat, B., Sutansyah, D., & Sulha, S. (2022). *Kupas tuntas legasi coremap: hasil, dampak dan proyeksi program pemantauan dan riset ekosistem laut Indonesia*. Penerbit BRIN. <https://doi.org/10.55981/BRIN.560>
4. **Wahyudi, A. J.**, Afdal, Abimanyu, H., Suratno, Syukri, A. F., Yuliana, C. I., Surinati, D., Meirinawati, H., Irawan, A., & Dharmawan, I. W. E. (2017). *Menyerap Karbon: Layanan Ekosistem Pesisir untuk Mitigasi Perubahan Iklim*. Gadjah Mada University Press.
5. **Wahyudi, A. J.**, Cordova, M. R., Sianturi, O. R., Meirinawati, H., Afianti, N. F., & Wirawati, I. (2016). *Ekspedisi Widya Nusantara 2015: Kontribusi Indonesia untuk Ekspedisi International Samudra Hindia*. Pusat Penelitian Oseanografi.

## Jurnal Internasional

6. Afdal, Bengen, D. G., **Wahyudi, A. J.**, Rastina, Prayitno, H. B., & Koropitan, A. F. (2023). Variation of CO<sub>2</sub> fluxes, net ecosystem production, and calcification in tropical waters of seagrass and coral reef. *Regional studies in marine science*, 68, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103290>
7. Afdal, Bengen, D. G., **Wahyudi, A. J.**, Rastina, Prayitno, H. B., Hamzah, F., & Koropitan, A. F. (2024). Spatial variability of aragonite saturation state ( $\Omega_{arag}$ ) in Indonesian coastal waters. *Marine environmental research*, 195, 106377. <https://doi.org/10.1016/J.MARENRES.2024.106377>
8. **Wahyudi, A. J.**, Suratno, Puspitasari, R., Arbi, U. Y., Oktaviyani, S., Purbonegoro, T., & Irawan, A. (2023). Enrichment potential of carbon and metals through biogeochemical pools of particulate matter and organisms of the coastal and continental margin. *Regional studies in marine science*, 67, 103215. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2023.103215>
9. Afdal, Bengen, D. G., **Wahyudi, A. J.**, Rastina, Prayitno, H. B., & Koropitan, A. F. (2023). Variation of CO<sub>2</sub> fluxes, net ecosystem production, and calcification in tropical waters of seagrass and coral reef. *Regional studies in marine science*, 103290. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2023.103290>
10. **Wahyudi, A. J.**, Febriani, F., & Triana, K. (2023). Multi-temporal variability forecast of particulate organic carbon in the Indonesian seas. *Environmental monitoring and assessment*, 195(3), 1–20. <https://doi.org/10.1007/S10661-023-10981-9>
11. Harmesa, H., Lestari, Lestari, Fitri Budiyo, Purbonegoro, T., **Wahyudi, A. J.** (2023). Preliminary study of geochemical speciation of copper and nickel in coastal sediments in Surabaya, Indonesia. *Environmental science and pollution research* 2023, 1, 1–18. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-27711-W>

12. **Wahyudi, A. J.**, Triana, K., Masumoto, Y., Rachman, A., Firdaus, M. R., Iskandar, I., & Meirinawati, H. (2023). Carbon and nutrient enrichment potential of South Java upwelling area as detected using hindcast biogeochemistry variables. *Regional studies in marine science*, 59, 102802. <https://doi.org/10.1016/J.RSMA.2022.102802>
13. Triana, K., **Wahyudi, A. J.**, Surinati, D., & Kartikoputro, E. (2023). Investigating ocean deoxygenation and the oxygen minimum zone in the Central Indo Pacific region based on the hindcast datasets. *Environmental monitoring and assessment*, 195(1), 28. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10615-6>
14. Iskandar, I., Sari, Q. W., **Wahyudi, A. J.**, Afdal, A., & Mardiansyah, W. (2022). Vertical Chlorophyll-a concentration profiles observed on the western coast of Northern Sumatera during the 2017 northeast monsoon. *Science and technology Indonesia*, 7(1), 36–40. <https://doi.org/10.26554/STI.2022.7.1.36-40>
15. **Wahyudi, A. J.**, Indriana, L. F., Firdaus, M., Prayitno, H. B., & Meirinawati, H. (2022). Rate and efficiency of organic carbon assimilation by aquacultured juvenile sandfish *holothuria scabra*. *Sains malaysiana*, 51(11), 3523–3537. <https://doi.org/http://doi.org/10.17576/jsm-2022-5111-02>
16. Wicaksono, P., Maishella, A., **Wahyudi, A. J.**, & Hafizt, M. (2022). Multitemporal seagrass carbon assimilation and aboveground carbon stock mapping using Sentinel-2 in Labuan Bajo 2019–2020. *Remote sensing applications: society and environment*, 27, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100803>
17. Meirinawati, H., & **Wahyudi, A. J.** (2022). Deepening knowledge of nutrient dynamics in coastal waters. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 39(1), 23–33. <https://doi.org/10.29037/AJSTD.747>
18. **Wahyudi, A. J.**, Hernawan, U. E., Alifatri, L. O., Prayudha, B., Sani, S. Y., Febriani, F., & Ulumuddin, Y. I. (2022). Carbon-off-set potential from tropical seagrass conservation in selected areas of Indonesia. *Marine pollution bulletin*, 178, 113605. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113605>

19. Harmesa, **Wahyudi, A. J.**, Lestari, & Taufiqurrahman, E. (2022). Variability of trace metals in coastal and estuary: Distribution, profile, and drivers. *Marine pollution bulletin*, 174, 113173. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113173>
20. Wulandari, I., **Wahyudi, A. J.**, & Triana, K. (2021). Anticipating ocean deoxygenation in the maritime continent of southeast Asia. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 38(1), 37–42. <https://doi.org/10.29037/ajstd.630>
21. Triana, K., **Wahyudi, A. J.**, Murakami-Sugihara, N., & Ogawa, H. (2021). Spatial and temporal variations in particulate organic carbon in Indonesian waters over two decades. *Marine and freshwater research*, 72(12), 1782–1797. <https://doi.org/10.1071/MF20264>
22. Lestari, L., Harmesa, H., Taufiqurrahman, E., Budiyanto, F., & **Wahyudi, A. J.** (2021). Assessment of potential variability of cadmium and copper trace metals using hindcast estimates. *Environmental monitoring and assessment*, 193(11), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S10661-021-09501-4>
23. **Wahyudi, A. J.**, Triana, K., Afdal, A., Prayitno, H. B., Taufiqurrahman, E., Meirinawati, H., Puspitasari, R., Lestari, L., & Lastrini, S. (2021). The decomposition rate of the organic carbon content of suspended particulate matter in the tropical seagrass meadows. *Acta oceanologica sinica*, 40(8), 44–52. <https://doi.org/10.1007/s13131-021-1802-6>
24. Prayitno, H. B., Puspitasari, R., Jandang, S., Triana, K., Taufiqurrahman, E., Lestari, Afdal, Wulandari, I., Harmesa, Meirinawati, H., Lastrini, S., Kaisupy, M. T., & **Wahyudi, A. J.** (2020). Establishing an Ocean Acidification Monitoring System for the Tropical Waters of Indonesia Facing Regional Climate Variability. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 37(3), 123–133. <https://doi.org/10.29037/ajstd.638>
25. Taufiqurrahman, E., **Wahyudi, A. J.**, & Masumoto, Y. (2020). The Indonesian Throughflow and its Impact on Biogeochemistry in the Indonesian Seas. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 37(1), 29–35. <https://doi.org/10.29037/ajstd.596>

26. Triana, K., & **Wahyudi, A. J.** (2020). Sea Level Rise in Indonesia: The Drivers and the Combined Impacts from Land Subsidence. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 37(3), 115–121. <https://doi.org/10.29037/ajstd.627>
27. Firdaus, M. R., Fitriya, N., Avianto, P., Prayitno, H. B., & **Wahyudi, A. J.** (2020). Plankton community in the western waters of North-Sumatera during the onset monsoon of Asian winter. *Marine research in Indonesia*, 45(1), 1–12. <https://doi.org/10.14203/MRI.V45I1.565>
28. Triana, K., & **Wahyudi, A. J.** (2020). GIS developments for ecosystem-based marine spatial planning and the challenges faced in Indonesia. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 36(3), 113–118. <https://doi.org/10.29037/ajstd.587>
29. Meirinawati, H., Prayitno, H. B., Indriana, L. F., Firdaus, M., & **Wahyudi, A. J.** (2020). Water quality assessment and monitoring of closed rearing system of the sea cucumber holothuria scabra. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 37(2), 73–80. <https://doi.org/10.29037/ajstd.624>
30. Harmesa, & **Wahyudi, A. J.** (2020). Two approaches to measure trace metals fluxes at sediment-water interface: sediment pore-water profile and benthic incubation. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 37(3), 135–143. <https://doi.org/10.29037/ajstd.617>
31. **Wahyudi, A. J.**, Rahmawati, S., Irawan, A., Hadiyanto, H., Prayudha, B., Hafizt, M., Afdal, A., Adi, N. S., Rustam, A., Hernawan, U. E., Rahayu, Y. P., Iswari, M. Y., Supriyadi, I. H., Solihudin, T., Ati, R. N. A., Kepel, T. L., Kusumaningtyas, M. A., Daulat, A., Salim, H. L., ... Kiswara, W. (2020). Assessing carbon stock and sequestration of the tropical seagrass meadows in Indonesia. *Ocean science journal*, 55(1), 85–97. <https://doi.org/10.1007/s12601-020-0003-0>
32. **Wahyudi, A. J.**, Afdal, A., & Meirinawati, H. (2019). Stable carbon isotope signature of particulate organic matter in the Southwestern Sumatran waters of the Eastern Indian ocean. *ASEAN Journal on science and technology for development*, 36(2), 35–43. <https://doi.org/10.29037/ajstd.555>



33. Sprintall, J., Gordon, A. L., Wijffels, S. E., Feng, M., Hu, S., Koch-Larrouy, A., Phillips, H., Nugroho, D., Napitu, A., Pujiana, K., Dwi Susanto, R., Sloyan, B., Yuan, D., Riama, N. F., Siswanto, S., Kuswardani, A., Arifin, Z., **Wahyudi, A. J.**, Zhou, H., ... Setiawan, A. (2019). Detecting change in the Indonesian seas. *Frontiers in marine science*, 6(JUN), 257. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00257>
34. Sprintall, J., Gordon, A. L., Wijffels, S. E., Feng, M., Hu, S., Koch-Larrouy, A., Phillips, H., Nugroho, D., Napitu, A., Pujiana, K., Susanto, R. D., Sloyan, B., Peña-Molino, B., Yuan, D., Riama, N. F., Siswanto, S., Kuswardani, A., Arifin, Z., **Wahyudi, A. J.**, ... Setiawan, A. (2019). Corrigendum: detecting change in the Indonesian seas. *Frontiers in marine science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00549>
35. **Wahyudi, A. J.**, & Afdal. (2019). The origin of the suspended particulate matter in the seagrass meadow of tropical waters, an evidence of the stable isotope signatures. *Acta oceanologica sinica*, 38(1), 136–143. <https://doi.org/10.1007/s13131-019-1380-z>
36. Nuraya, T., Koropitan, A. F., & **Wahyudi, A. J.** (2019). Sediment carbon stock of West Kalimantan mangrove forests. *Marine research in Indonesia*, 44(1), 27–35. <https://doi.org/10.14203/mri.v44i1.545>
37. Indriana, L. F., **Wahyudi, A. J.**, & Kunzmann, A. (2018). Assimilation dynamics of different diet sources by the sea cucumber *Holothuria scabra*, with evidence from stable isotope signature. *Annual research & review in biology*, 28(2), 1–10. <https://doi.org/10.9734/arrb/2018/42591>
38. **Wahyudi, A. J.**, Iskandar, M. R., Meirinawati, H., Afdal, ., Vimonno, I. B., Afianti, N. F., Sianturi, O. R., Wirawati, I., Darmayati, Y., Helfinalis, ., & Sidabutar, T. (2017). Organic matter and nutrient profile of the two-current-regulated zone in the Southwestern Sumatran waters (SSW). *Marine research in Indonesia*, 42(1), 19–35. <https://doi.org/10.14203/mri.v42i1.124>

39. **Wahyudi, A. J.**, Rahmawati, S., Prayudha, B., Iskandar, M. R. R., & Arfianti, T. (2016). Vertical carbon flux of marine snow in *Enhalus acoroides*-dominated seagrass meadows. *Regional studies in marine science*, 5, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.01.003>
40. Cordova, M. R., & **Wahyudi, A. J.** (2016). Microplastic in the deep-sea sediment of Southwestern Sumatran waters. *Marine research in Indonesia*, 41(1), 27–35. <https://doi.org/10.14203/MRI.V41I1.99>
41. **Wahyudi, A. J.**, Wada, S., Aoki, M., & Hama, T. (2015). Gaetice depressus (Crustacea, Varunidae): Species profile and its role in organic carbon and nitrogen flow. *Ocean science journal*, 50(2). <https://doi.org/10.1007/s12601-015-0036-y>
42. **Wahyudi, A. J.** (2014). Trends and future projections for marine biogeochemistry research in Indonesia (Tren dan proyeksi penelitian biogeokimia laut di Indonesia). *ILMU KELAUTAN: Indonesian journal of marine sciences (Vol. 19, Issue 3, pp. 121–130)*. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijms/article/view/8514>
43. **Wahyudi, A. J.**, Wada, S., Aoki, M., & Hama, T. (2013). Stable isotope signature and pigment biomarker evidence of the diet sources of *Gaetice depressus* (Crustacea: Eubrachyura: Varunidae) in a boulder shore ecosystem. *Plankton and benthos research*, 8(2), 55–67. <https://doi.org/10.3800/pbr.8.55>

### Jurnal Nasional

44. Afdal, A., Prayitno, H. B., **Wahyudi, A. J.**, & Lastrini, S. (2020). Variasi fluks CO<sub>2</sub> udara-laut di perairan pesisir Pulau Bintan. *OLDI (Oseanologi dan Limnologi Di Indonesia)*, 5(3), 145–160. <https://doi.org/10.14203/OLDI.2020.V5I3.266>
45. Gunawan, J. V., Parengkuan, M., **Wahyudi, A. J.**, & Zulpikar, F. (2019). Estimasi stok karbon pada biomassa lamun di pulau semak daun, Kepulauan Seribu. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, 4(2), 89. <https://doi.org/10.14203/oldi.2019.v4i2.229>

46. Bernawis, L. I., Anwar, I. P., Bayhaqi, A., **Wahyudi, A. J.**, Putri, M. R., & Fadli, M. (2019). Estimasi pertukaran gas CO<sub>2</sub> laut-udara di Perairan Simeulue pada monsun asia musim panas. *Jurnal ilmu dan teknologi kelautan tropis*. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v11i3.22662>
47. Indriani, ., **Wahyudi, A. J.**, & Yona, D. (2017). Cadangan karbon di area padang lamun pesisir Pulau Bintan, Kepulauan Riau. *OLDI (Oseanologi dan Limnologi Di Indonesia)*, 2(3), 1–11. <https://doi.org/10.14203/OLDI.2017.V2I3.99>
48. **Wahyudi, A. J.** (2008). Studi fenetik Genus Thalamita Latreille , 1829 (Crustacea : Decapoda : Brachyura : Portunoidea : Portunidae) berdasarkan diagnosis morfologi dalam “ Faune de Madagascar XVI ’. *Jurnal oseanologi*, 1(1), 1–10.

### Prosiding Internasional

49. Meirinawati, H., Prayitno, H. B., & **Wahyudi, A. J.** (2021). Nutrient distribution in Eastern Indonesian waters. *IOP conference series: earth and environmental science*, 934(1), 012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/934/1/012052>
50. **Wahyudi, A. J.**, & Febriani, F. (2021). Country-specific emission factor for developing a tier 3 system of Indonesia’s seagrass carbon inventory. *IOP conference series: earth and environmental science*, 944(1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/944/1/012058>
51. Triana, K., & **Wahyudi, A. J.** (2021). Dissolved oxygen variability of Indonesian seas over decades as detected by satellite remote sensing. *IOP conference series: earth and environmental science*, 925(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/925/1/012003>
52. **Wahyudi, A. J.**, Prayudha, B., Hafitz, M., Alifatri, L. O., Hernawan, U. E., Salatalohi, A., & Febriani, F. (2021). Introducing a method for calculating carbon emission reduction on the seagrass ecosystem for indonesia’s low carbon development initiative. *IOP conference series: earth and environmental science*, 789(1), 12014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/789/1/012014>

53. Angrelina, I., Sartimbul, A., & **Wahyudi, A. J.** (2019). The potential of seagrass beds on the coast of Putri Menjangan as a carbon sequestration ecosystem on Bali Island. *IOP conference series: earth and environmental science*, 241(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/241/1/012010>
54. **Wahyudi, A. J.**, Meirinawati, H., Prayitno, H. B., Suratno, Surinati, D., & Hernawan, U. E. (2019). The material origin of the particulate organic matter (POM) in the Eastern Indonesian waters. *AIP conference proceedings*, 2175(1), 020047. <https://doi.org/10.1063/1.5134611>
55. **Wahyudi, A. J.**, Afdal, Prayudha, B., Dharmawan, I. W. E. E., Irawan, A., Abimanyu, H., Meirinawati, H., Surinati, D., Syukri, A. F., Yuliana, C. I., & Yuniati, P. I. (2018). Carbon sequestration index as a determinant for climate change mitigation: Case study of Bintan Island. *IOP conference series: earth and environmental science*, 118(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012050>
56. **Wahyudi, A. J.**, & Afdal. (2018). Climate change mitigation: From carbon cycle to policy. *AIP conference proceedings*, 2019(1), 040019. <https://doi.org/10.1063/1.5061889>
57. **Wahyudi, A. J.**, Arbi, U. Y., Aoki, M., & Hama, T. (2010). The study of species : A “step backward” that will lead to progressive step for sustainable environment. *Sustainable future for human security*, December, 460–467. <https://doi.org/10.13140/2.1.2696.0329>

## **Paten**

58. **Wahyudi, A. J.**, Indriana, L. F., Firdaus, M., Meirinawati, H., Prayitno, H. B. (2020). Metode penilaian dan pengukuran efisiensi asimilasi karbon organik teripang *Holothuria Scabra* berdasarkan asumsi kesetaraan inlet-outlet pembawa material. *Paten Sederhana* (Terdaftar) S00202001902

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

1. **Wahyudi, A. J.**, Afdal, Adi, N. S., Rustam, A., Hadiyanto, Rahmawati, S., Irawan, A., Dharmawan, I. W. E., Prayudha, B., & Hafizt, M. (2018). Summary for Policy Maker: the Potentials of Carbon Stock and Sequestration of Indonesia's Mangrove and Seagrass Ecosystem. [https://www.researchgate.net/publication/360032225\\_Summary\\_for\\_Policy\\_Maker\\_THE\\_POTENTIALS\\_OF\\_CARBON\\_STOCK\\_AND\\_SEQUESTRATION\\_OF\\_INDONESIA%27S\\_MANGROVE\\_AND\\_SEAGRASS\\_ECOSYSTEM?channel=doi&linkId=625e368c709c5c2adb867e0d&showFulltext=true](https://www.researchgate.net/publication/360032225_Summary_for_Policy_Maker_THE_POTENTIALS_OF_CARBON_STOCK_AND_SEQUESTRATION_OF_INDONESIA%27S_MANGROVE_AND_SEAGRASS_ECOSYSTEM?channel=doi&linkId=625e368c709c5c2adb867e0d&showFulltext=true).
2. **Wahyudi, A. J.** (2023). Pusat Data, Informasi dan Sistem Observasi Laut Nasional, Perluakah? <https://www.kompas.com/sains/read/2023/06/01/180000023/pusat-data-informasi-dan-sistem-observasi-laut-nasional-perluakah?page=all#page2>.
3. **Wahyudi, A. J.** (2023). Aktivitas Penambangan Pasir Laut Meningkatkan Emisi Karbon. <https://www.kompas.com/skola/read/2023/06/09/102025569/aktivitas-penambangan-pasir-laut-meningkatkan-emisi-karbon>.
4. **Wahyudi, A. J.** (2023). Pengayaan Karbon dan Nutrien Laut Selatan Jawa. <https://www.kompas.com/sains/read/2023/07/28/155707623/pengayaan-karbon-dan-nutrien-laut-selatan-jawa?page=all#page2>.
5. **Wahyudi, A. J.** (2022). Mengintip Ekosistem Pengelolaan dan Anggaran Riset Kelautan. <https://www.kompas.com/sains/read/2022/12/07/160000123/mengintip-ekosistem-pengelolaan-dan-anggaran-riset-kelautan#page2>.
6. **Wahyudi, A. J.** (2022). Menilik Kebijakan Riset dan Inovasi dalam Platform Ekonomi Biru, Apakah Masih Sebatas Jargon? <https://www.kompas.com/sains/read/2022/10/16/170300523/menilik-kebijakan-riset-dan-inovasi-dalam-platform-ekonomi-biru-apaakah?page=all#page2>.

7. **Wahyudi, A. J.** (2021). Laut Indonesia Berpotensi Mengalami Perubahan Kimiawi yang Signifikan. <https://www.kompas.com/sains/read/2021/12/10/120500723/laut-indonesia-berpotensi-mengalami-perubahan-kimiawi-yang-signifikan?page=all#page2>.
8. **Wahyudi, A. J.** (2021). Menakar Korelasi Perubahan Iklim dan Lingkungan terhadap Ekonomi Biru. <https://www.kompas.com/sains/read/2021/09/15/160500823/menakar-korelasi-perubahan-iklim-dan-lingkungan-terhadap-ekonomi-biru?page=all>.
9. **Wahyudi, A. J.** (2021). Optimisme Riset Kelautan di Indonesia. <https://www.kompas.com/sains/read/2021/07/21/140100123/optimisme-riset-kelautan-di-indonesia>.
10. **Wahyudi, A. J.** (2020). Sewindu Riset Pesisir, Data Karbon Biru Padang Lamun Indonesia Tercapai. <https://www.kompas.com/sains/read/2020/09/28/190600323/sewindu-riset-pesisir-data-karbon-biru-padang-lamun-indonesia-tercapai?page=all>.
11. **Wahyudi, A. J.** (2008). Studi Fenetik Genus *Thalamita* Latreille, 1829 ( Crustacea : Decapoda : Brachyura : Portunoidea: Portunidae ) berdasarkan Diagnosis Morfologi dalam “ Faune de Madagarcar XVI ’. *Jurnal Oseanologi*, 1(1), 1–10.
12. **Wahyudi, A. J.** (2008). Zoological Nomenclature and Taxonomy: General Information. *Oseana*, XXXIII(4), 15–21.
13. **Wahyudi, A. J.** (2007). Memperkenalkan Cluster Analysis of Variables dalam Minitab 11.12 untuk Kajian Filogeni Suku-Suku Krustasea (Brachyura). *Oseana*, XXXII(3), 21–36.
14. **Wahyudi, A. J.** (2006). Kepiting Beracun Suku Xanthidae: Kajian dan Hipotesis Faktor-Faktor Penyebabnya. *Oseana*, XXXI(4), 31–38.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP

### A. Data Pribadi

Nama	: Dr. A'an Johan Wahyudi
Tempat, Tanggal Lahir	: Bojonegoro, 20 Januari 1983
Anak ke	: 1 dari 4 Bersaudara
Jenis Kelamin	: Pria
Nama Ayah Kandung	: Kusnadi
Nama Ibu Kandung	: Ninik Cahyawati
Nama Istri	: Febty Febriani, Ph.D.
Jumlah Anak	: 2 (dua)
Nama Anak	: 1. Fatah Rifqy Wahyuriansyah 2. Fawwaz Rasyad Wahyuriansyah
Nama Instansi	: Pusat Riset Oseanografi, Organisasi Riset Kebumihan dan Maritim, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	: Signifikansi Siklus Biogeokimia Karbon Laut Bagi Sistem Biosfer dan Pembangunan Ekonomi Biru Indonesia
Ilmu	: Kelautan ( <i>Marine Sciences</i> )
Bidang	: Oseanografi Kimia
Kepakaran	: Biogeokimia Laut
No. SK Pangkat Terakhir	: SK Kepala BRIN Nomor 2371/I/ KP/2022, tanggal 30 Maret 2022
No. SK Peneliti Ahli Utama	: Keppres RI Nomor 2/M 2023, tanggal 9 Januari 2023



## B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	SDN Kalirejo 1	Ngraho/ Bojonegoro	1995
2.	SMP	SMPN 1 Ngraho	Ngraho/ Bojonegoro	1998
3.	SMA	SMU N 2 Bojonegoro	Bojonegoro	2001
4.	S-1	Universitas Brawijaya	Malang	2005
5.	S-3 ( <i>fast track</i> )	University of Tsukuba	Tsukuba/Jepang	2013

## C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Pendidikan dan Pelatihan Prajabatan	Jakarta/ Indonesia	2006
2.	Pendidikan dan Pelatihan Jabatan Fungsional Peneliti	Jakarta/ Indonesia	2007
3.	<i>Dies ProGRANT Research Grant Proposal Writing Training</i>	Jakarta/ Indonesia	2016
4.	Pendidikan dan Pelatihan Jabatan Fungsional Peneliti Lanjutan	Jakarta/ Indonesia	2017
5.	<i>Dies ProGRANT Research Grant Proposal Writing Training for Trainer</i>	Daring	2020

## D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	–	–	–

## E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Kandidat Peneliti	29 April 2010
2.	Peneliti Muda	8 Agustus 2014
3.	Peneliti Ahli Madya	1 Agustus 2019
4.	Peneliti Ahli Utama	25 Januari 2023

## F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	–	–	–

## G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	The 5th International Symposium On Applied Chemistry (ISAC 2019)	Pemakalah oral	LIPI; Indonesia	2019
2.	JpGU-AGU Meeting.	Pemakalah oral	Japan Geoscience Union; Japan	2020
3.	International Conference on the Ocean and Earth Sciences (ICOES).	Pemakalah oral	LIPI; Indonesia	2020
4.	IMBeR Westpac Symposium.	Pemakalah oral	Integrated Marine Biosphere Research (IMBeR)	2021
5.	International Conference On Marine Science	Pemakalah oral	IPB University; Indonesia	2021
6.	The 4th International Conference on Maritime Science and Advance Technology	Invited speaker	Bandung Institute of Technology, ISOI, and MTCRC; Indonesia	2023

## H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1.	<i>Marine Research in Indonesia</i>	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)	Dewan Redaksi	2016 – 2017
2.	<i>Discover Oceans</i>	Springer Nature	Dewan Redaksi	2024 – sekarang

## I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	0
2.	Bersama Penulis Lainnya	57
	Total	57

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	8
2.	Bahasa Inggris	49
3.	Bahasa Lainnya	0
	Total	57

## J. Pembinaan Kader Ilmiah

### Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	0
2.	Bersama Penulis Lainnya	57
	Total	57

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	8
2.	Bahasa Inggris	49
3.	Bahasa Lainnya	0
	Total	57

## J. Pembinaan Kader Ilmiah

### Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Ita Wulandari	Badan Riset dan Inovasi Nasional	Pembimbing Utama	2021
2.	Edwards Taufiqurrahman	Badan Riset dan Inovasi Nasional	Pembimbing Utama	2021
3.	Karlina Triana	Badan Riset dan Inovasi Nasional	Pembimbing Utama	2021
4.	Harmesa	Badan Riset dan Inovasi Nasional	Pembimbing Utama	2021

### Mahasiswa

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Indriani	Universitas Brawijaya	Pembimbing Anggota (S1)	2016
2.	Jessica Viny Gunawan	Universitas Surya	Pembimbing Anggota (S1)	2018
3.	Isty Angrelina	Universitas Brawijaya	Pembimbing Anggota (S1)	2018
4.	Tia Nuraya	Institut Pertanian Bogor	Pembimbing Anggota (S2)	2018
5.	Afdal	Institut Pertanian Bogor	Co-promotor (S3)	2020
6.	Camelia Kusuma Tito	Institut Pertanian Bogor	Co-promotor (S3)	2022
7.	Lestari	Universitas Indonesia	Co-promotor (S3)	2023
8.	Harmesa	Universitas Indonesia	Co-promotor (S3)	2023

## K. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Ikatan Sarjana Oseanologi Indonesia (ISOI)	2006 – sekarang
2.	Anggota	Perhimpunan Periset Indonesia	2019 – sekarang
3.	<i>National Contact/ Representative</i>	<i>Integrated Marine Biosphere Research (IMBeR)</i>	2022 – sekarang
4.	<i>Deputy Director (Co-Champion)</i>	<i>IMBeR's Blue Carbon Working Group</i>	2022 – sekarang

## L. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalencana Karya Satya 10 Tahun	Presiden RI	2017
2.	<i>Outstanding ASEAN Science Diplomat</i>	<i>ASEAN Science Diplomat Board</i>	2020
3.	SDM IPTEK Terbaik Bidang Ilmu Pengetahuan Kebumihan.	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)	2020

## DAFTAR ISTILAH

1. **Alkalinitas:** Kemampuan suatu larutan untuk menahan perubahan pH ketika terjadi penambahan asam atau basa.
2. ***Allochthonous*:** Yang berasal dari luar sistem, dalam konteks ini, merujuk pada sumber-sumber karbon organik yang berasal dari luar ekosistem tersebut.
3. **Antropogenik:** Berkaitan dengan aktivitas manusia.
4. **Aragonit:** Jenis mineral kalsium karbonat yang ditemukan dalam air laut, karang dan kerangka organisme laut lainnya.
5. **Asimilasi:** Proses di mana organisme mengambil dan menggabungkan zat-zat atau senyawa-senyawa tertentu untuk digunakan dalam proses biologisnya sendiri.
6. ***Autochthonous*:** Yang berasal atau dihasilkan dari dalam sistem yang sama, dalam konteks ini, merujuk pada sumber-sumber karbon organik yang dihasilkan dalam ekosistem itu sendiri.
7. **Batipelagis:** Wilayah laut yang dalam, dari kedalaman 200 hingga 2500 meter.
8. ***Big Data*:** Pengumpulan, penyimpanan, dan analisis data dalam jumlah besar yang dapat memberikan wawasan atau informasi yang berharga.
9. **Biomassa:** Materi organik yang berasal dari organisme hidup, seperti tumbuhan atau hewan.
10. **Biogeokimia:** Cabang ilmu yang mempelajari interaksi antara proses biologis, geologi, dan kimia dalam memengaruhi dinamika dan transfer material di biosfer.

11. **Dekomposisi:** Proses penguraian bahan organik menjadi bentuk-bentuk yang lebih sederhana oleh organisme pengurai seperti bakteri dan jamur/fungi.
12. **Deret Waktu (*Time-Series*):** Data yang diurutkan menurut urutan waktu.
13. ***Dipole Mode Index (DMI)*:** Indeks yang mengukur perbedaan suhu antara Samudra Hindia bagian barat dan timur, yang berkaitan dengan Indian Ocean Dipole (IOD).
14. **Dinamika:** Studi tentang gerakan dan perubahan dari waktu ke waktu.
15. **Eutrofikasi:** Proses peningkatan kadar nutrisi dalam ekosistem air yang dapat menyebabkan pertumbuhan alga yang berlebihan dan penurunan kualitas air.
16. **Ekonomi Biru:** pendekatan yang terintegrasi, holistik, lintas sektor, dan lintas pemangku kepentingan yang menciptakan nilai tambah dan rantai nilai sumber daya dari laut dan perairan tawar secara inklusif dan berkelanjutan.
17. **Ekosistem:** Komunitas organisme hidup yang berinteraksi dengan lingkungannya.
18. **Emisi:** Pelepasan atau pengeluaran zat tertentu ke dalam lingkungan.
19. **Ekstrim:** Keadaan yang tidak biasa, tidak normal, atau di luar rentang yang diharapkan.
20. ***El Niño*:** Fenomena alami yang terjadi ketika suhu permukaan laut di Samudra Pasifik bagian tengah dan timur menjadi lebih hangat dari biasanya.
21. **Fotosintesis:** Proses di mana tumbuhan dan organisme lain menggunakan energi cahaya matahari untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi gula dan oksigen.

22. **Fluktuasi:** Perubahan yang tidak teratur atau tidak konsisten dalam suatu variabel dari waktu ke waktu.
23. **Fluks:** Jumlah atau laju aliran dari suatu materi melalui suatu sistem tertentu, dalam hal ini, mengacu pada aliran karbon dari satu reservoir ke yang lainnya.
24. **Gradien:** Perubahan bertahap dalam suatu properti fisik atau kimia dalam suatu wilayah tertentu.
25. **Hindcast:** Proses menggunakan model untuk membuat estimasi tentang apa yang telah terjadi di masa lalu berdasarkan data yang ada.
26. **Indian Ocean Dipole:** Pola iklim alami di Samudra Hindia yang berkaitan dengan variasi suhu laut dan angin.
27. **Inorganik:** Mengacu pada zat atau senyawa yang tidak mengandung karbon dan hidrogen yang terikat secara kovalen.
28. **Isotop stabil:** Versi atom dari unsur yang memiliki jumlah neutron yang berbeda, tetapi jumlah proton yang sama di intinya, yang stabil atau tidak mengalami peluruhan radioaktif.
29. **Karbon biru:** istilah yang digunakan untuk merujuk pada karbon yang disimpan di ekosistem pesisir (dalam biomassa dan sedimen), terutama di hutan mangrove, padang lamun, dan padang rumput laut; serta memiliki potensi besar dalam mengurangi emisi gas rumah kaca serta memberikan manfaat ekonomi, ekologi, dan sosial yang penting.
30. **Konsentrasi:** Jumlah suatu zat yang terlarut dalam suatu larutan.
31. **Konservasi padang lamun:** Upaya untuk melindungi dan mempertahankan ekosistem padang lamun yang penting dalam upaya mitigasi perubahan iklim dan pelestarian keanekaragaman hayati.
32. **Konsentrasi puncak:** Titik tertinggi dalam konsentrasi suatu zat atau material.



33. **Konsentrasi terlarut:** Jumlah suatu zat yang larut dalam cairan tertentu, seperti oksigen terlarut dalam air laut.
34. **Larutan:** Campuran homogen dari dua atau lebih zat, di mana satu zat terlarut dalam yang lain.
35. **Marak Alga Berbahaya:** Peristiwa di mana populasi alga tumbuh secara tidak terkendali dan dapat menghasilkan toksin yang berbahaya bagi organisme lain di lingkungan tersebut.
36. **Material marine-end:** Materi yang berasal dari lingkungan laut atau lautan.
37. **Material terrigenous-end:** Materi yang berasal dari daratan atau pengendapan sungai ke laut.
38. **Mitigasi:** Tindakan untuk mengurangi dampak atau keparahan sesuatu, seperti perubahan iklim atau bencana alam.
39. **Mg C/ha:** Mega gram karbon per hektar; 1 Mg = 1 ton metrik; 1 Mg C/ha setara dengan sekitar 3.67 Mg CO<sub>2</sub>/ha.
40. **Mg CO<sub>2</sub>/ha:** Mega gram karbon dioksida per hektar; 1 Mg CO<sub>2</sub>/ha setara dengan sekitar 0.273 Mg C/ha.
41. **Monsoon:** Pola angin musiman yang terjadi di wilayah-wilayah tertentu, biasanya menghasilkan musim hujan dan musim kering yang berbeda.
42. **MRV (Measurable, Reportable, Verifiable):** Konsep yang digunakan dalam pemantauan dan pelaporan emisi gas rumah kaca, di mana data harus dapat diukur, dilaporkan, dan diverifikasi.
43. **Muara sungai:** Tempat di mana sungai bertemu dengan lautan.
44. **Neraca Karbon:** Estimasi atau perhitungan dari jumlah karbon yang beredar antara atmosfer, darat, dan lautan.
45. **Oceanic Niño Index (ONI):** Indeks yang digunakan untuk menilai dan memantau fase-fase *El Niño* dan *La Niña*.

46. **Oligotrofik:** Lingkungan dengan sedikit nutrisi yang tersedia untuk tanaman atau organisme hidup.
47. **Parsial:** Sebagian; tidak sepenuhnya atau tidak menyeluruh.
48. **Pelapukan:** Proses alami di mana batuan dan material lain terurai menjadi partikel-partikel yang lebih kecil melalui interaksi dengan unsur-unsur seperti air, angin, dan organisme hidup.
49. **Penanda alami isotop stabil:** Unsur isotop yang digunakan sebagai penanda dalam penelitian untuk melacak pergerakan materi dalam ekosistem.
50. **Pg C:** Peta gram karbon;  $1 \text{ Pg C} = 10^9$  kilogram karbon
51. **Pompa biologis karbon:** Proses di mana karbon organik dari lapisan permukaan laut dipompa ke lapisan yang lebih dalam atau ke dasar laut oleh aktivitas biologis, membantu dalam penyerapan karbon dari atmosfer ke dalam lautan.
52. **Potensi sequestrasi:** Kemampuan suatu sistem untuk menyimpan atau menahan karbon dalam jangka waktu tertentu.
53. **Prakiraan (forecast):** Estimasi atau ramalan tentang keadaan atau peristiwa di masa depan berdasarkan data dan analisis yang tersedia.
54. **Proksi:** Pengganti atau penunjuk yang digunakan untuk mengukur atau mewakili sesuatu yang sulit atau tidak mungkin diukur secara langsung.
55. **Remineralisasi:** Proses di mana materi organik diurai menjadi bentuk-bentuk mineral yang lebih sederhana oleh aktivitas biologis, menghasilkan senyawa-senyawa anorganik seperti karbon dioksida.
56. **Reservoir:** Tempat penyimpanan atau akumulasi material, dalam konteks ini, merujuk pada tempat penyimpanan karbon.

57. **Respirasi:** Proses biologis di mana organisme mengoksidasi makanan untuk menghasilkan energi, mengeluarkan karbon dioksida sebagai produk sampingan.
58. **Risiko:** Kemungkinan terjadinya sesuatu yang dapat menyebabkan kerugian atau bahaya.
59. **SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average):** Sebuah model statistik untuk menganalisis dan meramalkan data deret waktu.
60. **SARIMAX (SARIMA with eXogenous Factor):** Sebuah perluasan dari model SARIMA yang memungkinkan inklusi faktor eksternal atau eksogen dalam model.
61. **Sekuestrasi:** Proses di mana karbon diambil dari atmosfer dan disimpan dalam bentuk organik maupun inorganik.
62. **Sistem monsun (*monsoon system*):** Pola angin musiman yang terkait dengan perubahan musiman dalam suhu di daratan dan lautan.
63. **Spasial:** Berkaitan dengan ruang atau dimensi spasial.
64. **Subtropis:** Daerah di antara garis lintang tropis dan daerah kutub, dengan iklim yang lebih hangat daripada daerah kutub tetapi lebih dingin daripada daerah tropis.
65. **Temporal:** Berkaitan dengan waktu atau perubahan seiring waktu.
66. **Tumbuhan C3 dan C4:** dua jenis tumbuhan dengan jalur fotosintesis yang berbeda i.e., tumbuhan C3 mengambil CO<sub>2</sub> langsung dari udara, sementara tumbuhan C4 mengubahnya menjadi senyawa 4-karbon terlebih dahulu; tumbuhan C4 cenderung lebih efisien dalam kondisi suhu tinggi dan kekeringan, sedangkan tumbuhan C3 lebih cocok untuk kondisi suhu rendah.
67. **Trofi:** Tingkat dalam rantai makanan atau jaringan makanan.

68. **Upwelling:** Proses di mana air dalam laut dalam bergerak ke permukaan laut, membawa nutrisi yang kaya dan berkontribusi pada produktivitas biologis di wilayah tersebut.
69. **Variabilitas:** Perubahan atau variasi yang terjadi dari waktu ke waktu.

**B**iogeokimia adalah cabang ilmu yang mempelajari transfer material dari atmosfer, hidrosfer, litosfer, dan biosfer. Penelitian biogeokimia laut, terutama terkait dengan perubahan iklim, pengasaman laut, dan pemanasan global, meningkat sejak awal 1990-an. Di Asia Tenggara, penelitian ini lebih berfokus pada dampak aktivitas manusia. Perkembangan peralatan analisis modern telah mempercepat pemahaman tentang siklus karbon, memungkinkan kuantifikasi karbon dan identifikasi peran organisme dalam transfer karbon. Penelitian tentang dekomposisi material organik dan peran vegetasi laut dalam menyerap karbon dioksida telah berkembang dengan teori dan pemodelan terbaru. Perkembangan teknologi analitik dan komputasi juga telah mempermudah pengumpulan dan analisis data dalam penelitian biogeokimia karbon. Teknik pemetaan spasial menggunakan citra satelit dan sensor penginderaan jauh memungkinkan pemantauan perubahan lahan dan vegetasi laut secara akurat. Selain itu, kemajuan dalam pemodelan komputer memungkinkan simulasi interaksi kompleks antara faktor biologis, kimia, dan fisik yang mempengaruhi distribusi dan perubahan karbon.

Peningkatan karbon antropogenik di atmosfer sejak revolusi industri telah mengubah kondisi bumi dan biosfer, termasuk variabilitas karbon laut yang mempengaruhi produktivitas laut. Selain itu, variabilitas iklim di Indonesia, hasil dari dinamika laut dan atmosfer, mempengaruhi variabilitas biogeokimia karbon laut. Selama ini laut Indonesia berperan penting dalam siklus karbon laut global karena keanekaragaman ekosistem, pola sirkulasi laut, dan lokasi geografisnya yang strategis. Siklus biogeokimia karbon laut di Indonesia mencerminkan sifat dinamis dan berdampak global pada sistem biosfer.

Indonesia dengan karakteristik tropisnya memiliki berbagai jenis ekosistem yang menyediakan keragaman reservoir karbon, menghasilkan transfer karbon yang lebih kompleks dibanding wilayah subtropis. Informasi terkait siklus biogeokimia karbon laut Indonesia penting untuk kebijakan pembangunan nasional. Naskah orasi ini mengulas lima hal utama: siklus biogeokimia karbon laut, transfer biogeokimia karbon laut, variabilitas karbon laut Indonesia oleh sebab faktor eksogen, prakiraan deret waktu variabilitas karbon laut, dan relevansi riset terhadap pembangunan ekonomi biru. Bab-bab ini memberikan pemahaman mendalam tentang peran riset dalam pengelolaan lingkungan dan ekonomi berkelanjutan.

BRIN Publishing  
*The Legacy of Knowledge*

Diterbitkan oleh:  
**Penerbit BRIN**, anggota Ikapi  
Gedung BJ, Habibie Lt. 8,  
Jln. M.H. Thamrin No. 8,  
Kota Jakarta Pusat 10340  
*E-mail:* penerbit@brin.go.id  
*Website:* penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.1258



ISBN 978-623-8372-89-8



9 786238 372898