



Variabilitas Biogeokimia dari pH dan Tekanan Parsial Karbondioksida ($p\text{CO}_2$) di Perairan Selatan Jawa Berdasarkan Data *Argo Float*

Received: 19 April 2026

Accepted: 6 Mei 2026

*Korespondensi: snur@unib.ac.id

Syarifudin Nur^{1*}, Triana Krisandini², Mukti D. Wilopo¹

¹Prodi Ilmu Kelautan, Jurusan Peternakan, Fakultas Pertanian,
Jl. W. R. Supratman, Kandang Limun, Provinsi Bengkulu, 38371, Indonesia

²Prodi Pendidikan Kimia, Jurusan Pendidikan Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Jl. W. R.
Supratman, Kandang Limun, Provinsi Bengkulu, 38371, Indonesia

Abstrak — Perairan Selatan Jawa merupakan wilayah dinamis yang dipengaruhi oleh sistem monsun dan fenomena *upwelling* musiman, yang berdampak signifikan pada siklus karbon laut. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji variabilitas temporal pH dan tekanan parsial karbondioksida $p\text{CO}_2$ di Perairan Selatan Jawa (8° – 13° LS dan 106° – 114° BT) menggunakan data profil dari *Biogeochemical-Argo Float* periode 2010–2025. Metode penelitian melibatkan pengolahan data sekunder dari *World Ocean Database* (WOD) menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV), di mana nilai $p\text{CO}_2$ diestimasi melalui pendekatan sistem karbonat laut berdasarkan parameter pH, suhu, dan salinitas. Hasil analisis menunjukkan adanya variabilitas musiman yang kuat, di mana penurunan nilai pH dan peningkatan $p\text{CO}_2$ secara signifikan terjadi pada musim timur (Juni–Agustus). Fenomena ini berkaitan erat dengan intensitas *upwelling* yang mengangkat massa air kaya karbon dan rendah oksigen ke lapisan permukaan. Pada kolom air yang lebih dalam, ditemukan zona minimum pH (7,7–7,9) pada kedalaman 500–1500 meter yang berasosiasi dengan proses remineralisasi bahan organik. Secara jangka panjang, data menunjukkan tren penurunan pH permukaan yang konsisten dengan fenomena pengasaman laut global. Penelitian ini menyimpulkan bahwa dinamika fisik akibat monsun merupakan penggerak utama variabilitas biogeokimia di wilayah tersebut. Penggunaan data *Argo Float* terbukti efektif dalam memantau perubahan kimiawi laut secara kontinyu di wilayah yang sulit dijangkau oleh observasi, memberikan dasar penting bagi pemahaman mitigasi dampak perubahan iklim di perairan Indonesia.

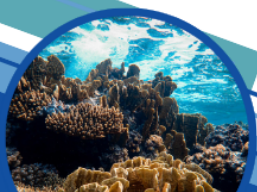
Kata Kunci — Argo Float, Biogeokimia, pH, $p\text{CO}_2$, Pengasaman Laut

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Perairan Selatan Jawa merupakan salah satu wilayah laut tropis yang memiliki dinamika oseanografi yang kompleks dan dipengaruhi secara kuat oleh sistem monsun Asia–Australia (Pattiaratchi & Siji, 2020). Variabilitas musiman yang ditimbulkan oleh pergantian monsun tidak hanya memengaruhi parameter fisik seperti suhu dan arus,

Seminar Nasional Samudra Rafflesia I | 1





tetapi juga berimplikasi signifikan terhadap kondisi biogeokimia perairan, khususnya dalam siklus karbon laut (Fennel *et al.*, 2022). Salah satu fenomena penting yang terjadi di wilayah ini adalah *upwelling* musiman yang umumnya berkembang pada periode musim timur (Juni–Agustus), yang berperan dalam mengangkat massa air dari lapisan dalam menuju permukaan (Nur *et al.*, 2026).

Proses *upwelling* tersebut membawa air laut yang kaya akan nutrisi serta memiliki kandungan karbon dioksida terlarut yang relatif tinggi (Hutchins & Tagliabue, 2024). Kondisi ini menyebabkan terjadinya perubahan keseimbangan sistem karbonat di laut, yang ditandai dengan peningkatan tekanan parsial karbondioksida ($p\text{CO}_2$) dan penurunan nilai pH (Luther, 2023). Hubungan antara pH dan $p\text{CO}_2$ dalam air laut dikontrol oleh sistem karbonat, di mana peningkatan konsentrasi CO_2 akan mendorong pembentukan asam karbonat yang selanjutnya melepaskan ion hidrogen (H^+), sehingga menurunkan pH perairan (Peter *et al.*, 2025). Oleh karena itu, kedua parameter ini sering digunakan sebagai indikator penting dalam kajian pengasaman laut (*ocean acidification*) (Wisudawati & Barke, 2024).

Dalam beberapa dekade terakhir, peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer akibat aktivitas antropogenik telah mempercepat proses pengasaman laut secara global. Fenomena ini berpotensi memberikan dampak serius terhadap ekosistem laut, terutama organisme yang sensitif terhadap perubahan pH seperti karang, moluska, dan plankton kalsifikasi (Martins *et al.*, 2021). Di wilayah perairan Selatan Jawa, dinamika lokal seperti *upwelling* dapat memperkuat atau memodifikasi sinyal pengasaman laut global, sehingga penting untuk memahami variabilitas temporal parameter biogeokimia di wilayah ini (Radjawane *et al.*, 2024).

Pemantauan parameter biogeokimia secara kontinu di laut terbuka masih menjadi tantangan, terutama karena keterbatasan observasi *in situ* yang bersifat sporadis dan mahal. Dalam konteks ini, penggunaan *platform* observasi otomatis seperti *Biogeochemical-Argo* (BGC-Argo) menjadi sangat penting (Baudena *et al.*, 2025). Sistem ini mampu menyediakan data profil vertikal berbagai parameter oseanografi, termasuk pH, secara kontinu dengan cakupan spasial dan temporal yang luas. Data tersebut dapat dimanfaatkan untuk menganalisis variabilitas temporal serta memahami proses-proses yang mengontrol perubahan kondisi kimia laut (Nur *et al.*, 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji variabilitas temporal parameter biogeokimia, khususnya pH dan tekanan parsial karbondioksida ($p\text{CO}_2$), di perairan Selatan Jawa dengan memanfaatkan data BGC-Argo yang tersedia melalui basis data oseanografi global. Analisis ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika sistem karbon





laut di wilayah tersebut, serta kontribusinya terhadap fenomena pengasaman laut dalam skala regional (Jones *et al.*, 2023).

METODE

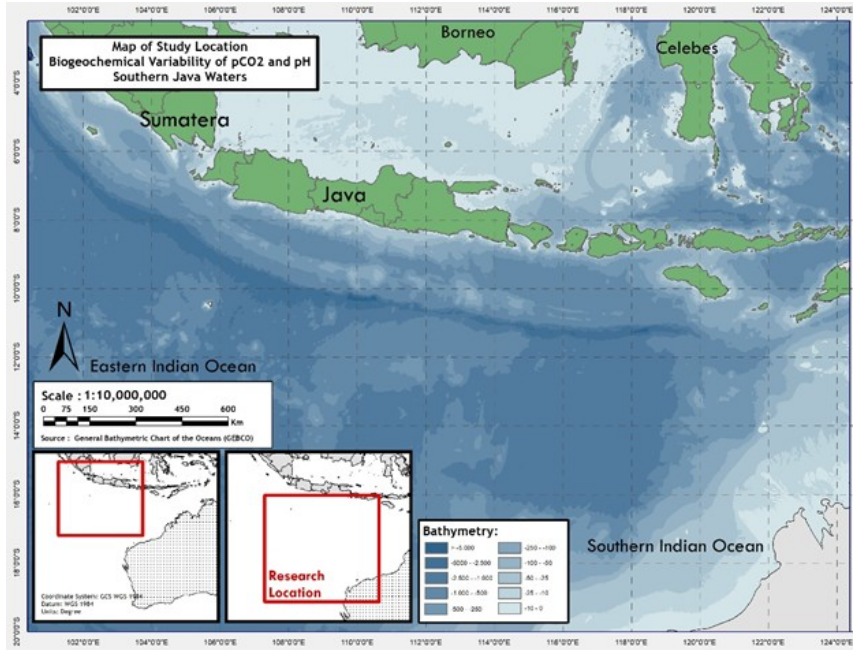
Penelitian ini dilakukan dalam rentang waktu 2010–2025 di wilayah Perairan Selatan Jawa hingga Samudera Hindia, yang secara geografis berada pada kisaran koordinat 8° – 13° LS dan 106° – 114° BT. (**Gambar 1**). Metode penelitian menggunakan pendekatan analisis temporal, spasial, dan deskriptif. Analisis spasial dilakukan melalui pengolahan data sekunder *CTD per-cruise* dan data *Argo float* yang tersebar di wilayah penelitian (Nur & Nurdjaman, 2025). Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari basis data global milik NOAA *National Centers for Environmental Information*, khususnya *World Ocean Database* (WOD), yang mencakup profil *Biogeochemical-Argo* (BGC-Argo) pada wilayah kajian (Alken, Chulliat & Nair, 2021).

Metode penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pengumpulan, pengolahan, dan analisis data. Data yang telah diunduh kemudian di-impor ke dalam ODV untuk dilakukan seleksi wilayah dan rentang waktu sesuai dengan area studi (Schlitzer, 2022). Selanjutnya, dilakukan *quality control* secara visual untuk menghilangkan data yang tidak wajar atau outlier. Analisis dilakukan secara temporal dengan menyusun data dalam bentuk deret waktu (*time series*) untuk mengidentifikasi pola musiman dan kecenderungan jangka panjang. Selain itu, dilakukan analisis hubungan antar parameter dengan pendekatan korelasi sederhana antara pH dan parameter pendukung seperti suhu, oksigen terlarut, dan nutrisi untuk menginterpretasikan pengaruh proses fisik dan biologis terhadap variabilitas pH. Visualisasi data dilakukan dalam bentuk grafik *time series*, profil vertikal, dan diagram sebar (*scatter plot*) untuk memperjelas pola hubungan antar variabel (Lauvset *et al.*, 2020). Seluruh tahapan analisis bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik variabilitas temporal pH serta faktor-faktor yang memengaruhinya di wilayah Perairan Selatan Jawa.

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada rentang waktu 2010–2025 dengan fokus wilayah di Perairan Selatan Jawa hingga bagian dari Samudera Hindia, yang secara geografis berada pada kisaran koordinat ada kisaran 8° – 13° LS dan 106° – 114° BT seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.





Gambar 1. Peta batimetri lokasi penelitian.

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* sebagai alat utama dalam pengolahan dan visualisasi data, dengan bahan berupa data oseanografi dan biogeokimia yang diperoleh dari *NOAA-National Centers for Environmental Information* (Mishonov *et al.*, 2024). Data CTD diperoleh dari hasil survei oseanografi (*cruise*), sedangkan data Argo float diunduh dari database global (<http://argoweb.whoi.edu/>). Argo float muncul ke permukaan umumnya setiap 10 hari dan mentransmisikan data hasil rekaman dari kedalaman 2000 m hingga permukaan (Zilberman *et al.*, 2023).

Prosedur Kerja

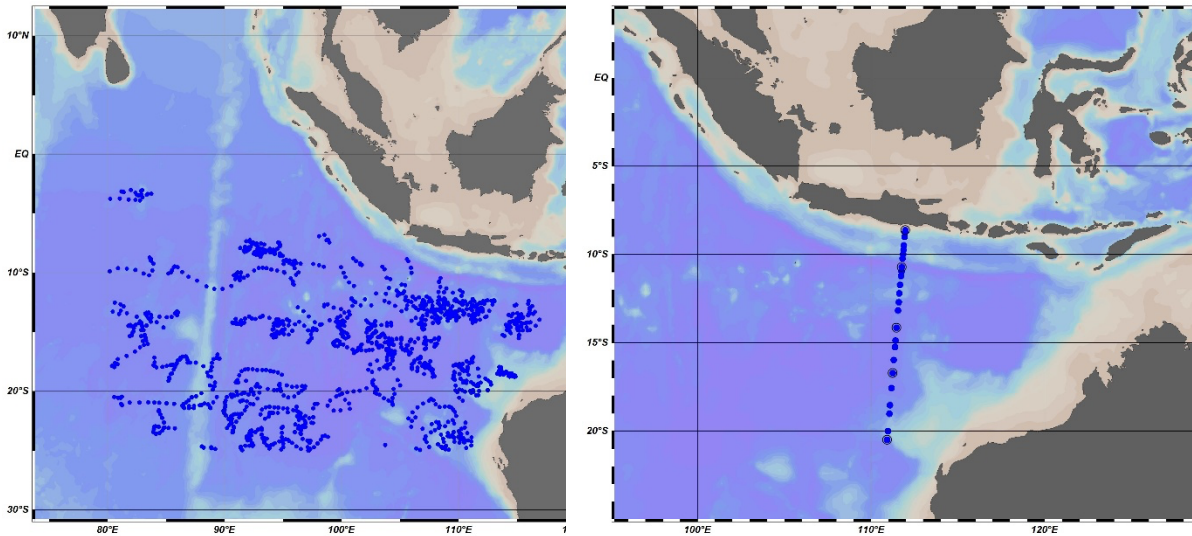
Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data observasi oseanografi dan biogeokimia yang berasal dari *Biogeochemical-Argo* (BGC-Argo) pada periode tahun 2010–2025 di Perairan Selatan Jawa hingga Samudera Hindia (Gambar 2) dengan rentang koordinat 105°–115° BT dan 7°–12° LS. Data Argo float diunduh dari basis data global milik *NOAA National Centers for Environmental Information* dalam format NetCDF (Levitus *et al.*, 2013). *Argo float* secara umum melakukan siklus pengukuran dengan periode sekitar 10 hari, dimulai dari kedalaman hingga ±2000 m dan naik ke permukaan sambil merekam parameter oseanografi (Jayne *et al.*, 2017). Pada penelitian ini, data yang digunakan difokuskan pada lapisan atas perairan hingga kedalaman 2000 m untuk merepresentasikan dinamika



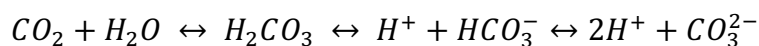


lapisan campuran dan pengaruh proses *upwelling* terhadap parameter biogeokimia (Johan Wahyudi, 2014).



Gambar 2. Titik sampling pH dan pCO₂.

Data yang digunakan meliputi parameter pH sebagai variabel utama, serta parameter pendukung seperti suhu, salinitas, oksigen terlarut, dan nutrisi nitrat dan fosfat, untuk membantu interpretasi proses fisik dan biologis yang memengaruhi sistem karbon laut (Prasetyawan, 2017). Estimasi nilai tekanan parsial karbon dioksida (pCO₂) dilakukan berdasarkan pendekatan kesetimbangan sistem karbonat laut yang melibatkan parameter pH, suhu, dan salinitas. Sistem karbonat dalam air laut mengikuti reaksi kesetimbangan antara karbon dioksida terlarut, asam karbonat, bikarbonat, dan karbonat, yang mengontrol konsentrasi ion hidrogen (H⁺) dan secara langsung memengaruhi nilai pH (Triyulianti *et al.*, 2018).



Hubungan antara pH dan konsentrasi ion hidrogen dinyatakan sebagai:

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

Perhitungan pCO₂ dilakukan dengan menggunakan pendekatan konstanta disosiasi karbonat (K₁ dan K₂) serta konstanta kelarutan CO₂ (K₀) yang bergantung pada suhu dan salinitas (Mehrbach *et al.*, 1973). Metode yang digunakan dalam program CO₂SYN yang secara luas digunakan dalam studi oseanografi kimia untuk mengestimasi parameter sistem karbonat dari data observasi terbatas (Pierrot *et al.*, 2009).

Pengolahan dan analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* untuk menghasilkan visualisasi profil vertikal, diagram sebar, serta analisis deret waktu parameter biogeokimia. Tahapan awal meliputi proses *quality control* secara visual untuk mengidentifikasi dan mengeliminasi data yang tidak valid atau *outlier*.



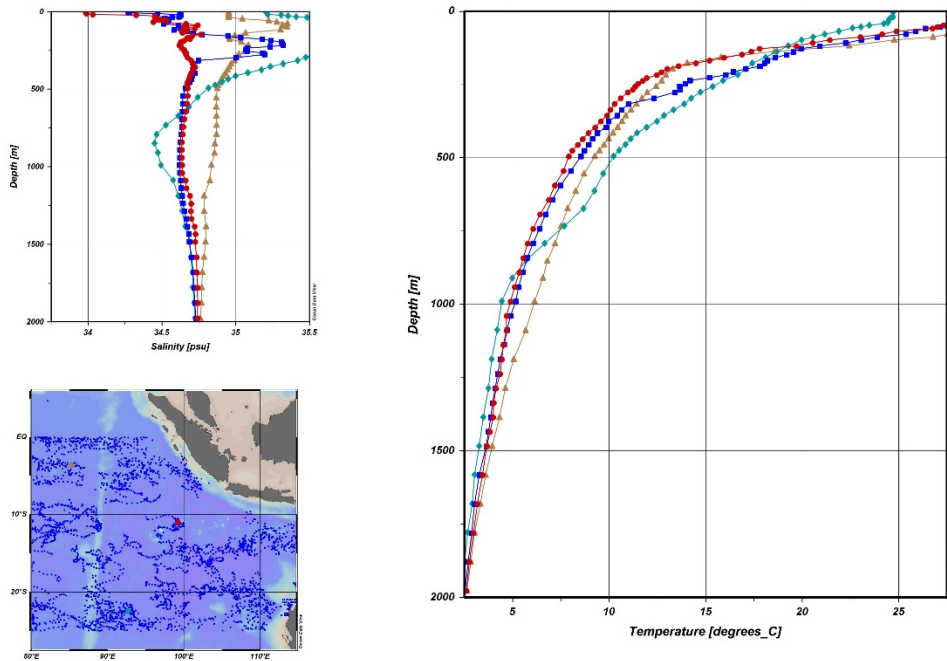


Selanjutnya, dilakukan analisis temporal untuk mengidentifikasi pola musiman dan kecenderungan jangka panjang variabilitas pH dan pCO₂. Selain itu, dilakukan analisis hubungan antar parameter menggunakan pendekatan korelasi sederhana antara pH dengan suhu, oksigen terlarut, dan nutrisi guna menginterpretasikan pengaruh proses fisik seperti *upwelling* dan proses biologis (fotosintesis dan respirasi) terhadap dinamika sistem karbon di wilayah penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Data hasil pengukuran dari Cruise WOD-Japan menggunakan platform MIRAI dengan kedalaman maksimal 2779 meter, Cruise WOD-USA dengan *Cruise Global Ocean Biogeochemistry Array*, GO-BGC untuk menunjukkan profil vertikal suhu dan salinitas hingga kedalaman 2000 meter (**Gambar 3**), lalu untuk menunjukkan profil vertikal dari pCO₂ dan pH dengan platform yang sama.



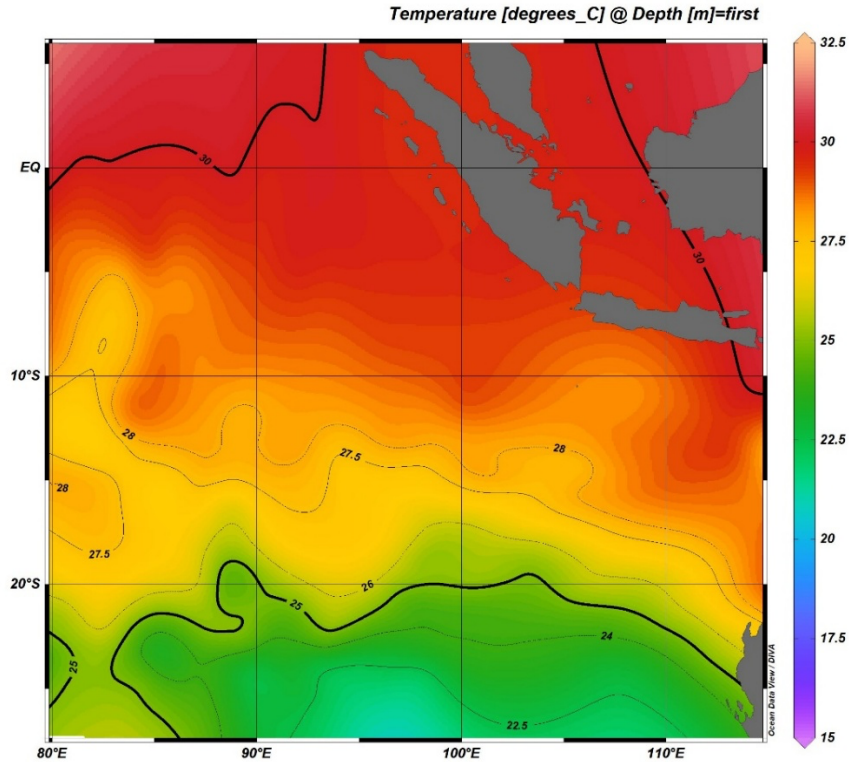
Gambar 3. Data diagram TS (*Temperature-Salinity*) di wilayah penelitian.

Profil vertikal suhu menunjukkan adanya struktur stratifikasi yang jelas dengan lapisan campuran (*mixed layer*) yang relatif hangat di permukaan sekitar 25–28°C, diikuti oleh penurunan suhu yang tajam pada lapisan termoklin. Lapisan termoklin terdeteksi mulai dari kedalaman sekitar 50 m hingga 300 m, di mana terjadi gradien penurunan suhu yang drastis sebelum mencapai kondisi yang lebih stabil di kedalaman menengah,





di bawah 1000 m dengan suhu $< 5^{\circ}\text{C}$. Pola pada **Gambar 4**, mengindikasikan bahwa variabilitas parameter biogeokimia akan sangat bergantung pada dinamika lapisan atas ini, terutama saat terjadi pengangkatan massa air dingin dari kedalaman termoklin menuju permukaan.



Gambar 4. SPL dari lokasi penelitian.

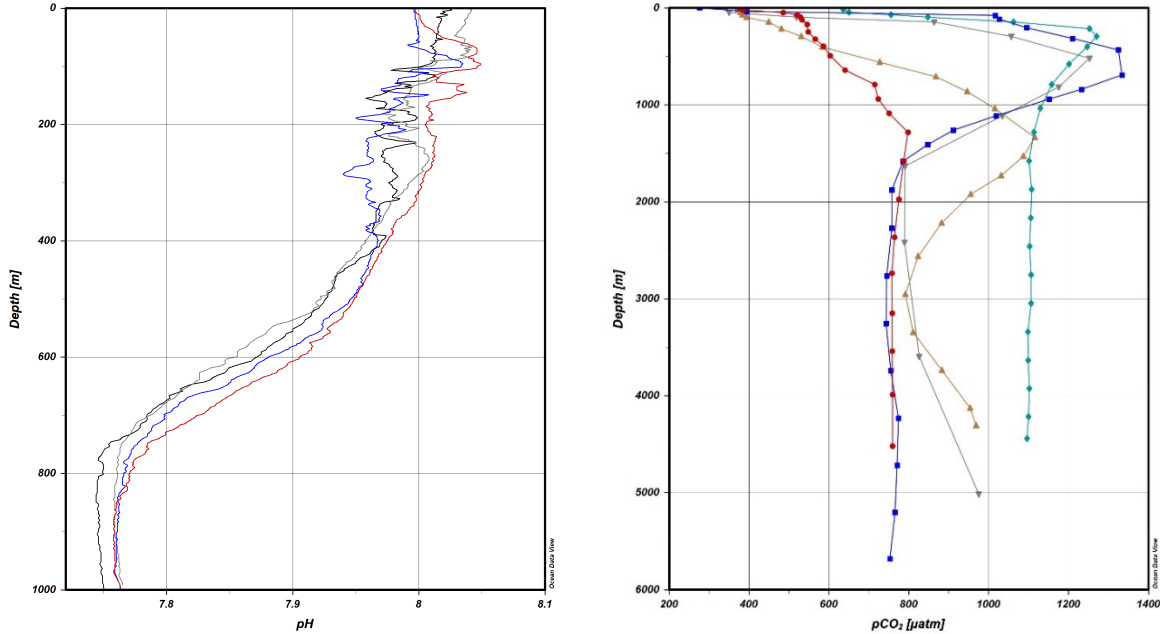
Sementara itu, profil salinitas menunjukkan variabilitas yang lebih kompleks pada lapisan atas (0–200 m) dengan kisaran nilai antara 33.8 hingga 35.2 psu. Terlihat adanya intrusi massa air dengan salinitas yang berbeda, yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh *Indonesian Throughflow* (ITW) atau massa air dari Samudera Hindia. Data mendapatkan salinitas maksimal pada kedalaman tertentu di bawah lapisan campuran mencerminkan karakteristik massa air sub-permukaan yang kaya akan nutrisi. Struktur hidrografi ini menjadi prakondisi penting bagi sistem karbonat; di mana massa air dengan suhu lebih rendah dan salinitas tertentu pada lapisan termoklin umumnya membawa konsentrasi pCO_2 terlarut yang lebih tinggi dan pH yang lebih rendah dibandingkan massa air permukaan.

Suhu 28°C dan 30°C yang meliuk di sepanjang pesisir Selatan Jawa hingga Selat Sunda mengindikasikan adanya pengaruh dinamika arus permukaan dan interaksi darat-laut yang kuat. Konsentrasi suhu yang sangat hangat ($>30^{\circ}\text{C}$) di bagian utara dekat ekuator dan Selat Sunda, berbanding terbalik dengan massa air di selatan yang lebih





dingin. Kondisi suhu permukaan yang tinggi ini berperan krusial dalam mengontrol kelarutan gas CO₂ di permukaan; secara termodinamika, suhu yang lebih hangat akan menurunkan kelarutan CO₂, namun meningkatkan tekanan parsial karbon dioksida pCO₂. Oleh karena itu, variabilitas spasial suhu yang terlihat pada **Gambar 5** ini menjadi kontrol fisik utama terhadap distribusi pH dan pCO₂ yang diamati melalui sensor BGC-Argo Float.



Gambar 5. pH dan pCO₂ di perairan Selatan Jawa.

Berdasarkan pola umum yang konsisten antara profil vertikal dan variabilitas parameter biogeokimia di wilayah selatan Jawa, distribusi pH dan pCO₂ menunjukkan hubungan yang erat dengan struktur massa air yang sebelumnya teridentifikasi melalui diagram T-S. Pada lapisan permukaan hingga kedalaman menengah ($\pm 0-300$ m), nilai pH relatif lebih tinggi dan pCO₂ lebih rendah, yang mencerminkan dominasi massa air hangat dengan salinitas moderat. Lapisan ini umumnya dipengaruhi oleh proses pemanasan permukaan dan aktivitas fotosintesis, yang menyerap CO₂ terlarut sehingga meningkatkan pH. Sebaliknya, pada kedalaman yang lebih besar, terlihat kecenderungan penurunan pH yang diikuti oleh peningkatan pCO₂, yang berkaitan dengan dominasi massa air yang lebih dingin dan lebih tua, sebagaimana terindikasi dalam pola T-S sebagai pergeseran menuju karakteristik air dalam.

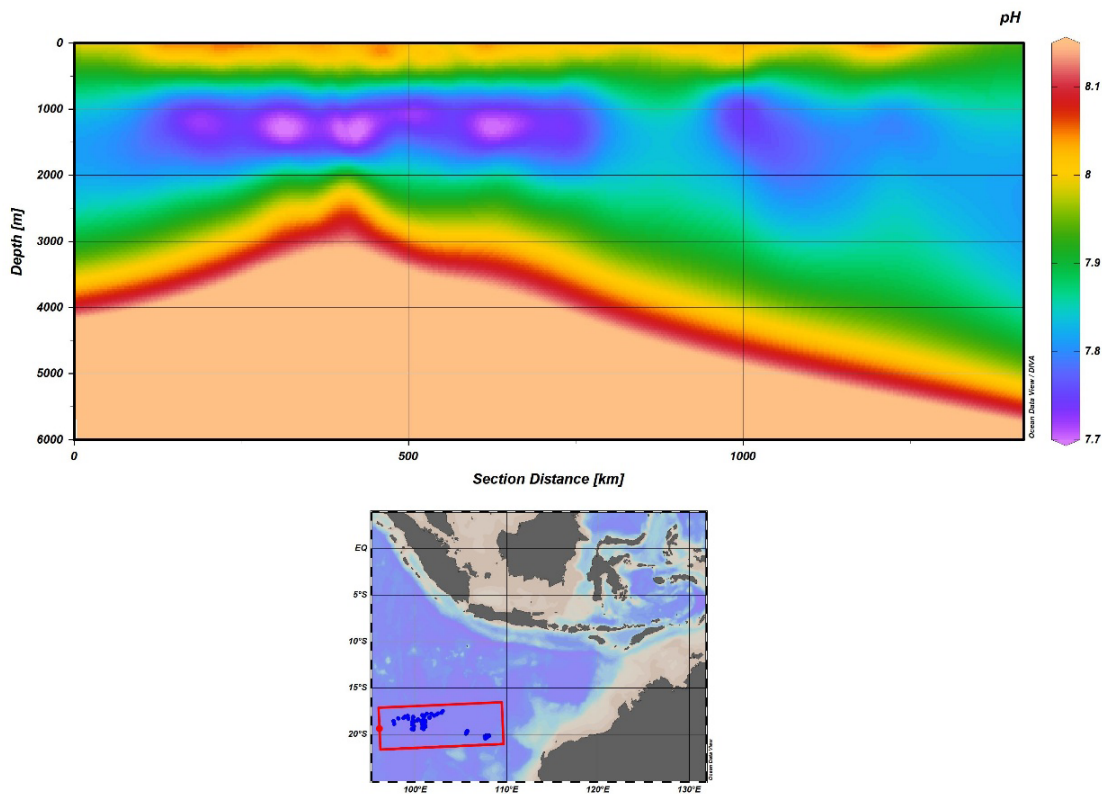
Korelasi antara pH dan pCO₂ dalam profil ini menunjukkan hubungan negatif yang kuat, di mana peningkatan pCO₂ diiringi oleh penurunan pH. Pola ini konsisten dengan mekanisme sistem karbonat laut, di mana peningkatan CO₂ terlarut akan meningkatkan konsentrasi ion hidrogen (H⁺) melalui pembentukan asam karbonat,





sehingga menurunkan pH (Zeebe & Wolf-Gladrow, 2003). Dalam konteks diagram T-S, zona transisi yang menunjukkan perubahan gradien suhu dan salinitas (*thermocline/pycnocline*) juga merupakan zona di mana perubahan pH dan pCO_2 paling signifikan terjadi. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pencampuran vertikal dan stratifikasi memainkan peran penting dalam mengontrol distribusi parameter biogeokimia tersebut.

Selain itu, pengaruh proses *upwelling* yang khas di Perairan Selatan Jawa dapat terlihat di **Gambar 6**, karena selama musim timur turut memperkuat hubungan ini. *Upwelling* membawa massa air dari lapisan dalam yang kaya CO_2 dan memiliki pH lebih rendah ke permukaan, yang kemudian tercermin sebagai anomali pada lapisan atas baik dalam profil pH maupun pCO_2 . Dalam diagram T-S, fenomena ini dapat dikenali sebagai intrusi massa air yang memiliki suhu lebih rendah dan salinitas tertentu ke lapisan permukaan. Kondisi ini menunjukkan keterkaitan langsung antara dinamika fisik *upwelling* dan struktur massa air, dengan respon kimiawi laut, khususnya dalam sistem karbonat.



Gambar 6. Section View dari pH di perairan Selatan Jawa.

Penampang vertikal pH yang ditampilkan memberikan dimensi tambahan yang sangat kuat dalam memahami variabilitas biogeokimia di Perairan Selatan Jawa, khususnya jika dikaitkan dengan struktur massa air dari diagram T-S sebelumnya.





Terlihat bahwa lapisan permukaan hingga sekitar 200–300 m didominasi oleh nilai pH yang relatif tinggi sekitar 8,0–8,1, yang mencerminkan kondisi perairan yang masih kuat dipengaruhi oleh interaksi dengan atmosfer dan aktivitas fotosintesis. Namun, memasuki kedalaman menengah ±500–1500 m, terjadi penurunan pH yang cukup signifikan menjadi 7,7–7,9, membentuk zona minimum pH yang konsisten sepanjang penampang. Zona ini sangat berasosiasi dengan lapisan termoklin/pyknoklin yang sebelumnya teridentifikasi pada diagram T–S sebagai zona transisi massa air, di mana gradien suhu dan densitas meningkat tajam.

Selain itu, variasi horizontal sepanjang penampang (*section distance*) menunjukkan adanya fluktuasi lokal, terutama pada jarak sekitar 300–600 km, yang bertepatan dengan perubahan topografi dasar laut ditunjukkan oleh shoaling batimetri. Di area ini, terlihat intrusi nilai pH yang lebih tinggi ke kedalaman yang lebih dangkal, yang dapat diinterpretasikan sebagai indikasi pengaruh dinamika lokal seperti upwelling atau pencampuran vertikal yang diperkuat oleh topografi. Hal ini konsisten dengan karakteristik wilayah selatan Jawa yang memiliki lereng kontinen curam dan dikenal sebagai zona *upwelling* musiman. Integrasi antara penampang pH, diagram T–S, dan kondisi batimetri ini memperkuat interpretasi bahwa variabilitas pH di wilayah penelitian merupakan hasil interaksi kompleks antara proses fisik dari stratifikasi, upwelling, dan sirkulasi menjadi proses biogeokimia internal seperti respirasi dan produksi primer (Millero, 2007).

Pembahasan

Secara keseluruhan, integrasi antara analisis diagram T–S dan distribusi pH serta $p\text{CO}_2$ memperlihatkan bahwa variabilitas biogeokimia di wilayah ini tidak berdiri sendiri, melainkan sangat dipengaruhi oleh karakteristik massa air dan proses oseanografi yang mendasarinya. Pendekatan ini memperkuat interpretasi bahwa perubahan pH dan $p\text{CO}_2$ tidak hanya dikontrol oleh reaksi kimia, tetapi juga oleh dinamika fisik seperti stratifikasi, pencampuran, dan sirkulasi regional. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menekankan pentingnya interaksi antara proses fisik dan kimia dalam mengontrol sistem karbon laut di wilayah tropis (Feely et al., 2001).

Variabilitas pH di Perairan Selatan Jawa pada periode 2010–2025 menunjukkan pola vertikal yang konsisten dengan struktur kolom air tropis, yaitu nilai pH relatif tinggi pada lapisan permukaan (± 0 –300 m), menurun pada kedalaman menengah (± 500 –1500 m), dan sedikit meningkat kembali pada lapisan laut dalam. Pola ini mencerminkan keseimbangan antara proses fisik dan biogeokimia di laut, di mana lapisan permukaan masih dipengaruhi oleh interaksi atmosfer–laut dan aktivitas fotosintesis, sedangkan lapisan menengah didominasi oleh proses respirasi dan dekomposisi bahan organik.





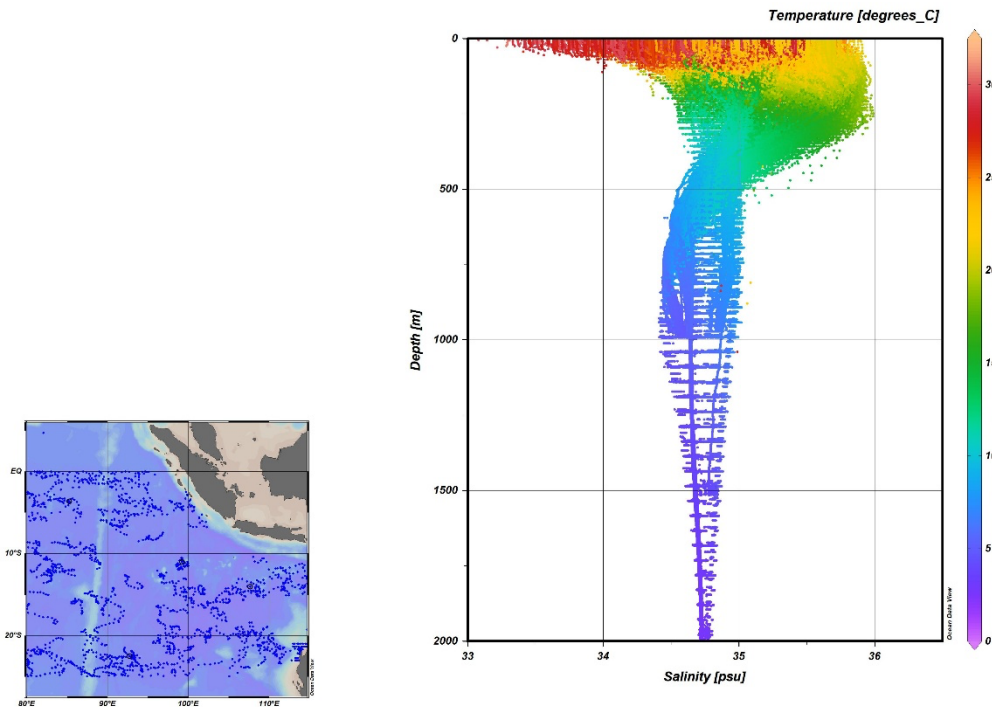
Penurunan pH pada kedalaman menengah menunjukkan peningkatan konsentrasi CO₂ terlarut yang berasal dari remineralisasi material organik, yang kemudian meningkatkan konsentrasi ion hidrogen (H⁺) dalam air laut.

Tabel 1. Rentang nilai parameter oseanografi dan biogeokimia.

Parameter	Kedalaman (m)	Minimu m	Maksimu m	Satuan	Longitude (°BT)	Latitude (°LS)
pH	0-300	8.00	8.10	-	106-114	8-13
pH	500-1500	7.70	7.90	-	106-114	8-13
pH	>2000	7.80	8.00	-	106-114	8-13
pCO ₂	0-300	300	380	µatm	106-114	8-13
pCO ₂	500-1500	400	600	µatm	106-114	8-13
Suhu	0-300	25	28	°C	106-114	8-13
Suhu	500-1500	5	15	°C	106-114	8-13
Salinitas	0-2000	34.0	35.5	PSU	106-114	8-13
Oksigen	0-300	180	250	µmol/kg	106-114	8-13
Oksigen	500-1000	50	120	µmol/kg	106-114	8-13
Nitrat	0-300	0	5	µmol/kg	106-114	8-13
Nitrat	>500	10	40	µmol/kg	106-114	8-13
Fosfat	0-300	0.1	0.5	µmol/kg	106-114	8-13
Fosfat	>500	0.5	3.0	µmol/kg	106-114	8-13

Hubungan antara pH dan pCO₂ dalam penelitian ini menunjukkan pola korelasi negatif yang kuat seperti dalam **Tabel 1**, di mana peningkatan pCO₂ diikuti oleh penurunan pH. Pola ini sesuai dengan mekanisme sistem karbonat laut, di mana CO₂ yang terlarut akan bereaksi membentuk asam karbonat dan melepaskan ion H⁺, sehingga menurunkan pH (Zeebe & Wolf-Gladrow, 2003; Millero, 2007). Secara vertikal, seperti yang terlihat di **Gambar 7** menunjukkan nilai pCO₂ yang rendah di permukaan berkaitan dengan proses penyerapan CO₂ oleh fitoplankton, sedangkan peningkatan pCO₂ pada kedalaman menengah menunjukkan akumulasi hasil respirasi. Dengan demikian, distribusi pH dan pCO₂ tidak hanya mencerminkan kondisi kimia, tetapi juga aktivitas biologis yang berlangsung di dalam kolom air.

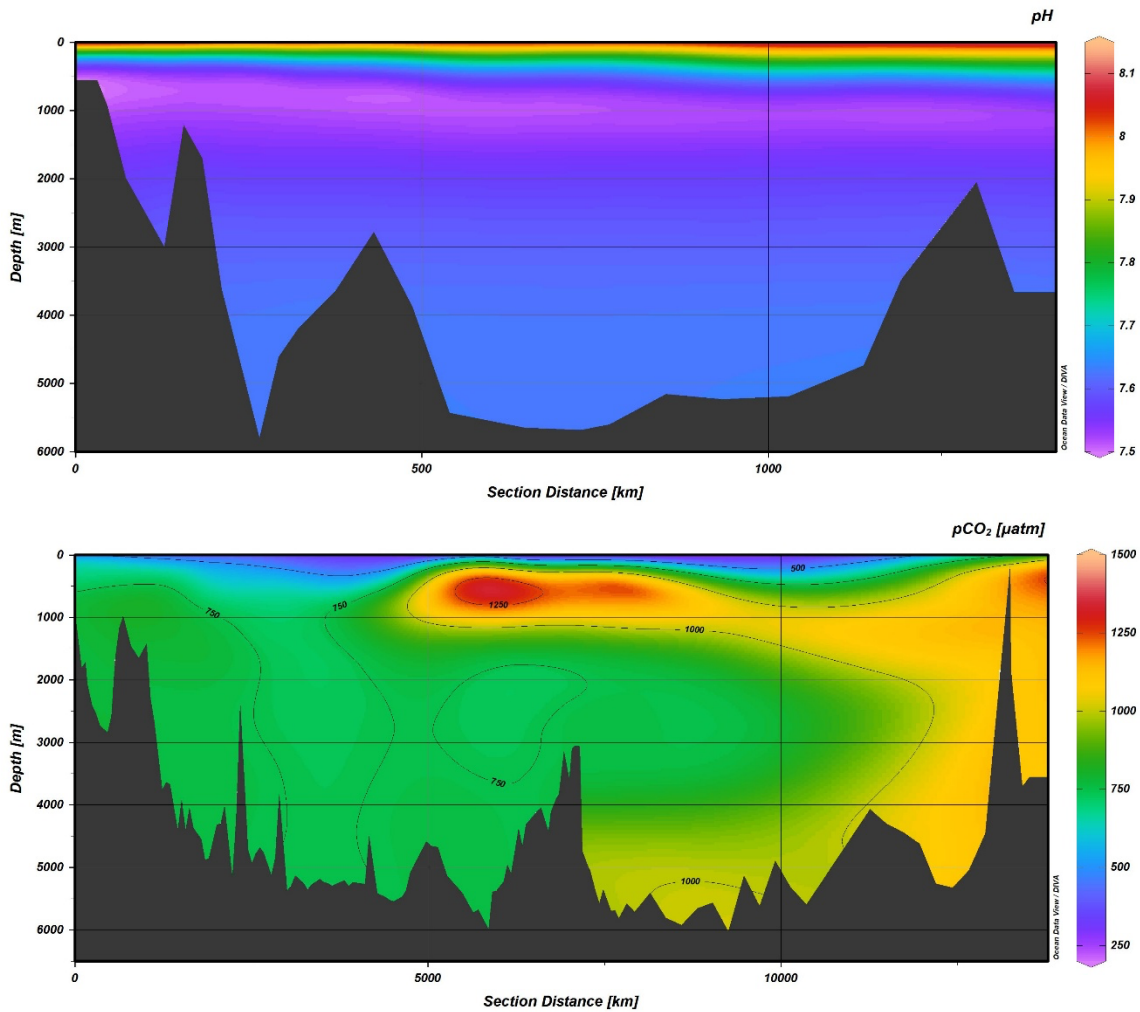




Gambar 7. Scatter Plot dari Titik Sampel

Jika dikaitkan dengan diagram T-S, distribusi pH dan pCO_2 sangat erat hubungannya dengan karakteristik massa air. Lapisan permukaan yang memiliki suhu tinggi dan salinitas relatif homogen menunjukkan kondisi pH tinggi dan pCO_2 rendah, sedangkan zona termoklin/pyknoklin yang ditandai oleh perubahan suhu dan densitas yang tajam merupakan zona transisi di mana terjadi penurunan pH dan peningkatan pCO_2 secara signifikan. Massa air pada lapisan ini cenderung lebih stabil dan memiliki waktu tinggal yang lebih lama, sehingga memungkinkan terjadinya akumulasi CO_2 hasil respirasi. Sementara itu, lapisan laut dalam yang lebih homogen menunjukkan kecenderungan peningkatan kembali pH, yang berkaitan dengan karakteristik massa air dalam yang berasal dari sirkulasi samudera global.

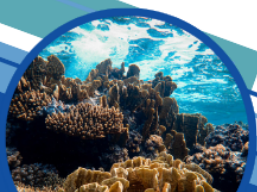
Variabilitas horizontal yang teridentifikasi pada penampang pH menunjukkan adanya pengaruh topografi dasar laut dan dinamika lokal, khususnya di wilayah dengan lereng kontinen yang curam. Pada beberapa bagian penampang, terlihat intrusi nilai pH yang lebih tinggi ke kedalaman yang lebih dangkal, yang mengindikasikan adanya proses pencampuran vertikal atau pengangkatan massa air. Kondisi ini sangat relevan dengan karakteristik Perairan Selatan Jawa yang dikenal sebagai wilayah upwelling musiman, di mana interaksi antara angin monsun dan topografi laut mendorong naiknya massa air dari lapisan dalam ke permukaan (**Gambar 8**).



Gambar 8. Section View dari pH dan pCO₂.

Fenomena *upwelling* pada musim timur (Juni–Agustus) berperan penting dalam mengontrol variabilitas pH dan pCO₂ di wilayah ini. Proses ini membawa massa air dingin yang kaya nutrisi dan memiliki konsentrasi CO₂ tinggi dari lapisan dalam ke permukaan, yang menyebabkan peningkatan pCO₂ dan penurunan pH pada lapisan atas. Hal ini juga menjelaskan mengapa pada periode tertentu nilai pH permukaan dapat menurun meskipun secara umum permukaan memiliki pH yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada musim barat (Desember–Februari), kondisi perairan cenderung lebih stabil dengan stratifikasi yang lebih kuat, sehingga nilai pH relatif lebih tinggi dan pCO₂ lebih rendah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variabilitas pH dan pCO₂ di Perairan Selatan Jawa merupakan hasil interaksi kompleks antara proses fisik, kimia, dan biologis. Struktur massa air yang teridentifikasi melalui diagram T–S, distribusi vertikal parameter biogeokimia, serta pengaruh dinamika musiman seperti *upwelling*, semuanya berkontribusi dalam membentuk karakteristik sistem karbon laut





di wilayah ini. Temuan ini menegaskan bahwa perubahan pH laut tidak dapat dipisahkan dari dinamika oseanografi regional, serta memberikan indikasi adanya kecenderungan pengasaman laut yang perlu mendapat perhatian lebih lanjut dalam konteks perubahan iklim global (Feely et al., 2001).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data *Biogeochemical-Argo* periode 2010–2025 di Perairan Selatan Jawa 106° – 114° BT dan 8° – 13° LS, variabilitas parameter biogeokimia menunjukkan pola yang kuat baik secara vertikal maupun temporal. Distribusi pH memperlihatkan nilai yang relatif tinggi pada lapisan permukaan, menurun secara signifikan pada kedalaman menengah ± 500 – 1500 m, dan kembali meningkat pada lapisan laut dalam. Pola ini mencerminkan dominasi proses fotosintesis di permukaan serta respirasi dan dekomposisi bahan organik di lapisan menengah yang menghasilkan akumulasi CO_2 terlarut. Hubungan antara pH dan tekanan parsial karbondioksida (pCO_2) menunjukkan korelasi negatif yang konsisten, di mana peningkatan pCO_2 diikuti oleh penurunan pH. Hal ini menegaskan peran sistem karbonat laut sebagai pengontrol utama keseimbangan kimia perairan. Distribusi kedua parameter tersebut juga sangat dipengaruhi oleh struktur massa air yang teridentifikasi melalui diagram T-S, di mana zona termoklin menjadi lapisan transisi penting yang mengontrol perubahan sifat fisik dan kimia perairan. Variabilitas spasial dan temporal yang teramati tidak terlepas dari pengaruh dinamika oseanografi regional, khususnya fenomena *upwelling* musiman di Perairan Selatan Jawa. Selama musim timur, proses *upwelling* membawa massa air dingin yang kaya CO_2 dan nutrisi ke permukaan, sehingga menyebabkan peningkatan pCO_2 dan penurunan pH. Sebaliknya, pada musim barat, kondisi perairan yang lebih stabil menyebabkan nilai pH relatif lebih tinggi. Selain itu, kondisi batimetri yang curam turut memperkuat proses pencampuran vertikal dan distribusi massa air. Secara keseluruhan, variabilitas pH dan pCO_2 di wilayah penelitian merupakan hasil interaksi kompleks antara proses fisik (stratifikasi dan *upwelling*), proses kimia (sistem karbonat), serta proses biologis (fotosintesis dan respirasi). Temuan ini juga mengindikasikan adanya kecenderungan pengasaman laut secara gradual, yang berpotensi memberikan dampak terhadap ekosistem laut di masa depan. Oleh karena itu, pemanfaatan data observasi jangka panjang seperti BGC-Argo menjadi sangat penting dalam memantau perubahan kondisi kimia laut secara berkelanjutan di wilayah Perairan Selatan Jawa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada NOAA National Centers for Environmental Information dan Argo Program atas penyediaan data yang digunakan



dalam penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penelitian dan penyusunan naskah.

DAFTAR PUSTAKA

- Alken, P., Chulliat, A., & Nair, M. 2021. NOAA/NCEI and University of Colorado Candidate Models for IGRF-13. *Earth, Planets and Space*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01313-z>
- Baudena, A., Riom, W., Taillandier, V., Mayot, N., Mignot, A., & D'Ortenzio, F. 2025. Comparing Satellite and BGC-Argo Chlorophyll Estimation: A Phenological Study. *Remote Sensing of Environment*, 326: 114743. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2025.114743>.
- Feely, R. A., Sabine, C. L., & Wanninkhof, R. 2001. Uptake and Storage of Carbon Dioxide in The Ocean: The Global CO₂ Survey. *Joint Global Ocean Flux Study*, 14. <http://cdiac.esd.ornl.gov/home.html>.
- Fennel, K., Mattern, J. P., Doney, S. C., Bopp, L., Moore, A. M., Wang, B., & Yu, L. 2022. Ocean Biogeochemical Modelling. *Nature Reviews Methods Primers*, 2(1): 76. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00154-2>.
- Hutchins, D. A., & Tagliabue, A. 2024. Feedbacks between Phytoplankton and Nutrient Cycles in A Warming Ocean. *Nature Geoscience*, 17(6): 495–502. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01454-w>.
- Jayne, S. R., Roemmich, D., Zilberman, N., Riser, S. C., Johnson, K. S., Johnson, G. C., & Piotrowicz, S. R. 2017. *The Argo Program: Present and Future*. 30(2): 18–28. <https://doi.org/10.2307/26201840>.
- Johan Wahyudi, an. 2014. Trends and Future Projections for Marine Biogeochemistry Research in Indonesia. 19(3): 121–130. <http://apps>.
- Jones, E. M., Chierici, M., Fransson, A., Assmann, K. M., Renner, A. H. H., & Hodal Lødemel, H. 2023. Inorganic Carbon and Nutrient Dynamics in The Marginal Ice Zone of The Barents Sea: Seasonality and Implications for Ocean Acidification. *Progress in Oceanography*, 219: 103131. <https://doi.org/10.1016/J.POCEAN.2023.103131>
- Lauvset, S. K., Carter, B. R., Perez, F. F., Jiang, L. Q., Feely, R. A., Velo, A., & Olsen, A. 2020. Processes Driving Global Interior Ocean pH Distribution. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(1). <https://doi.org/10.1029/2019GB006229>.
- Levitus, S., Antonov, J. I., Baranova, O. K., Boyer, T. P., Coleman, C. L., Garcia, E., Grodsky, A. I., Johnson, D. R., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Reagan, J. R., Sazama, C. L., Seidov, D., Smolyar, I., Yarosh, E. S., & Zweng, M. M. 2013. *The World Ocean Database*. <http://www.nodc.noaa.gov/>.
- Luther, G. W. 2023. Review on The Physical Chemistry of Iodine Transformations in The Oceans. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1085618>.

- Martins, M., Carreiro-Silva, M., Martins, G. M., Barcelos e Ramos, J., Viveiros, F., Couto, R. P., Parra, H., Monteiro, J., Gallo, F., Silva, C., Teodósio, A., Guilini, K., Hall-Spencer, J. M., Leitão, F., Chicharo, L., & Range, P. 2021. *Ervilia castanea* (Mollusca, Bivalvia) Populations Adversely Affected at CO₂ Seeps in The North Atlantic. *Science of The Total Environment*, 754: 142044. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142044>.
- Mehrbach, C., Culbertson, C. H., Hawley, J. E., & Pytkowicz, R. M. 1973. *Measurement of The Apparent Dissociation Constants of Carbonic Acid in Seawater at Atmospheric Pressure*.
- Millero, F. J. 2007. *The Marine Inorganic Carbon Cycle*. *Chemical Reviews*, 107(2): 308–341. <https://doi.org/10.1021/cro503557>.
- Mishonov, A. V, Boyer, T. P., Baranova, O. K., Bouchard, C. N., Cross, S. L., Garcia, H. E., Locarnini, R. A., Paver, C. R., Reagan, J. R., Wang, Z., Seidov, D., Grodsky, A. I., Beauchamp, J. G., Raimondo, G. M., Spinrad, R. W., Volz, S., & Administrator, A. 2024. *NOAA Atlas NESDIS 97 World Ocean Database 2023*. <https://doi.org/10.25923/z885-h264>.
- Nur, S., Dono Wilopo, M., Astini, L., & Fuji Astuti, A. 2026. Variabilitas *Mixed Layer Depth* dan Karakteristik Massa Air di Perairan Barat Sumatera Berdasarkan Data CTD dan *Argo Float* Tahun 2010-2024. In *Jurnal Geosains Kutai Basin* (Vol. 9).
- Nur, S., & Nurdjaman, S. 2025. *Temporal Assessment of Seagrass Degradation on Singkep and Lingga Islands, Riau Islands Province, Indonesia (2016-2020)*. *Coastal and Ocean Journal*, 9(1): 20–33. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/coj/article/view/61813>.
- Nur, S., Nurdjaman, S., Dika Praba P Cahya, B., & Haidar Dzar Al-Ghifari, K. 2021. Integrating Sentinel-2 Spectral-Imagery and Field Data of Seagrass Coverage With Species Identification in The Coastal of Riau Islands, Indonesia. *Borneo Journal of Marine Science and Aquaculture (BJoMSA)*, 5(2): 78–82. <https://doi.org/10.51200/bjomsa.v5i2.2710>.
- Pattiaratchi, C. B., & Siji, P. 2020. *Variability in Ocean Currents around Australia State and Trends of Australia's Oceans Report Key Data Streams 1.4 State and Trends of Australia's Ocean Report www.imosoceanreport.org.au Time-Series published Satellite Remote Sensing*. <https://doi.org/10.26198/5e16a2ae49e76>.
- Peter, R., Kuttippurath, J., Sunanda, N., & Chakraborty, K. 2025. Effect of Thermal and Non-Thermal Processes on The Variability of Ocean Surface pCO₂ and Buffering Capacity in The North Indian Ocean. *Progress in Oceanography*, 233: 103442. <https://doi.org/10.1016/J.POCEAN.2025.103442>.
- Pierrot, D., Neill, C., Sullivan, K., Castle, R., Wanninkhof, R., Lüger, H., Johannessen, T., Olsen, A., Feely, R. A., & Cosca, C. E. 2009. *Recommendations for Autonomous Underway pCO₂ Measuring Systems and Data-Reduction Routines*. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8–10): 512–522. <https://doi.org/10.1016/J.DSR2.2008.12.005>.

- Prasetyawan, I. B., Maslukah, L., & Rifai, A. 2017. Pengukuran Sistem Karbon Dioksida (CO₂) sebagai Data Dasar Penentuan Fluks Karbon di Perairan Jepara. *Buletin Oseanografi Marina*, 6(1): 9–16. <https://doi.org/10.14710/BULOMA.V6I1.15736>.
- Radjawane, I. M., Yusarita, A., Tisiana, A. R., Kuswardani, D., Napitupulu, G., Keahlian, K., Lingkungan, O., Terapan, D., Kebumian, T., Besar, B., Sosial, R., Kelautan, E., Perikanan, D., Kelautan, K., & Putih, J. P. 2024. Pengaruh Sirkulasi Arus Geostropik dan Ageostropik terhadap *Upwelling* di Perairan Selatan Jawa. *Buletin Oseanografi Marina Oktober*, 13: 448–463. <https://doi.org/10.14710/buloma.v13i3.62368>.
- Schlitzer, R. 2022. *Ocean Data View User's Guide Version 5.6.2*. <https://odv.awi.de>.
- Triyulianti, I., Nyoman Radiarta, I., Yunanto, A., Arinda Pradisty Fikrul Islamy, N., & Putri Balai Riset dan Observasi Laut, M. R. 2018. Sistem Karbon Laut di Perairan Laut Maluku dan Laut Sulawesi. <http://jfmr.ub.ac.id>.
- Wisudawati, A. W., & Barke, H. D. 2024. *Systems Thinking Approach to Understand Indonesia's Ocean Acidification*. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37: 101384. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2023.101384>.
- Zeebe, R. E., & Wolf-Gladrow, D. 2003. *CO₂ In Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes* (65th ed.). 'Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research.
- Zilberman, N. V., Thierry, V., King, B., Alford, M., André, X., Balem, K., Briggs, N., Chen, Z., Cabanes, C., Coppola, L., Dall'Olmo, G., Desbruyères, D., Fernandez, D., Foppert, A., Gardner, W., Gasparin, F., Hally, B., Hosoda, S., Johnson, G. C., van Wijk, E. M. 2023. *Observing The Full Ocean Volume using Deep Argo Floats*. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 10). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1287867>.