

DINAMIKA SISTEM KARBONAT LAUT DI KEPULAUAN INDONESIA

AFDAL



**PROGRAM DOKTOR ILMU KELAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Dinamika Sistem Karbonat Laut di Kepulauan Indonesia” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2024

Afdal

C561190132

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

RINGKASAN

AFDAL. Dinamika Sistem Karbonat Laut di Kepulauan Indonesia. Dibimbing oleh DIETRICH G. BENGEN, ALAN F. KOROPITAN, A'AN JOHAN WAHYUDI dan RASTINA.

Penyerapan karbondioksida (CO_2) oleh laut akibat peningkatan konsentrasi CO_2 atmosfer diketahui menyebabkan terjadinya perubahan kimiawi air laut yaitu peningkatan total CO_2 , bikarbonat (HCO_3^-), dan ion H^+ , dan menurunkan konsentrasi karbonat (CO_3^{2-}) dan pH, yang disebut sebagai pengasaman laut. Hal ini menimbulkan ancaman yang signifikan terhadap ekosistem pesisir, organisme laut dan jutaan orang yang bergantung pada perlindungan pesisir, perikanan, dan budidaya perairan. Dampak pengasaman laut terhadap perairan pesisir Indonesia, dan respons ekosistem pesisir seperti terumbu karang dan lamun terhadap pertukaran CO_2 laut-udara di Kepulauan Indonesia, masih belum diketahui. Wilayah Indonesia yang luas dan terdiri dari banyak pulau yang dikelilingi oleh kedalaman laut yang bervariasi mengakibatkan kondisi hidro oseanografi yang dinamis di perairan pesisir dan laut baik secara spasial maupun temporal. Keanekaragaman ini memainkan peran penting dalam menentukan kerentanan ekosistem pesisir terhadap pengasaman laut. Penelitian ini bertujuan untuk: 1) mengestimasi saturasi aragonit (Ω_{arag}) dan mengkaji variasi spatio-temporalnya di perairan pesisir Kepulauan Indonesia; 2) mengidentifikasi proses kalsifikasi dan nilai Produktivitas Ekosistem Bersih padang lamun dan terumbu karang, serta mengkaji hubungannya dengan pertukaran CO_2 laut-udara; dan 3) mengkaji pengaruh antropogenik terhadap dampak pengasaman laut di perairan wilayah pesisir Kepulauan Indonesia.

Pengambilan sampel air laut dan pengukuran *in-situ* untuk kajian spasial dilakukan pada tujuh lokasi perairan pesisir Kepulauan Indonesia (Weh, Pulo Aceh, Pari, Lombok, Selayar, Flores dan Sorong Papua) dalam rentang waktu 2015 dan 2021. Kajian temporal difokuskan di perairan sekitar ekosistem lamun dan terumbu karang Teluk Sire Lombok pada bulan April dan Oktober 2018 dengan pengamatan 2 x 24 jam, sedangkan kajian pengaruh antropogenik difokuskan di perairan pesisir Pulau Pari dan Lombok masing-masing pada bulan Februari dan Maret 2021 dengan pengamatan 1 x 24 jam. Parameter yang diukur terdiri dari parameter fisika kimia perairan yaitu suhu, salinitas, oksigen terlarut (DO), fosfat, nitrat, silikat, dan klorofil-*a*, serta system karbonat laut yaitu pH, alkalinitas total (TA), karbon anorganik terlarut (DIC), tekanan parsial CO_2 ($p\text{CO}_2$), dan saturasi aragonit (Ω_{arag}). Parameter fisikokimia perairan seperti suhu, salinitas, dan DO diukur dengan menggunakan alat *Conductivity Temperature Depth* SeaBird Electronic (CTD SBE) 19plus dan DO meter Hanna HI 9146. Keasaman air laut (pH) diukur dengan pH meter Portabel Mettler Toledo Single Chanel dan secara spektrofotometri menggunakan indikator pewarna m-cresol purple (mCP) dan spektrofotometer Shimadzu UV-1800. Pengukuran $p\text{CO}_2$ air laut menggunakan sensor Mini CO_2 Pro Oceanus dan program CO_2SYS . Alkalinitas total dianalisis dengan metode titrasi dan menggunakan alat alkalinity titrator. Konsentrasi karbon anorganik terlarut dan kondisi saturasi aragonite dihitung dengan menggunakan program CO_2SYS . Produksi ekosistem bersih (NEP) dihitung berdasarkan perubahan konsentrasi DIC, sedangkan kalsifikasi ekosistem bersih (NEC) dihitung berdasarkan perubahan TA.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hasil penelitian menunjukkan bahwa perairan pesisir Kepulauan Indonesia umumnya mengalami kejenuhan kalsium karbonat, ditandai dengan nilai Ω_{rag} yang lebih besar dari satu. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar perairan pesisir Kepulauan Indonesia mendukung proses kalsifikasi. Secara spasial, perairan pesisir di bagian timur Indonesia, terutama di Pulau Selayar dan Flores, memiliki nilai Ω_{rag} yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah lainnya, berkisar antara 3,75 hingga 5,87 dengan rata-rata $4,96 \pm 0,48$. Sebaliknya, perairan pesisir Pulau Pari menunjukkan nilai Ω_{rag} yang paling rendah, berkisar antara 1,57–3,30 dengan rata-rata $2,49 \pm 0,50$. Rendahnya saturasi aragonite di perairan pesisir pulau Pari disebabkan oleh dominasi perairan dengan salinitas rendah dan kedalaman dangkal di bagian barat Indonesia. Analisis multivariat menunjukkan bahwa salinitas memiliki pengaruh paling besar terhadap Ω_{rag} di sebagian besar lokasi, dengan persentase pengaruh berkisar antara 24,13 hingga 52,92%. Hasil analisis PCA menunjukkan bahwa selain salinitas, saturasi aragonit di perairan pesisir Kepulauan Indonesia juga berkaitan erat ($p < 0,05$) dengan suhu permukaan laut, sistem karbonat air laut, PO_4 , dan klorofil a. Keadaan saturasi aragonit berkorelasi positif dengan pH, salinitas, dan TA serta berkorelasi negatif dengan $p\text{CO}_2$, DIC, suhu permukaan laut, PO_4 , dan klorofil.

Secara temporal, sistem karbonat laut menunjukkan variasi yang signifikan, dengan hampir semua parameter menunjukkan perbedaan yang mencolok ($p < 0,05$) antara bulan April dan Oktober. Saturasi aragonit (Ω_{rag}) lebih tinggi pada bulan April ($4,75 \pm 0,75$ pada ekosistem lamun dan $4,25 \pm 0,63$ pada ekosistem terumbu karang) dibandingkan pada bulan Oktober ($3,61 \pm 0,28$ pada ekosistem lamun dan $3,34 \pm 0,19$ pada ekosistem terumbu karang). Temuan ini juga menunjukkan bahwa Ω_{rag} cenderung meningkat seiring dengan peningkatan NEP, dimana ekosistem lamun memiliki dampak yang lebih besar dalam memodifikasi dinamika kimia karbonat di perairan dangkal dibandingkan ekosistem terumbu karang. Namun, tingginya tingkat NEP di ekosistem lamun dan terumbu karang pada siang hari tidak cukup untuk mencegah pelepasan CO_2 ke atmosfer selama 24 jam.

Dampak antropogenik terhadap pengasaman laut di perairan pesisir Pulau Pari sangat jelas terlihat, dengan nilai pH berkisar antara 7,60 hingga 8,00 dan tingkat Ω_{rag} antara 1,04 hingga 2,54. Nilai rata-rata Ω_{rag} di perairan Pulau Pari berada di bawah kisaran optimal bagi pertumbuhan terumbu karang tropis. Rendahnya pH dan Ω_{rag} ini dipengaruhi oleh penurunan suhu dan salinitas, serta terbatasnya kapasitas ekosistem bentik untuk menurunkan kadar CO_2 . Perbedaan yang signifikan dalam parameter sistem karbonat diamati antara wilayah pesisir Teluk Sire, Lombok, dan Pulau Pari ($p < 0,05$). Teluk Sire dicirikan oleh pH, TA, dan Ω_{rag} yang lebih tinggi, sedangkan pesisir Pulau Pari menunjukkan tekanan parsial CO_2 ($p\text{CO}_2$) yang tinggi, yang menyebabkan emisi CO_2 terus menerus selama periode pengamatan. Fluks CO_2 paling tinggi terjadi pada malam hari di ekosistem lamun akibat respirasi.

Kata kunci: CO_2 , pengasaman laut, Ω_{rag} , NEP, NEC, Kepulauan Indonesia

SUMMARY

AFDAL. Dynamics of Marine Carbonate Systems in Indonesia's Archipelago. Supervised by DIETRICH G. BENGEN, ALAN F. KOROPITAN, A'AN JOHAN WAHYUDI and RASTINA.

The sea's absorption of carbon dioxide (CO₂) is recognized for altering seawater chemistry, leading to increased concentrations of CO₂, bicarbonate (HCO₃⁻), and H⁺ ions, along with decreased levels of carbonate (CO₃²⁻) and pH—a phenomenon referred to as ocean acidification. This poses a significant threat to coastal ecosystems, impacting marine organisms and millions of people reliant on coastal protection, fisheries, and aquaculture. The effects of ocean acidification on Indonesia's coastal waters, as well as how coastal ecosystems like coral reefs and seagrasses respond to CO₂ exchange between the sea and air on small islands, remain uncertain. Indonesia's extensive area, composed of numerous islands with diverse sea depths, leads to dynamic hydro-oceanographic conditions in its coastal and marine waters, varying both spatially and temporally. This diversity plays a crucial role in determining the vulnerability of coastal ecosystems to ocean acidification. This research aims to: 1) assess aragonite saturation (Ω_{arag}) and its spatio-temporal variations in the coastal waters of small Indonesian islands; 2) identify calcification processes and Net Ecosystem Productivity (NEP) of seagrass and coral reefs, examining their relationship with air-sea CO₂ exchange; and 3) investigate the effects of human activities on the impact of ocean acidification in coastal waters.

Seawater sampling and *in-situ* measurements for spatial studies were carried out at six locations in the coastal waters of small Indonesian islands (Weh, Pulo Aceh, Pari, Lombok, Selayar, and Flores) and one location in the coastal waters of the main mainland (Sorong) in the range 2015 and 2021. The temporal study focused on the waters around the seagrass and coral reef ecosystems of Sire Bay, Lombok in April and October 2018 with 2 x 24-hour observations, while the study on anthropogenic influences was carried out in the coastal waters of Pari Island and Lombok in February and March 2021, respectively, with each observation lasting 24 hours. The parameters measured consist of water physicochemical parameters, namely temperature, salinity, dissolved oxygen (DO), phosphate, nitrate, silicate, and chlorophyll-*a*, as well as marine carbonate systems, namely pH, total alkalinity (TA), dissolved inorganic carbon (DIC), CO₂ partial pressure (*p*CO₂), and aragonite saturation (Ω_{arag}). Water physicochemical parameters such as temperature, salinity, and DO were measured using the Conductivity Temperature Depth SeaBird Electronic (CTD SBE) 19plus and DO meter Hanna HI 9146. Seawater acidity (pH) was measured using a Mettler Toledo Single Chanel Portable pH meter and spectrophotometrically using m-cresol purple (mCP) dye indicator and Shimadzu UV-1800 spectrophotometer. Seawater *p*CO₂ measurements using the Mini CO₂ Pro Oceanus sensor and the CO₂SY program. Total alkalinity was analyzed using the titration method and using an alkalinity titrator. Dissolved inorganic carbon concentration and aragonite saturation conditions were calculated using the CO₂SY program. Net ecosystem production (NEP) is calculated based on changes in DIC concentration, while net ecosystem calcification (NEC) is calculated based on changes in TA.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



The findings of the study reveal that the coastal waters surrounding small islands in Indonesia generally exhibit high levels of calcium carbonate saturation, as indicated by Ω_{arag} values surpassing one. This suggests that the majority of these coastal waters support the calcification process. Geographically, the eastern regions of Indonesia, particularly Selayar Island, and Flores, demonstrate higher Ω_{arag} values ranging from 3.75 to 5.87, with an average of 4.96 ± 0.48 , in comparison to other areas. In contrast, Pari Island's coastal waters exhibit lower Ω_{arag} values, ranging from 1.57 to 3.30, averaging 2.49 ± 0.50 . This disparity is attributed to the prevalence of low salinity and shallow depth in the western part of Indonesia. The multivariate analysis highlights that salinity exerts the most significant influence on Ω_{arag} across most locations, with a percentage impact ranging from 24.13% to 52.92%. The PCA analysis outcomes reveal that, in addition to salinity, aragonite saturation in the coastal waters of small Indonesian islands exhibits a significant ($p < 0.05$) association with sea surface temperature, seawater carbonate system, PO_4 , and chlorophyll-*a*. Ω_{arag} shows a positive correlation with pH, salinity, and total alkalinity (TA) while displaying a negative correlation with the partial pressure of carbon dioxide ($p\text{CO}_2$), dissolved inorganic carbon (DIC), sea surface temperature, PO_4 , and chlorophyll.

Temporally, the marine carbonate system exhibits significant variations, with almost all parameters showing notable differences ($p < 0.05$) between April and October. Aragonite saturation (Ω_{arag}) is higher in April (4.75 ± 0.75 in seagrass ecosystems and 4.25 ± 0.63 in coral reef ecosystems) compared to October (3.61 ± 0.28 in seagrass ecosystems and 3.34 ± 0.19 in coral reef ecosystems). The findings also indicate that aragonite saturation tends to rise with increasing NEP, with seagrass ecosystems having a greater impact on modifying carbonate chemical dynamics in shallow waters than coral reef ecosystems. However, the high NEP rates in seagrass and coral reef ecosystems during the day are insufficient to prevent CO_2 release into the atmosphere over 24 hours.

The anthropogenic impact on ocean acidification in the coastal waters of Pari Island is particularly evident, with pH values ranging from 7.60 to 8.00 and Ω_{arag} from 1.04 to 2.54. The average Ω_{arag} value in Pari Island's waters falls below the optimal range for the growth of tropical coral reefs. This low pH and Ω_{arag} are influenced by reduced temperature and salinity, along with the limited capacity of benthic ecosystems to lower CO_2 levels. Significant differences in carbonate system parameters are observed between the coastal areas of Sire Bay, Lombok, and Pari Island ($p < 0.05$). Sire Bay is characterized by its pH, TA, and Ω_{arag} , whereas Pari Island exhibits high partial pressure of CO_2 ($p\text{CO}_2$), leading to continuous CO_2 emissions during the observation period. CO_2 flux is highest at night in seagrass ecosystems due to respiration.

Keywords: CO_2 , ocean acidification, Ω_{arag} , NEP, NEC, small Indonesian islands



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2024

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

DINAMIKA SISTEM KARBONAT LAUT DI KEPULAUAN INDONESIA

AFDAL

Disertasi

sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Doktor pada

Program Studi Ilmu Kelautan

**PROGRAM DOKTOR ILMU KELAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Ario Damar, M.Si
- 2 Dr. Ir. Nyoman Metta N. Natih, M.Si

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Ario Damar, M.Si
- 2 Dr. Ir. Nyoman Metta N. Natih, M.Si



Judul Disertasi : Dinamika Sistem Karbonat Laut di Kepulauan Indonesia

Nama : Afdal

NIM : C561190132

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Dietrich G. Bengen, DEA

Pembimbing 2:

Dr. Alan F. Koropitan, S.Pi., M.Si



Pembimbing 3:

Prof. Dr. A'an Johan Wahyudi

Pembimbing 4:

Dr. Rastina, S.T., M.T.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Ir. Yuli Naulita, M.Si

NIP. 196607121991032000

Dekan Fakultas Ilmu Perikanan dan Ilmu Kelautan:

Prof. Dr. Ir. Fredinan Yulianda, M.Sc

NIP. 196307311988031002



Tanggal Ujian: 20 Juni 2024

Tanggal Lulus:

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT Tuhan Yang Maha Kuasa, atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini ialah Pengasaman Laut Pesisir dan Perubahan Iklim Global, dengan judul “Dinamika Sistem Karbonat Laut di Kepulauan Indonesia”.

Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Dietrieck G. Bengen, DEA., Bapak Dr. Alan F. Koropitan, S.Pi., M.Si., Bapak Prof. Dr. A’an Johan Wahyudi dan Ibu Dr. Rastina, ST., MT. sebagai promotor yang telah membimbing, mengarahkan dan banyak memberi saran dalam penulisan disertasi ini
2. Penguji luar komisi pembimbing Bapak Prof. Dr. Ir. Ario Damar, M.Si., dan Bapak Dr. Ir. Nyoman Metta N. Natih, M.Si yang telah memberikan banyak masukan untuk perbaikan disertasi.
3. Bapak Dekan FPIK IPB, Bapak Prof. Dr. Ir. Fredinan Yulianda, M.Sc., ketua program studi IKL, Ibu Dr. Ir. Yuli Naulita, M.Si., ketua departemen ITK, Bapak/Ibu dosen pengampu mata kuliah dan tenaga administrasi di lingkungan program studi IKL atas semua ilmu yang telah diberikan dan kemudahan dalam pengurusan adminstarasi selama perkuliahan.
4. Bapak Dr. Dirhamsyah, Bapak Prof. Dr. Augy Syahailatua dan Dr. Udhi Eko Hernawan sebagai Kepala Pusat Riset Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberikan izin untuk melanjutkan studi S3 dan menyetujui anggaran untuk penelitian disertasi.
5. Hanif Budi Prayitno, M.Sc., dan Susi Rahmawati, M.Bio.Sc. sebagai peneliti dari Pusat Riset Oseanografi BRIN, Dr. Novi Susetyo Adi dari Pusat Riset Kelautan KKP beserta Teknisi dan staf Laboratorium Bu Suci Lastrini, Bapak Sumijo Hadi Riyono (Alm) dan Bapak Djatmiko dari Pusat Riset Oseanografi BRIN yang telah membantu selama pengumpulan data dan analisis sampel di laboratorium
6. Teman-teman anggota kelompok riset Biosfer Laut Terintegrasi (IMBER), Pusat Riset Oseanografi BRIN, Mba Camellia Kusuma Tito, S.Si., M.Si., Mas Dr. Faisal Hamzah, Edward Taufiqurahman, MSi, Rachma Puspitasari, MSc, Mba Lestari, MSi, Harmesa, MSi, Ita Wulandari, MSc dan Dr. Idha Yulia Ikhsani atas diskusi dan dukungannya
7. Teman-teman S3 IKL terutama Dr. Yulianto Suteja, Dr. Anna Ida Sunaryo Purwiyanto, Dr. Apriansyah, Dr. Abdul Motalib Angkotasana, Uda Muhammad Abrar, Kak Fera, Bu Eva, Muhammad Agung Nugraha dan Zulham, atas segala bantuan dan dukungannya selama perkuliahan dan penyusunan disertasi
8. Teman-teman seperjuangan Sekolah Pasca IPB di LSI Hero Gedung B terutama Pak Sukarna, Mas Anwar, Mas Faisal, Pak Asep, Pak Jumadil, Pak Luthfi, Uda Hendri, Pak Cecep, Pak Adrian, Pak Haitami, Inda, Yossy, dkk atas penyemangatnya dalam menyelesaikan disertasi
9. Pak dr. Ferry Haki, Mas Desna, Mas Agung, Kang Rahmat, Kang Asep, Kang Akbar dan Mas Adi, atas dukungan dan doanya dalam penyelesaian studi di IPB



10. Ibunda tercinta Wisnimar, isteri tersayang Ade Wirma Yulia dan anak-anak yang shalih dan shalihah (Nabil Zahra Aldenda, Gahzy Firjatullah Aldenda, Aqila Aurelia Aldenda dan Adeeva Myesha Afdal) serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya sehingga penulisan disertasi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2024

Afdal

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat.....	4
1.5 Kebaruan (Novelty).....	5
II VARIABILITAS SPASIAL SATURASI ARAGONIT DAN SISTEM KARBONAT LAUT DI PERAIRAN PESISIR KEPULAUAN INDONESIA	6
2.1 Pendahuluan	6
2.2 Metode Penelitian.....	7
2.2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	7
2.2.2 Pengumpulan Sampel dan Pengukuran In-Situ	9
2.2.3 Analisis Sampel	9
2.2.4 Analisis Data	10
2.3 Hasil dan Pembahasan.....	10
2.3.1 Variasi spasial suhu permukaan laut dan salinitas	10
2.3.2 Variasi spasial saturasi aragonite dan system karbonat laut.....	14
2.3.3 Peran interaksi darat-laut dalam mengatur saturasi kalsium karbonat.....	20
2.4 Simpulan.....	22
III VARIABILITAS TEMPORAL SISTEM KARBONAT LAUT, FLUKS CO ₂ , PRODUKSI EKOSISTEM BERSIH DAN KALSIFIKASI DI PERAIRAN EKOSISTEM PESISIR	23
3.1 Pendahuluan	23
3.2 Metode Penelitian.....	24
3.2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	24
3.2.2 Pengumpulan sampel dan pengukuran in-situ.....	25
3.2.3 Analisis sampel.....	25
3.2.4 Analisis Data	26
3.3 Hasil dan Pembahasan.....	27

3.3.1	Variasi temporal faktor fisika-kimia perairan Teluk Sire Lombok.....	27
3.3.2	Variasi temporal saturasi aragonite dan sistem karbonat laut ..	31
3.3.3	Variasi Temporal Fluks CO ₂ , Produksi Ekosistem Bersih (NEP) dan Kalsifikasi Ekosistem Bersih (NEC)	34
3.4	Simpulan	39
IV	DAMPAK ANTROPOGENIK TERHADAP PENGASAMAN LAUT DI EKOSISTEM LAMUN DAN TERUMBU KARANG PULAU PARI DAN LOMBOK	40
4.1	Pendahuluan.....	40
4.2	Metode Penelitian	42
4.2.1	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	42
4.2.2	Pengumpulan sampel dan pengukuran in-situ	43
4.2.3	Analisis sampel.....	43
4.2.4	Analisis data	44
4.3	Hasil dan Pembahasan	45
4.3.1	Hidrografi	45
4.3.2	Sistem karbonat, keadaan saturasi aragonit (Ω_{arag}) dan fluks CO ₂	47
4.3.3	Dampak proses antropogenik dan metabolisme terhadap saturasi aragonit.....	50
4.4	Simpulan.....	53
V	PEMBAHASAN UMUM	54
5.1	Peningkatan konsentrasi CO ₂ atmosfer dan proses pengasaman laut	54
5.2	Dinamika sistem karbonat laut dan kondisi hidro-oseanografi di Kepulauan Indonesia	55
5.3	Proyeksi Keadaan Saturasi Aragonit, dan Implikasinya terhadap Ekosistem Pesisir	57
VI	SIMPULAN DAN SARAN.....	59
6.1	Simpulan.....	59
6.2	Saran	59
	DAFTAR PUSTAKA.....	61
	LAMPIRAN	72
	RIWAYAT HIDUP	79

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

1	Lokasi, waktu dan jumlah titik stasiun pengambilan sampel air laut dan pengukuran parameter fisika kimia air laut di perairan pesisir Kepulauan Indonesia	8
2	Keterkaitan antar parameter di perairan pesisir Kepulauan Indonesia dianalisis menggunakan analisis korelasi Pearson	20

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR GAMBAR

1.	Lokasi dan titik sampling penelitian untuk kajian spasial di perairan pesisir Kepulauan Indonesia; A=Pulau Weh; B=Pulo Aceh; C=Pulau Pari; D=Pulau Lombok; E=Pulau Selayar; F=Pulau Flores; G=Sorong.	8
2.	Rata-rata suhu permukaan laut di perairan pesisir Kepulauan Indonesia	11
3.	Rata-rata salinitas permukaan laut di perairan pesisir Kepulauan Indonesia	11
4.	Diagram suhu dan salinitas (diagram T-S) pada setiap lokasi di perairan pesisir kepulauan Indonesia. A=Pulau Weh, B=Pulau Aceh, C=Pulau Pari, D=Pulau Lombok, E=Pulau Selayar, F=Pulau Flores dan G=Sorong.....	13
5.	Rata-rata saturasi aragonite dan system karbonat laut di perairan pesisir Kepulauan Indonesia.....	15
6.	Parameter kunci yang berkontribusi terhadap perubahan Ω_{arag} di setiap lokasi penelitian.....	16
7.	Salinitas versus Ω_{arag} di Kepulauan Indonesia.....	16
8.	Perbedaan TA dan DIC versus Ω_{arag} di perairan pesisir Kepulauan Indonesia	18
9.	Karakteristik lokasi dan korelasi antar parameter berdasarkan parameter fisikokimia dan sistem karbonat laut menggunakan Principal Component Analysis (PCA) di perairan pesisir Kepulauan Indonesia. (W=Weh, A=Aceh, P=Pari, L=Lombok, SL=Selayar, FL=Flores, SO=Sorong).	20
10.	Rata-rata NDIC dan NTAlk di perairan pesisir Kepulauan Indonesia ...	22
11.	Lokasi pengambilan sampel untuk kajian temporal di perairan pesisir Teluk Sire Lombok, April dan Oktober 2018.....	25
12.	Karakteristik Fisika-kimia Perairan Pesisir Teluk Sire, Lombok pada bulan April dan Oktober 2018	29
13.	Variasi Harian Faktor Fisika-kimia Perairan Pesisir Teluk Sire, Lombok pada siang dan malam hari	30
14.	Variasi Temporal Sistem karbonat air laut di perairan Teluk Sire, Lombok pada bulan April dan Oktober 2018.	32
15.	Variasi Harian sistem karbonat air laut di perairan Teluk Sire, Lombok pada siang dan malam hari.....	33
16.	Variasi sistem karbonat air laut pada ekosistem lamun dan terumbu karang Teluk Sire, April, dan Oktober 2018.....	34
17.	Variasi temporal Fluks CO ₂ , produksi ekosistem bersih, dan kalsifikasi ekosistem bersih di Teluk Sire, April, dan Oktober 2018.....	35

@Hak Cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

18. Fluks CO₂, produksi ekosistem bersih, dan kalsifikasi ekosistem bersih di ekosistem lamun dan terumbu karang Teluk Sire, April, dan Oktober 2018 35

19. Variasi harian Fluks CO₂, produksi ekosistem bersih, dan kalsifikasi ekosistem bersih di Teluk Sire, April, dan Oktober 2018 36

20. Analisis Komponen Utama (PCA) berdasarkan nilai rata-rata parameter fisikokimia, sistem karbonat air laut, dan metabolisme organisme di Teluk Sire, Lombok, April dan Oktober 2018. Dataset dinormalisasi menggunakan program Past 4.03. (Catatan: □ terumbu karang pada siang hari, Δ terumbu karang pada malam hari, □ lamun pada siang hari, Δ lamun pada malam hari). 38

21. Lokasi pengambilan sampel di ekosistem lamun (SGP) dan terumbu karang (CRP) Pulau Pari serta ekosistem lamun (SGL) dan terumbu karang (CRL) Teluk Sire Lombok masing-masing pada bulan Februari dan Maret 2021..... 42

22. Variasi harian suhu permukaan laut dan salinitas pada ekosistem lamun dan terumbu karang di sekitar Pulau Pari dan Teluk Sire Lombok masing-masing pada bulan Februari dan Maret 2021. 46

23. Perubahan harian parameter kimia air laut pada ekosistem lamun dan terumbu karang di sekitar Pulau Pari dan Teluk Sire, Lombok masing-masing pada bulan Februari dan Maret 2021. 47

24. Variasi harian sistem karbonat laut dan fluks CO₂ di ekosistem lamun dan terumbu karang di sekitar Pulau Pari dan Teluk Sire Lombok, masing-masing pada bulan Februari dan Maret 2021. 49

25. Parameter utama yang berkontribusi terhadap perubahan Ω_{arag} di Pulau Pari dan Teluk Sire Lombok masing-masing pada bulan Februari dan Maret 2021..... 50

26. Proses metabolisme dan dampak antropogenik yang berkontribusi terhadap perubahan saturasi aragonit di perairan pesisir Pulau Pari dan Teluk Sire, Lombok, masing-masing pada Februari dan Maret 2021.... 51

27. Rata-rata Produksi Ekosistem Bersih (NEP), dan Kalsifikasi Ekosistem Bersih (NEC) pada ekosistem lamun dan terumbu karang di sekitar Pulau Pari dan Teluk Sire, Lombok, masing-masing pada bulan Februari dan Maret 2021. 53

28. Proyeksi perubahan Ω_{arag} di setiap lokasi pada tahun 2100 berdasarkan skenario perubahan iklim. ΔΩ_{arag} adalah selisih antara Ω_{arag} pada tahun 2100 dan Ω_{arag} pada survei ini 58

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR LAMPIRAN

1.	Posisi titik stasiun pengambilan sampel pada masing-masing Lokasi di perairan pesisir Kepulauan Indonesia	72
2.	Rata-rata dan kisaran parameter lingkungan dan system karbonat laut perairan pesisir Kepulauan Indonesia	73
3.	Nilai rata-rata parameter lingkungan dan sistem karbonat air laut di ekosistem pesisir Teluk Sire Lombok, April dan Oktober 2018.....	74
4.	Nilai rata-rata fluks CO ₂ , NEP dan NEC pada ekosistem pesisir Teluk Sire, April dan Oktober 2018.....	75
5.	Nilai setiap parameter lingkungan di perairan ekosistem pesisir Pulau Pari dan Teluk Sire Lombok, Februari dan Maret 2021	76
6.	Nilai setiap parameter system karbonat laut dan fluks CO ₂ di perairan ekosistem pesisir Pulau Pari dan Teluk Sire Lombok, Februari dan Maret 2021	77
7.	NDIC, NTalk, NEP dan NEC di perairan ekosistem pesisir Pulau Pari dan Teluk Sire Lombok, Februari dan Maret 2021	78

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 @tik cipta milik IPB University

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.