

DINAMIKA SPASIO-TEMPORAL DAN KETAHANAN KOMUNITAS KARANG PADA REZIM LINGKUNGAN YANG KONTRAS DI PERAIRAN SUMATERA

RIKOH MANOGAR SIRINGORINGO



**PROGRAM DOKTOR ILMU KELAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@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.

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul "Dinamika Spasio-Temporal Dan Ketahanan Komunitas Karang Pada Rezim Lingkungan Yang Kontras Di Perairan Sumatera" adalah karya saya sendiri, dengan arahan komisi pembimbing, dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal dari atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan oleh penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka pada bagian akhir disertasi ini.

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

Bogor, Agustus 2026

Rikoh Manogar Siringoringo
NIM C5601222009



RINGKASAN

RIKOH MANOGAR SIRINGORINGO. Dinamika Spasio-Temporal dan Ketahanan Komunitas Karang Pada Rezim Lingkungan Yang Kontras Di Perairan Sumatera. Dibimbing oleh DIETRIECH G. BENGEN, I WAYAN NURJAYA, BEGINER SUBHAN, dan GIYANTO.

Terumbu karang menghadapi tekanan akibat pemanasan laut, gelombang panas, dan pemutihan massal. Namun, respons komunitas karang terhadap gangguan termal dapat berbeda antarwilayah karena dipengaruhi oleh rezim lingkungan, komposisi taksonomi, bentuk pertumbuhan, dan riwayat paparan. Penelitian ini menganalisis dinamika spasio-temporal, *resistance*, dan *recovery* komunitas karang pada wilayah barat dan timur perairan Sumatera sebelum, selama, dan setelah pemutihan tahun 2016.

Penelitian dilakukan pada 93 stasiun transek permanen di delapan lokasi, yaitu Nias Utara, Tapanuli Tengah, Mentawai, dan Pulau Pieh di wilayah barat, serta Belitung, Bintan, Natuna, dan Batam di wilayah timur. Pengamatan dilakukan pada 2015, 2016, dan 2018. Data komunitas diperoleh melalui *Underwater Photo Transect* sebanyak 13.950 foto, sedangkan data suhu permukaan laut, *Degree Heating Weeks* (DHW), salinitas, dan turbiditas berasal dari NOAA Coral Reef Watch, Copernicus Marine Service, dan MODIS-Aqua. Analisis meliputi perubahan temporal, keanekaragaman, nMDS, PERMANOVA, CCA, *environmental fitting*, serta perubahan taksa dan bentuk pertumbuhan.

Hasil menunjukkan respons yang sangat kontras. Di wilayah barat, tutupan karang hidup menurun dari sekitar 37,33% pada 2015 menjadi 19,38% pada 2016 dan hanya meningkat menjadi 21,99% pada 2018. Di wilayah timur, tutupan relatif stabil, yaitu 34,27% pada 2015, 32,80% pada 2016, dan 32,57% pada 2018. Seluruh lokasi barat mengalami penurunan nyata, sedangkan Batam, Bintan, dan Natuna relatif stabil. Belitung mengalami penurunan yang diikuti pemulihan parsial. Reorganisasi struktur genera dan bentuk pertumbuhan juga lebih kuat di wilayah barat.

Wilayah barat umumnya lebih hangat, lebih asin, dan lebih jernih, sedangkan wilayah timur lebih dingin, bersalinitas lebih rendah, dan pada beberapa lokasi lebih keruh. Puncak suhu dan tekanan termal terjadi pada 2016, tetapi DHW berbeda antarlokasi dan tidak sepenuhnya mengikuti suhu absolut. *Acropora*, terutama bentuk *branching* dan *tabulate*, mengalami penurunan terbesar di wilayah barat, sedangkan *Porites* dan bentuk masif menunjukkan *resistance* lebih tinggi. Namun, *Acropora* relatif mampu bertahan di beberapa lokasi timur, menunjukkan bahwa sensitivitas taksa bergantung pada konteks lingkungan. Turbiditas yang lebih tinggi di wilayah timur diduga mengurangi *irradiance* dan tekanan foto-termal, meskipun hubungan ini bersifat asosiatif.

Penelitian ini menunjukkan bahwa ketahanan komunitas karang ditentukan oleh interaksi antara paparan termal, rezim lingkungan lokal, dan sensitivitas biologis taksa serta bentuk pertumbuhan. Kebaruan penelitian terletak pada perbandingan geografis barat-timur, penggunaan transek permanen lintas periode gangguan, analisis multilevel komunitas, dan pembuktian *context-dependent vulnerability*. Hasil penelitian mendukung pengelolaan berbasis kerentanan spasial, perlindungan lokasi dengan *resistance* tinggi, serta pemantauan yang mencakup tutupan, komposisi taksonomi, dan sifat fungsional komunitas.

Kata kunci: bentuk pertumbuhan karang, pemutihan karang, daerah penyangga, Sumatera, tahan - rentan



SUMMARY

RIKOH MANOGAR SIRINGORINGO. Spatio-Temporal Dynamics of Coral Communities across Contrasting Environmental Regimes in Sumatran Waters. Supervised by DIETRICH GEOFFREY BENGEN, I WAYAN NURJAYA, BEGINER SUBHAN, and GIYANTO.

Coral reefs are increasingly threatened by ocean warming, marine heatwaves, and mass bleaching events. However, coral community responses to thermal disturbances may vary among regions due to differences in environmental regimes, taxonomic composition, growth forms, and exposure history. This study examined the spatio-temporal dynamics, resistance, and recovery of coral communities in the western and eastern waters of Sumatra before, during, and after the 2016 bleaching event.

The study was conducted at 93 permanent transect stations across eight locations: North Nias, Central Tapanuli, Mentawai, and Pieh Island in the western region, and Belitung, Bintan, Natuna, and Batam in the eastern region. Surveys were conducted in 2015, 2016, and 2018. Coral community data were collected using the Underwater Photo Transect method, generating 13,950 photographs. Sea surface temperature, Degree Heating Weeks (DHW), salinity, and turbidity data were obtained from NOAA Coral Reef Watch, the Copernicus Marine Service, and MODIS-Aqua. Analyses included temporal change assessment, diversity analysis, nMDS, PERMANOVA, CCA, environmental fitting, and evaluation of changes in coral taxa and growth forms.

The results revealed strongly contrasting responses between the two regions. In the western region, aggregate live coral cover declined from approximately 37.33% in 2015 to 19.38% in 2016 and recovered only slightly to 21.99% in 2018. In contrast, coral cover in the eastern region remained relatively stable, decreasing from approximately 34.27% in 2015 to 32.80% in 2016 and 32.57% in 2018. All western locations experienced substantial declines, whereas Batam, Bintan, and Natuna remained relatively stable. Belitung showed an initial decline followed by partial recovery. Reorganization of genera and growth-form composition was also more pronounced in the western region.

The western region was generally warmer, more saline, and clearer, whereas the eastern region was cooler, less saline, and more turbid at several locations. Peak temperatures and thermal stress occurred in 2016, although DHW varied among locations and did not fully correspond to absolute temperature gradients. *Acropora*, particularly branching and tabulate forms, experienced the greatest decline in the western region, whereas *Porites* and massive growth forms showed greater resistance. Nevertheless, *Acropora* persisted at several eastern locations, indicating that taxon sensitivity is context dependent. Higher turbidity in the eastern region may have reduced irradiance and moderated photo-thermal stress, although this relationship remains associative.

These findings demonstrate that coral community resilience is shaped by interactions among thermal exposure, local environmental regimes, and the biological sensitivity of coral taxa and growth forms. The novelty of this study lies in its west–east geographical comparison, use of permanent transects across disturbance periods, multilevel community analysis, and demonstration of context-dependent vulnerability within the same taxa. The results support spatial vulnerability-based management, protection of highly resistant sites as climate-adaptation priorities, and monitoring approaches that incorporate coral cover, taxonomic composition, and functional community traits.

Keywords: coral growth forms, coral bleaching, buffer areas, Sumatra, winners–losers.



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 2026
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 SPASIO-TEMPORAL DAN KETAHANAN KOMUNITAS KARANG PADA REZIM LINGKUNGAN YANG KONTRAS DI PERAIRAN SUMATERA

RIKOH MANOGAR SIRINGORINGO

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
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





Judul Disertasi : Dinamika Spasio-Temporal Dan Ketahanan Komunitas Karang Pada Rezim Lingkungan Yang Kontras Di Perairan Sumatera.

Nama : Rikoh Manogar Siringoringo

NIM : C5601222009

Pembimbing 1:

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

Pembimbing 2:

Dr. Ir. I Wayan Nurjaya, M.Sc.

Pembimbing 3:

Dr. Beginer Subhan, S.Pi., M.Si.

Pembimbing 4:

Dr. Giyanto, S.Si, M.Sc.

Diketahui Oleh

Ketua Program Studi Ilmu Kelautan:

Prof. Dr. Ir. Neviaty Putri Zamani, M.Sc.

NIP. 19641014 198803 2 001



Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan

Dr. Beginer Subhan, S.Pi., M.Si.

NIP. 19800118 200501 1 003



Tanggal Ujian: 03 Agustus 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini dapat diselesaikan. Penelitian yang dilaksanakan sejak Januari 2014 sampai Desember 2019 ini berjudul "Dinamika Spasio-Temporal Dan Ketahanan Komunitas Karang Pada Rezim Lingkungan Yang Kontras Di Perairan Sumatera". Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Dietrich G. Bengen, DEA., Dr. Ir. I Wayan Nurjaya, M.Sc., Dr. Beginer Subhan, S.Pi., M.Si., dan Dr. Giyanto, S.Si, M.Sc., sebagai promotor yang telah membimbing, mengarahkan dan banyak memberi saran dalam penulisan disertasi ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Dedi Soedharma, DEA. dan Prof. Dr. Suharsono, sebagai penguji luar komisi yang telah memberikan saran dan masukan bagi kesempurnaan disertasi ini.
3. Bapak Dekan FPIK IPB, Ketua Departemen ITK, Ketua Program Studi IKL, Bapak/Ibu dosen pengampu mata kuliah dan tenaga administrasi di lingkungan Program Studi IKL atas dukungan dan bantuan administrasi selama perkuliahan.
4. Program Degree By Research (DBR) BRIN yang telah memberikan dukungan pembiayaan studi dan penyelesaian tugas akhir.
5. Program COREMAP-CTI, LIPI/BRIN periode 2014-2021, serta riset dan ekspedisi lainnya dalam kegiatan pengumpulan data lapangan.
6. Rekan-rekan peneliti Pusat Riset Oseanografi BRIN, Pusat Riset Sistem Biota BRIN dan mitra perguruan tinggi Program Reef Health Monitoring (RHM), COREMAP-CTI, BRIN, terutama di lokasi studi disertasi ini, atas kontribusi dan diskusi sejawat.
7. Teman-teman Angkatan 2022 seperjuangan Program Doktor Ilmu Kelautan, Dr. Camelia Tito, Dr. Zulham Afandi Harahap, Dr. Inayah Rahimah, Bapak Dr. Rustam Effendi Paembonan, Ibu Putri Mudlika, Bapak Agung, Bapak Agus Koesnadi, dan Ibu Tri Handayani, terima kasih atas kebersamaan dan perjuangan dalam menempuh pendidikan di IPB University.
8. Terima kasih dan do'a tak terhingga buat kedua orang tua saya, Alm. Bapak Drs. Japanal Siringoringo dan Ibu Dra. Rusma Sinaga dan untuk doa, motivasi, dan harapannya.
9. Seluruh keluarga tersayang, istri saya dr. Merdina Manik dan putri saya, Rosela Hana, yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang sehingga penulisan disertasi ini dapat diselesaikan dengan baik.

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

Bogor, Agustus 2026

Rikoh Manogar Siringoringo

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.6 Kebaruan	5
1.7 Kerangka Konseptual	6
1.8 Hipotesis Penelitian	7
II DINAMIKA SPASIAL TEMPORAL KOMUNITAS KARANG DI PERAIRAN SUMATERA	8
2.1 Pendahuluan	8
2.2 Metode Penelitian	8
2.3 Hasil dan Pembahasan	13
2.4 Kesimpulan	27
III REZIM LINGKUNGAN TERMAL DAN NONTERMAL DI PERAIRAN SUMATERA	29
3.1 Pendahuluan	29
3.2 Metode Penelitian	30
3.3 Hasil dan Pembahasan	31
3.4 Kesimpulan	42
IV KETERKAITAN REZIM LINGKUNGAN DENGAN DINAMIKA DAN KETAHANAN KOMUNITAS KARANG	43
4.1 Pendahuluan	43
4.2 Metode Penelitian	44
4.3 Hasil dan Pembahasan	46
4.4 Kesimpulan	74
V PEMBAHASAN UMUM	76
5.1 Sintesis Temuan Utama	76
5.2 Gangguan yang Sama, Respons yang Berbeda: Kebergantungan pada Konteks Geografis	76
5.3 Dari Paparan Termal ke Penyaringan Lingkungan: Kerangka Multi-Tekanan	77
5.4 Kerentan yang dimediasi oleh Karakteristik Organisme dan Bergantung pada Konteks Lingkungan	78
5.5 Implikasi Konseptual bagi Ekologi Terumbu Karang	80
5.6 Implikasi bagi Konservasi dan Adaptasi Perubahan Iklim	80
5.7 Kesimpulan	81
VI SIMPULAN DAN SARAN	82
6.1 Simpulan	82
6.2 Implikasi	82
6.3 Keterbatasan Penelitian	83
6.4 Saran	84
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN	99

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 dan pengelompokannya.	10
2. Kategori bentik terumbu (biotik dan abiotik)	11
3. Daftar bentuk pertumbuhan karang dan masing-masing kode	12
4. Hasil PERMANOVA	17
5. Homogeneidad dispersa multivariada (PERMDISP)	17
6. Rata-rata tutupan karang hidup ($\% \pm SD$) dan hasil uji Friedman	17
7. Keanekaragaman genera Shannon (H') dan hasil uji Friedman antartahun per lokasi	22
8. Sentroid dan dispersi nMDS komunitas genera per wilayah dan tahun.	23
9. Bentuk pertumbuhan dengan perubahan antartahun yang nyata	25
10. Rata-rata suhu permukaan laut tahun 2014 - 2019, dan hasil uji Kruskal-Wallis.	33
11. Rata-rata DHW tahun 2014-2019 per lokasi dan hasil uji Kruskal-Wallis	36
12. Rata-rata salinitas tahunan (PSU) per lokasi tahun 2014 – 2019	37
13. Nilai rata-rata turbiditas per lokasi dari rata-rata bulanan tahun 2014-2019	41
14. Ringkasan karakteristik lingkungan wilayah barat dan timur Sumatera.	41
15. Hasil PERMANOVA Komposisi Komunitas Karang Berdasarkan Sistem Terumbu, Tahun, dan Interaksinya.	47
16. Hasil Uji PERMDISP Komposisi Komunitas Karang Berdasarkan Sistem Terumbu, Tahun, dan Interaksinya	47
17. Genus karang penyumbang utama ketidakmiripan Bray–Curtis antarwilayah berdasarkan analisis SIMPER	48
18. Keterkaitan tiap variabel lingkungan dengan komposisi bentik	51
19. Keterkaitan variabel lingkungan, wilayah, dan tahun dengan struktur genus.	55
20. Keterkaitan variabel lingkungan dengan bentuk pertumbuhan model CCA per tahun.	58
21. Keterkaitan suhu permukaan laut dengan struktur komunitas (envfit pada NMDS), menurut wilayah dan komposisi	60
22. Matriks penilaian ketahanan lokasi berdasarkan delapan indikator resistance-recovery untuk Nilai indikator mentah	71
23. Matriks penilaian ketahanan lokasi berdasarkan delapan indikator <i>resistance-recovery</i> untuk skor dan klasifikasi.	72

DAFTAR GAMBAR

1. Kerangka konseptual	7
2. Lokasi penelitian	9
3. Ilustrasi skematis prosedur pengumpulan data lapangan	11
4. Karang antartahun wilayah Barat (A) dan Timur (B) Sumatera.	15
5. Stacked bar chart spasio-temporal tutupan karang timur (A) barat (B) Sumatera.	16
6. Box plot tutupan HC pada wilayah barat dan timur Sumatera	18
7. Lintas tutupan karang hidup menurut wilayah.	19
8. Lintasan tutupan karang hidup spesifik per lokasi (2015, 2016, 2018).	20
9. Boxplot Spasio-temporal genus di wilayah barat dan timur Sumatera	22
10. nMDS genus wilayah barat dan timur Sumatera	23
11. Boxplot lifeform di perairan Sumatera	25
12. Grafik batang rata-rata SST tahunan per lokasi 2014-2019	32
13. Boxplot perbandingan Kruskal-Wallis SST antartahun per lokasi	32