

Skripsi Geofisika

**PEMODELAN PENGARUH FAKTOR LINGKUNGAN TERHADAP
PEMUTIHAN KARANG (*CORAL BLEACHING*) DI *FRENCH POLYNESIA***



OLEH :

NUR FATIHAH

H061191086

PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023

HALAMAN JUDUL

**PEMODELAN PENGARUH FAKTOR LINGKUNGAN TERHADAP
PEMUTIHAN KARANG (*CORAL BLEACHING*) DI FRENCH POLYNESIA**

SKRIPSI

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Departemen Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin*

OLEH:

**NUR FATIHAH
H061191086**

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023

HALAMAN PENGESAHAN

**PEMODELAN PENGARUH FAKTOR LINGKUNGAN TERHADAP
PEMUTIHAN KARANG (*CORAL BLEACHING*) DI *FRENCH POLYNESIA***

Disusun dan Diajukan Oleh:

NUR FATIHAH

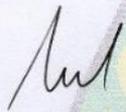
H061191086

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

Pada, 4 Agustus 2023
Dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

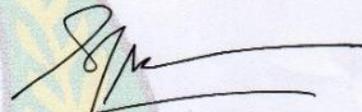
Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc.
NIP. 196303151987101001

Pembimbing Pertama



Saaduddin, M.Sc.
NIP. 198903202022043001

**Ketua Departemen Geofisika
Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin Makassar**



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng.
NIP. 196709291993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nur Fatihah

NIM : H061191086

Departemen : Gcofisika

Judul Tugas Akhir : Pemodelan Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Pemutihan Karang (*Coral Bleaching*) di *French Polynesia*

Menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar hasil karya saya sendiri dan belum pernah dilakukan untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas Hasanuddin atau Lembaga Penelitian lain kecuali kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang sudah lazim digunakan, karya tulis ini merupakan murni dari gagasan penelitian saya sendiri, kecuali arahan Tim Pembimbing dan masukan Tim Penguji.

Makassar, 4 Agustus 2023

Yang Membuat Pernyataan,



Nur Fatihah

ABSTRAK

Terumbu karang merupakan ekosistem yang dinamis, namun sensitif dan rentan terhadap perubahan kondisi lingkungan. Salah satu penyebab kematian karang di *French Polynesia* yaitu pemutihan karang. Pemutihan karang (*coral bleaching*) adalah peristiwa hilangnya warna pada karang akibat hilangnya sebagian maupun seluruh *Zooxanthellae*. Penelitian ini mengarah pada pemodelan faktor lingkungan signifikan pada kejadian pemutihan karang (*coral bleaching*) di *French Polynesia* dengan menggunakan metode *Stepwise Linear Regression*. Data kejadian pemutihan (*bleaching*) yang digunakan yaitu data *severity code* (rentang kode pemulihan) dan data faktor lingkungan dalam rentang waktu 1980-2020. Verifikasi permodelan menggunakan Korelasi *Pearson* dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Dari hasil penelitian, diperoleh sejumlah prediktor signifikan pada kejadian coral bleaching di *French Polynesia* yaitu *Sea Surface Temperature Anomaly* (SSTA), *Thermal Stress Anomaly* (TSA), dan *Thermal Stress Anomaly mean* (TSA mean). Verifikasi model kejadian *coral bleaching* di *French Polynesia* yang dikembangkan memiliki nilai Korelasi *Pearson* sebesar 0.7613 dan nilai RMSE sebesar 0.3482. Dari tiga prediktor, diperoleh prediktor signifikan yaitu *Thermal Stress Anomaly* (TSA) dengan nilai koefisien standar (beta) 0.7791.

Kata Kunci :Permodelan; Faktor Lingkungan; *Coral Bleaching*; *French Polynesia*

ABSTRACT

Coral reefs are dynamic ecosystems, but sensitive and vulnerable to changes in environmental conditions. One of the causes of coral mortality in French Polynesia is coral bleaching. Coral bleaching is the loss of color in corals due to partial or complete loss of Zooxanthellae. This research leads to modeling significant environmental factors on the incidence of coral bleaching in French Polynesia using the Stepwise Linear Regression method. The bleaching event data used are severity code data (recovery code range) and environmental factor data from 1980 to 2020. Modeling verification uses Pearson Correlation and Root Mean Square Error (RMSE). From the results of the study, a number of significant predictors of coral bleaching events in French Polynesia were obtained, including Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA), Thermal Stress Anomaly (TSA), and Thermal Stress Anomaly mean (TSA mean). Verification of the coral bleaching event model in French Polynesia developed has a Pearson Correlation value of 0.7613 and an RMSE value of 0.3482. Of the three predictors, a significant predictor is Thermal Stress Anomaly (TSA) with a standardized coefficient (beta) value of 0.7791.

Keywords: *Modeling; Environmental Factors; Coral Bleaching; French Polynesia*

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkah, Rahmat, dan hidayah-Nya yang telah dan senantiasa Ia limpahkan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul “Pemodelan Pengaruh Faktor Lingkungan Terhadap Pemutihan Karang (*Coral Bleaching*) di *French Polynesia*” sebagai syarat dalam menyelesaikan Program Sarjana (S1) pada Program Sarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Geofisika Universitas Hasanuddin. Shalawat serta salam senantiasa terkirim kepada Rasulullah SAW. Dalam penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari hambatan serta rintangan yang penulis hadapi, namun pada akhirnya dapat melaluinya berkat Ridho Allah SWT dan bimbingan dari berbagai pihak baik secara moral maupun spiritual. Izinkan pula penulis mengucapkan terima kasih sedalam-dalamnya kepada Orang Tua tercinta Ayahanda **Rahim** dan Ibunda **Almh. Rusliwati**, kakak **Nur Fazilah**, serta keluarga besar yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan kepada penulis.

Panulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik tanpa adanya dukungan dan bantuan dari berbagai pihak baik moril maupun materil. Oleh karen itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Bapak **Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc** selaku pembimbing Utama yang telah berkenan memberikan tambahan ilmu dan solusi dalam setiap permasalahan

dalam penulisan skripsi, memberikan bimbingan, kepercayaan yang sangat berarti serta motivasi kepada penulis sehingga terselesaikannya skripsi ini dengan baik

2. Bapak **Saaduddin, M.Sc** selaku pembimbing Pertama yang telah bersedia membimbing dan mengarahkan penulis selama penyusunan skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Muhammad Hamzah, S.Si., M.Si** dan Bapak **Dr. Erfan, M.Si** selaku tim penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang bersifat membangun kepada penulisan skripsi.
4. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si., M.Si** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
5. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.
6. Kepada Bapak **Sabrianto Aswad, S.Si., MT** selaku penasehat akademik yang telah memberikan masukan dan arahan terkait akademik kepada penulis.
7. Kakak **Andika, S.Si., M.Si** yang telah memberikan motivasi dan membantu penulis dalam memulai penelitian ini, telah memberkan saran dan ilmunya kepada penulis.
8. Seluruh **Dosen Departemen Geofisika, Staf FMIPA UNHAS, Staf Departemen Geofisika, Staf Laboratorium, Staf Perpustakaan FMIPA UNHAS dan Staf Perpustakaan Umum** atas semua bantuan dan ilmu yang telah diajarkan, pelayanan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.

9. Kepada seluruh Guru-guru **SMA Islam Athirah Boarding School Bone**, **SMP Islam Athirah Boarding School Bone**, dan **SDN No. 168 Barugae** yang telah menanamkan pendidikan dan ilmu kepada penulis.
10. Teruntuk teman sekaligus keluarga di **SMP Islam Athirah Boarding School Bone Angkatan III** dan **SMA Islam Athirah Boarding School Bone Amananta** yang selalu mendukung dan memberikan bantuan kepada penulis.
11. Teruntuk teman Kerja Praktik Stasiun Meteorologi kelas 1 Sultan Hasanuddin pada Unit Pengamatan Udara Permukaan dan Pengamatan Udara Atas **Mey** dan **Ojil** yang telah menjadi teman mendapatkan pengalaman baru dalam mempelajari parameter udara atas selama sebulan melakukan kerja praktik.
12. Teruntuk kawan *Coral Bleaching* **Muji, Riman, Ikki, Mey**, dan **Pipit** sebagai teman seperjuangan dalam bertukar pikiran selama mengerjakan tugas akhir
13. Teruntuk teman seperjuangan kuliah dan organisasi **ANKOR Ita, Depi, Mey, Cici**, dan **Maul** terima kasih telah sabar mendengarkan setiap keluh kesah penulis, menemani dan memberikan dukungan penuh kepada penulis.
14. Teruntuk saudara di organisasi **BATU 19 (Bangkit dan Buktikan)** terima kasih atas segala kebersamaan dan bantuannya mulai dari berproses bersama, mengemban amanah kepengurusan hingga menjadi kanda warga.
15. Teruntuk sobat **Power Rangers HMGF 2019 Akbar, Alip, Mawang, Ita, Depi**, dan **Maul** yang telah mewarnai kehidupan kampus penulis dan kebersamai dalam merasakan hal baru di organisasi

16. Teruntuk teman dari Maba sampai sekarang **OTW WISUDA Nica, Ojil, Ita, Mulki, dan Cici** terima kasih telah kebersamai didalam maupun diluar perkuliahan.
17. Teruntuk **Ita, Depi, Cici, Nude, Maul, Mulki, Ferdi, Kak Alfian**, yang telah menjadi teman nongki, healing, dan pusing dengan data sehingga sama sama memotivasi diri dalam pengerjaan tugas akhir.
18. Teruntuk teman-teman seperjuangan di Geofisika 2019 **Afika, Akbar, Alif, Andry, Arsyih, Ashar, Asyifah, Ayul, Caca, Cindy, Dahlia, Devi, Dian, Diky, Huda, Fausta, Habib, Haerul, Haidir, Haikal, Haqqul, Ikki, Indah, Ita, Ismi, Jack, Jinaan, Liani, Lovely, Mey, Muji, Mulki, Muly, Nanda, Nanov, Nismul, Nude, Nur, Nurzakiah, Pipit, Reika, Riman, Risda, Rodjil, Sarni, Sekar, Sindy, Suleha, Tiara, William, Wily, Yuli, Zakiah, Rahmat, Amirul, Nica, Inna dan Fera** yang telah memberikan dukungan dan berbagi ilmu selama perkuliahan.
19. Kakak-kakak serta adik-adik **HMGF FMIPA Unhas dan HIMAFI FMIPA Unhas** yang telah memberikan ilmu pengetahuan. Mengajarkan arti kebersamaan, kekeluargaan serta pengalaman berharga yang didapatkan selama berproses.
20. Teman, kakak, dan adik sesama **Asisten Geologi Umum 2022 dan 2023** yang telah mengisi hari-hari selama asistensi dan perkuliahan.
21. Teman dan kakak sesama **Asisten Kuliah Lapang 2023** yang telah memberikan pelajaran serta pengalaman berharga.

22. Untuk teman-teman **KKN UNHAS Gel 109 Posko Komba (Tabe' Karaeng)** **Anel, Keren, Iqbal, Anca,** dan **Mage'** yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.
23. Serta kepada semua pihak yang telah membantu penulis namun tidak sempat penulis sebutkan dalam skripsi ini, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik, semoga Allah SWT membalas segala perbuatan baik saudara(i) dan menjadi amal ibadah disisi-Nya.

Makassar, 4 Agustus 2023

Nur Fatimah

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Ruang Lingkup.....	3
I.3 Rumusan Masalah	4
I.4 Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Terumbu Karang.....	5
II.2 <i>Coral bleaching</i>	9
II.3 Parameter Lingkungan.....	13
II.3.1 Jarak Karang ke Daratan Terdekat.....	13
II.3.2 Paparan.....	14
II.3.3 Kekeruhan	14
II.3.4. Frekuensi Siklon.....	15
II.3.5 Kedalaman.....	15
II.3.6 Kecepatan Angin.....	16

II.3.7 SST	16
II.3.8 TSA	18
II.4 Model <i>Multiple Regression</i> (MR).....	19
II.5 Verifikasi Prediksi	21
II.5.1 Korelasi <i>Pearson</i>	21
II.5.2 <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE).....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	24
III.1 Lokasi Penelitian	24
III.2 Alat dan Bahan	25
III.2.1 Alat.....	25
III.2.2 Bahan	25
III.3 Prosedur Penelitian.....	26
III.3.1 Tahap Persiapan dan Pengumpulan Data.....	26
III.3.2 Tahap Pengolahan Data	26
III.5 Bagan Alir Penelitian	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
IV.1 Hasil	29
IV.1.1 Prediktor Signifikan Penyebab <i>Coral Bleaching</i>	29
IV.1.2 Model Klasifikasi <i>Coral Bleaching</i> Berdasarkan Kejadian dan Kategori <i>Bleaching</i>	31
IV.1.3 Diagram Tebar Data Observasi dan Data Prediksi Kejadian <i>Coral Bleaching</i>	32
IV.1.4 Verifikasi Prediksi Model Statistik.....	34
IV.1.4.1 Korelasi <i>Pearson</i>	34
IV.1.4.2 <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE).....	35

IV.2 Pembahasan.....	35
BAB V PENUTUP.....	38
V.1 Kesimpulan.....	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN.....	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kriteria Korelasi <i>Pearson</i>	22
Tabel 4.1 Nilai Koefisien dan Signifikan Beberapa Prediktor	29
Tabel 4.2 Kesuaian Data Prediksi Terhadap Data Observasi.....	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme Pemutihan Karang (Obura et al., 2017)	11
Gambar 2.2 Pemutihan Karang Jenis <i>Acropora</i> Di <i>French Polynesia</i> Pada Akhir Musim Panas Tahun 2007 (Pratchett et al., 2013)	12
Gambar 3.1 Peta Titik <i>Coral bleaching</i> di <i>French Polynesia</i>	24
Gambar 4.1 Klasifikasi <i>Coral Bleaching</i> Berdasarkan Kejadian dan Kategori <i>Bleaching</i>	31
Gambar 4.2 Diagram Tebar Data Observasi dan Prediksi <i>Coral Bleaching</i>	32

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Salah satu ekosistem utama di muka bumi yang tercipta secara alami dan ditempati oleh ribuan tumbuhan dan hewan yang unik adalah terumbu karang. Terumbu karang yang sehat menjadi tempat hidup lebih dari seperempat spesies laut. Penyebaran terumbu karang secara *latitudinal* di perairan tropis membentang dari wilayah selatan Jepang sampai bagian utara Australia yang dikontrol oleh faktor suhu dan sirkulasi permukaan, sedangkan secara *longitudinal* dikontrol oleh faktor konektivitas berupa *stepping stones* antar wilayah. Terumbu karang dikenal sebagai ekosistem yang sangat kompleks dan produktif dengan keanekaragaman biota tinggi seperti *mollusca*, *crustacea*, dan ikan karang. Biota yang hidup di terumbu karang merupakan suatu kesatuan komunitas yang meliputi kelompok biota dari berbagai tingkat trofik yang masing-masing komponennya mempunyai ketergantungan satu sama lain (Rudi, 2005).

Fungsi penting terumbu karang dalam ekosistemnya yaitu sebagai *spawning ground*, *nursery ground*, *rearing ground*, dan *feeding ground* bagi biota. Selain itu, peranan lain yang dimiliki terumbu karang adalah sebagai pemecah gelombang, pencegah abrasi pantai, dan ekosistem penghalang gelombang menuju ke pesisir pantai sehingga dapat menjaga stabilitas pantai. Terumbu karang merupakan ekosistem yang dinamis, namun sensitif dan rentan terhadap perubahan kondisi lingkungan. Perubahan kondisi lingkungan yang merupakan akibat dari aktivitas manusia maupun kejadian alam telah memberikan dampak kerusakan yang luas

bagi terumbu karang. Secara alami, terumbu karang akan merespon dengan berusaha untuk bertahan dari perubahan dan tekanan lingkungan dengan menunjukkan gejala pemulihan hingga terbentuknya komunitas yang stabil setelah mengalami kerusakan. Akan tetapi, tekanan lingkungan yang terus menerus terjadi akan menyebabkan terumbu karang mengalami kematian apabila terumbu karang memiliki daya pulih yang lambat. Salah satu penyebab kematian karang yaitu pemutihan karang (Rizal et al., 2016).

Kejadian pemutihan (*bleaching*) merupakan fenomena umum yang dapat terjadi pada terumbu karang. Namun, kejadian *bleaching* secara besar-besaran merupakan gejala yang tidak umum terjadi pada terumbu karang. Salah satu pemicu terjadinya *bleaching* adalah naiknya suhu air laut. Hal ini berbeda dengan pemutihan dalam skala kecil yang sering terjadi akibat tekanan langsung dari aktivitas manusia yang berpengaruh pada karang dalam skala kecil yang terlokalisasi. Perubahan iklim yang menyebabkan naiknya suhu rata-rata menyebabkan karang menjadi subjek yang akan mengalami pemutihan dan menjadi ancaman bagi seluruh terumbu karang yang ada di seluruh dunia (Rudi, 2012).

Pemutihan karang pertama kali dilaporkan terjadi di wilayah *Great Barrier Reef*, Australia. Tercatat pada tahun 1998 hampir seluruh perairan tropis dunia mengalami kejadian *coral bleaching* yang diikuti dengan kematian massal koloni karang. Matinya koloni karang sebagai akibat dari keluarnya *Zooxanthellae* dari dalam jaringan tubuh karang secara permanen. *Zooxanthellae* merupakan alga uniseluler yang berfungsi sebagai simbiosis bagi hewan karang. Pemutihan karang dapat menyebabkan kerusakan ekosistem laut yang signifikan. Ketika karang

mengalami pemutihan, karang tidak dapat lagi membangun terumbu karang sehingga akan berimplikasi terhadap kerusakan habitat ikan, udang, maupun spesies lainnya yang bergantung hidup pada terumbu karang (Hoegh-Guldberg, 1999).

Tercatat pada tahun 1983, 1987, 1991, 1994, 2002, 2003, dan 2007 merupakan tahun terjadinya pemutihan karang di *French Polynesia*. Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh (Utari, 2020) pada wilayah *Great Barrier Reef*, Australia menunjukkan bahwa pemutihan karang yang dipengaruhi oleh *Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA)*, ENSO, dan salinitas. Penelitian lain yang dilakukan oleh (Indriani, 2020) dengan data osean atmosfer pada rentang tahun 2000-2019 di Karibia menunjukkan bahwa pemutihan terumbu karang dipengaruhi oleh *sunspot number*, salinitas, *Pacific Decadal Oscillation (PDO)*, dan *Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA)*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui faktor lingkungan yang signifikan mempengaruhi pemutihan karang (*coral bleaching*) di wilayah *French Polynesia*.

I.2 Ruang Lingkup

Penelitian ini dibatasi oleh analisis data kejadian pemutihan (*bleaching*) pada terumbu karang dalam rentang waktu 1980-2020 dengan menggunakan data *severity code* (rentang kode pemulihan) dan data faktor lingkungan untuk melihat pengaruh faktor lingkungan terhadap kejadian *coral bleaching* di *French Polynesia*. Analisis model statistik yang digunakan adalah model *Multiple Regression* dengan metode *Stepwise Linear Regression (SLR)*. Untuk mengukur keakuratan model kejadian dan faktor lingkungan signifikan yang berpengaruh pada *coral bleaching* di wilayah *French Polynesia* digunakan korelasi *pearson* dan *RMSE*.

I.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana memodelkan kejadian *coral bleaching* di *French Polynesia* berdasarkan kondisi parameter lingkungan signifikan dengan menggunakan metode *Stepwise Linear Regression (SLR)*?
2. Bagaimana verifikasi model kejadian *coral bleaching* di *French Polynesia* yang dikembangkan menggunakan korelasi *pearson* dan *RMSE*?

I.4 Tujuan Penelitian

1. Untuk memodelkan kejadian *coral bleaching* di *French Polynesia* berdasarkan kondisi parameter lingkungan signifikan dengan menggunakan metode *Stepwise Linear Regression (SLR)*.
2. Untuk verifikasi model kejadian *coral bleaching* di *French Polynesia* yang dikembangkan menggunakan korelasi *pearson* dan *RMSE*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Terumbu Karang

Salah satu ekosistem laut yang penting dan menjadi sumber kehidupan bagi biota laut adalah ekosistem terumbu karang. Ekosistem terumbu karang terbentuk dari 480 spesies karang yang didalamnya hidup lebih dari 1650 spesies ikan, *mollusca*, *crustacea*, *sponge*, dan alga. Terumbu karang adalah endapan kalsium karbonat yang merupakan hasil dari hewan karang *cnidaria* yang bersimbiosis dengan *Zooxanthellae*. Pembangun utama dalam ekosistem terumbu karang adalah karang. Sebagian besar karang merupakan binatang-binatang kecil yang disebut polip. Polip karang terdiri dari filamen mesentri dan tentakel yang memiliki sel nematosis (penyengat) berguna untuk melumpuhkan musuhnya. Pada tubuh polip terdapat dua lapisan yaitu *eksoderm* dan *endoderm* dengan jaringan berbentuk mesogela yang berada di antara keduanya. Pada lapisan *endoderm*, polip hidup bersimbiosis dengan *Zooxanthellae* yang merupakan tumbuhan yang membantu dalam melakukan prose fotosintesis (Arisandi et al., 2018).

Pada umumnya, terumbu karang mendapatkan makanan melalui dua cara. Pertama, terumbu karang akan menggunakan tentakel dan menangkap plankton. Kedua, terumbu karang mendapatkan makanan melalui *Zooxanthellae* yang hidup pada jaringan karang. Dalam satu jenis karang dapat hidup beragam jenis *Zooxanthellae* yang biasanya ditemukan dalam jumlah besar dalam setiap polip. *Zooxanthellae* akan hidup bersimbiosis dan memberikan warna pada polip serta 90% kebutuhan karbon polip. *Zooxanthellae* akan memberikan sebanyak 95% dari hasil

fotosintesisnya yang berupa energi dan nutrisi kepada karang dan mendapatkan tempat hidup serta nutrisi penting dari karang (Rizal et al., 2016).

Ekosistem terumbu karang dapat ditemukan di lingkungan perairan yang dangkal, seperti di gugusan pulau kecil dan paparan benua. Terumbu karang merupakan ekosistem pesisir yang paling dominan di daerah tropis dan terletak di sepanjang garis pantai. Pertumbuhan maksimum terumbu karang sangat bergantung pada kondisi perairan yang jernih, suhu perairan yang hangat, gelombang yang besar, sirkulasi air yang lancar dan terhindar dari sedimentasi. Variasi pertumbuhan koloni karang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan perairan seperti intensitas cahaya, gelombang dan arus, sedimen, dan faktor genetik. Kondisi lingkungan sangat mempengaruhi populasi karang yang mendominasi di suatu habitat. Daerah rata-rata pada umumnya akan didominasi oleh jenis karang kecil, lereng terumbu akan ditumbuhi oleh karang bercabang, dan daerah terumbu luar yang berarus akan didominasi oleh karang massif (Uar et al., 2016).

Umumnya penggolongan karang dibedakan menjadi dua yaitu karang lunak (*soft coral*) dan karang keras (*hard coral*). Karang lunak (*soft coral*) adalah karang yang tidak memiliki rangka kalsium yang keras, sehingga karang ini akan terasa lembut dan fleksibel. Karang lunak memiliki 8 tentakel yang berfungsi untuk menangkap plankton dan partikel makanan lainnya dan akan melambai ketika area sekitarnya disapu. Contoh dari karang lunak adalah *leather coral* (*Sarcophyton* sp.) Karang keras (*hard coral*) adalah organisme karang yang terdiri dari polip kecil yang menghasilkan kerangka kapur yang keras, memiliki jumlah tentakel lebih dari 8 pada tentakel yang memiliki polip, dan permukaan kasar seperti kertas pasir.

Karang keras dapat ditemukan di perairan laut tropis dan subtropis di seluruh dunia. Lingkungan yang diperlukan oleh karang keras adalah lingkungan air laut yang kaya akan nutrisi dan cahaya matahari serta membutuhkan suhu air yang hangat dan stabil. Contoh dari terumbu karang keras adalah *Acropora sp.*, *Porites sp.*, dan *Pocillopora sp.* Berdasarkan pembentuknya, karang dibedakan menjadi dua yaitu karang hermatifik yang merupakan karang pembentuk terumbu karang dan karang ahermatifik yang merupakan karang bukan pembentuk terumbu karang. Karang hermatifik adalah karang yang memiliki simbiosis *algae* di jaringan tubuhnya dan tumbuh di daerah hangat dengan intensitas penyinaran yang cukup. Karang ahermatifik adalah karang yang tidak memiliki simbiosis dan dapat tumbuh dan berkembang di berbagai daerah. Perbedaan dasar antara karang hermatifik dan karang ahermatifik adalah kemampuan dalam membentuk terumbu dimana karang jenis hermatifik dapat mendeposit kapur jauh lebih cepat dibandingkan dengan karang jenis ahermatifik (Nabil, 2019).

Selain itu, terumbu karang juga dapat dibedakan menjadi 3 tipe berdasarkan pertumbuhan dan hubungan dengan daratan yaitu terumbu karang tepi (*fringing reef*), terumbu karang penghalang (*barrier reef*), dan terumbu karang cincin (*atol*). Terumbu karang tepi (*fringing reef*) adalah terumbu karang yang mayoritas berada di daerah pesisir pantai hingga kedalaman 40 meter yang tumbuh ke atas dan mengarah ke laut lepas serta akan berkembang mengelilingi pulau. Terumbu karang penghalang (*barrier reef*) merupakan terumbu karang yang relatif lebih jauh dari pulau dan mengarah ke laut lepas dengan kedalaman 75 meter. Umumnya, terumbu karang penghalang (*barrier reef*) berada di sekitar pulau yang besar dan akan

membentuk gugusan pulau karang yang terputus-putus. Terumbu karang cincin (*atol*) adalah terumbu karang yang berbentuk cincin yang mengelilingi batas dari pulau vulkanik yang tenggelam sehingga tidak memiliki perbatasan dengan daratan. Terumbu karang cincin menjadi proses lanjutan dari terumbu karang penghalang dengan kedalaman rata-rata 45 meter (Bengen dan Retraubun, 2012).

Terumbu karang sangat berguna bagi kehidupan manusia diantaranya bisa meredam kerusakan pantai yang diakibatkan oleh ombak ataupun abrasi. Keberadaan terumbu karang dalam suatu tempat akan menunjang terjadinya siklus kehidupan organisme bawah air yang saling bekerja sama menjadi produktivitas biologi dan ekologi perairan pantai. Akan tetapi, saat ini terumbu karang telah mengalami kerusakan ekosistem yang terjadi di berbagai belahan dunia. Sebagian besar kerusakan terumbu karang terjadi akibat adanya aktivitas manusia seperti penangkapan ikan menggunakan bahan peledak, racun, serta penggunaan alat tangkap lainnya yang tidak ramah lingkungan. Selain aktivitas manusia, ancaman lainnya yang lebih potensial dalam kerusakan terumbu karang yaitu adanya fenomena pemanasan global yang menaikkan suhu permukaan perairan, sehingga terumbu karang akan mengalami pemutihan karang (*coral bleaching*). Saat terumbu karang mengalami pemutihan (*bleaching*), terumbu karang akan mati dan berubah secara cepat menjadi abu-abu kecoklatan yang pupus seiring dengan perkembangan alga yang menutupi terumbu karang. Dalam dampak yang lebih parah, alga dalam terumbu karang yang telah mati akan berkembang secara luas dan dapat mencegah rekolonisasi karang baru dan merubah pola keanekaragaman jenis karang dan restrukturisasi komunitas terumbu karang (Pasanea, 2013).

II.2 Coral bleaching

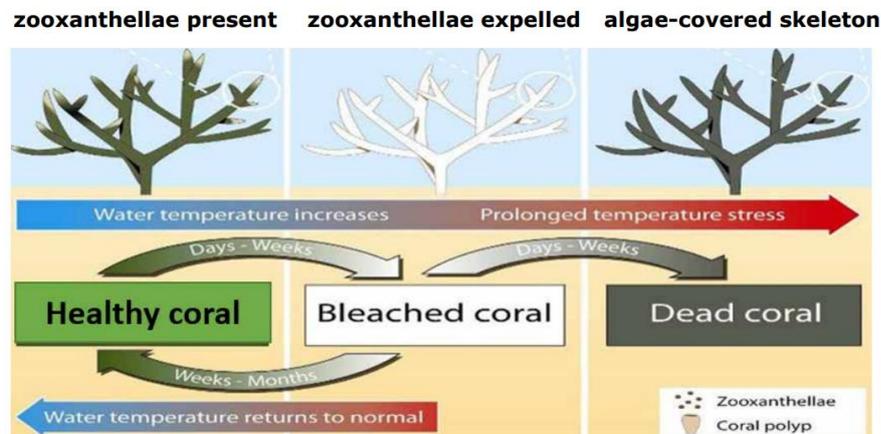
Pemanasan global telah memberikan dampak nyata dalam penurunan keanekaragaman hayati laut. Salah satu yang terkena dampak yaitu ekosistem terumbu karang dari jenis hermatifik yaitu karang pembentuk bangunan atau kerangka karang dari kapur sebagai hasil fotosintesis jutaan alga *Zooxanthellae* yang hidup bersimbion dengan jaringan tubuh hewan karang. Terumbu karang merupakan komunitas biologis yang berkembang dengan optimal pada suhu perairan 25°C-29°C dan sangat rentan terhadap perubahan temperatur perairan. Temperatur perairan merupakan salah satu faktor yang pengontrol pertumbuhan dan perkembangan karang, sehingga kenaikan 1°C akan sangat berpengaruh pada polip karang dan apabila berlangsung dalam kurun waktu yang lama akan menyebabkan lepasnya alga *Zooxanthellae* dalam tubuh hewan karang. Selama peristiwa pemutihan karang (*coral bleaching*) hewan karang akan mengalami kehilangan 60% hingga 90% dari jumlah alga *Zooxanthellae* dan alga *Zooxanthellae* yang tersisa dapat kehilangan 50% hingga 80% pigmen fotosintesisnya (Latuconsina, 2010).

Terumbu karang di seluruh dunia telah mengalami tingkat stress akibat adanya perubahan iklim antropogenik. Ekosistem terumbu karang secara luas dianggap sebagai salah satu ekosistem yang paling terancam. Peningkatan suhu permukaan laut memicu peristiwa pemutihan massal yang dianggap sebagai ancaman terbesar bagi terumbu karang karena mengakibatkan matinya karang secara substansial dan mengancam keberlangsungan karang sebagai pembangun kerangka yang relevan secara ekologis. Pemutihan karang akan memberikan efek negatif pada hasil

reproduksi karang. Koloni yang mengalami pemutihan akan menunjukkan indikasi dengan jumlah maupun ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan koloni pada umumnya. Peristiwa pemutihan massal biasanya teramati apabila peningkatan suhu air dan tingginya paparan radiasi matahari terjadi bersamaan. Peristiwa pemutihan karang diproyeksikan akan meningkat baik itu frekuensi maupun tingkat keparahannya (Leinbanch, et al., 2021).

Pemutihan karang (*coral bleaching*) adalah peristiwa hilangnya warna pada karang akibat hilangnya sebagian maupun seluruh *Zooxanthellae* ataupun degradasi pigmen fotosintesis *Zooxanthellae*. Peristiwa pemutihan karang massal telah terjadi berkali-kali dan dilaporkan dari berbagai lokasi di seluruh dunia. Selama tiga dekade terakhir, peristiwa pemutihan maupun kematian karang dilaporkan dengan frekuensi yang meningkat dan menjadi ancaman nyata bagi terumbu karang. Pada peristiwa pemutihan karang yang terjadi di tahun 1998 diperkirakan telah menghilangkan 16% karang hidup di dunia. Keparahan pemutihan karang bervariasi sesuai dengan kondisi lingkungan, paparan, maupun kondisi hidrodinamik lainnya. Respon karang terhadap pemutihan juga berbeda-beda. Hal ini diakibatkan oleh komposisi taksonomi karang yang memegang peran penting dalam peristiwa pemutihan. Tingkat kerentanan antar spesies akan berbeda-beda begitupula dengan tingkat pemulihannya. Pemeriksaan pemutihan karang biasanya dilakukan pada skala spasial regional (10 km-100 km) ataupun lokal (1 km-10 km). Pemeriksanaan ini akan mempertimbangkan seluruh karang dari sisi kerentanan, kematian, maupun penurunan tingkat tutupan karang sehingga penyebab seperti cuaca, sirkulasi, maupun tekanan lingkungan baik itu sedimentasi maupun polutan

antropogenik dapat digunakan dalam memahami bagaimana kedua hal ini sangat berkaitan erat dalam pemutihan dan pemulihan karang (Carroll et al., 2016).



Gambar 2.1 Mekanisme Pemutihan Karang (Obura et al., 2017)

Salah satu wilayah yang terdampak pada pemutihan karang adalah *French Polynesia* yang teramati terjadi pada tahun 1983, 1987, 1991, 1994, 2002, 2003, 2007, dan 2016. Penurunan besar pada tutupan karang terjadi setelah peristiwa pemutihan yaitu sekitar 50% pada tahun 1991 dan beberapa tutupan karang dapat pulih sebelum gangguan terjadi lagi. Tingkat kehilangan karang terbesar terjadi pada tahun 1991 dan 2007 yang bertepatan dengan peristiwa siklon maupun wabah yang menyerang karang. Untuk tahun lainnya, adanya pemutihan karang tetap tercatat akan tetapi untuk kehilangan karang sudah dapat diminimalisir. Respon yang diberikan karang terhadap pemutihan menurun selama peristiwa pemutihan berikutnya. Hal ini menunjukkan bahwa beberapa karang mampu melakukan aklimatisasi. Selain itu, kerentanan karang terhadap pemutihan juga bergantung pada spesies karang (Bambridge et al., 2019).

Untuk tahun berikutnya diperkirakan terumbu karang akan terkena anomali termal tahunan seperti yang telah terjadi pada tahun 1998 yang menyebabkan pemutihan

karang secara meluas di berbagai wilayah. Kemungkinan karang dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi lingkungan masih belum dapat dipastikan untuk keberlangsungan ekosistem yang didominasi oleh karang dalam jangka panjang. Pemutihan karang yang disertai dengan kematian akan memberikan tekanan yang kuat pada populasi dan komunitas karang. Jika karang dapat beradaptasi dengan pemanasan air laut maka dapat dilakukan perkiraan penurunan sementara pada koloni karang yang memutih ataupun mati pada suhu tertentu. Pada wilayah *French Polynesia* episode pemutihan karang telah terjadi setiap 2-5 tahun sejak 1991 sesuai dengan anomali suhu positif signifikan yang tercatat (Pratchett et al., 2013).



Gambar 2.2 Pemutihan karang jenis *Acropora* di *French Polynesia* pada akhir musim panas tahun 2007 (Pratchett et al., 2013)

Suhu permukaan laut yang tinggi serta radiasi sinar ultraviolet matahari sangat mempengaruhi psikologi karang dan menimbulkan efek pemutihan karang. Gabungan dari dua dampak ini dapat mempercepat terjadinya pemutihan karang (*coral bleaching*) dengan mengalahkan mekanisme alami karang untuk melindungi diri dari sinar matahari yang berlebihan. Keadaan pemutihan karang yang berlangsung lebih dari 10 minggu dapat menyebabkan kematian polip pada karang. Faktor lainnya yang mempengaruhi keberlangsungan pertumbuhan terumbu karang

adalah adanya pencemaran perairan laut, sedimentasi, penggunaan lahan yang tidak terencana, dan eksploitasi sumber daya laut yang tidak terkendali yang dapat memicu terjadinya pemutihan pada karang. Perlindungan pada karang yang telah mengalami kerusakan sangat diperlukan apabila keinginan memiliki ekosistem terumbu karang yang berada pada tingkat pemulihan yang maksimal. Perlindungan ini termasuk dalam usaha mengurangi dampak faktor antropogenik yang dapat mengakibatkan kerusakan terumbu karang (Salim, 2012).

II.3 Parameter Lingkungan

Terumbu karang terancam oleh berbagai jenis gangguan antropogenik dan alami lokal dengan skala besar yang menyebabkan kematian yang meluas pada karang pembentuk terumbu. Ancaman eksternal yang teridentifikasi dalam proses pemutihan karang adalah peningkatan suhu air laut, wabah ataupun penyakit karang, dan peristiwa iklim ekstrim. Selain itu, ancaman lain dalam skala lokal yang juga berpengaruh dalam kesehatan karang adalah sedimentasi, polusi, dampak industri, penangkapan ikan, dan aktivitas manusia lainnya yang berpotensi dalam kerusakan terumbu karang (Bambridge et al., 2019).

II.3.1 Jarak Karang ke Daratan Terdekat

Jarak karang dari daratan berpengaruh terhadap pemutihan karang. Karang yang terletak lebih dekat dengan daratan cenderung lebih rentan terhadap polusi aliran limbah dan polutan dari aktivitas manusia. Karang yang terletak lebih dekat ke daratan memiliki kemungkinan yang lebih tinggi mengalami pemutihan karang dibandingkan dengan karang yang terletak lebih jauh dari daratan. Hal ini berkaitan erat dengan tingginya tingkat nutrien dari aliran sungai yang mengalir ke laut dan

mempengaruhi kualitas air laut. Kualitas air laut yang buruk memicu terjadinya pemutihan karang. Selain itu, aktivitas manusia juga berpengaruh dalam pemutihan karang dengan posisi dekat dengan daratan (Sukmara et al., 2001).

II.3.2 Paparan

Paparan angin maupun cahaya matahari berpengaruh dalam pemutihan karang. Paparan terhadap karang dibagi dalam 3 kategori paparan yaitu, nilai 0 apabila karang berada pada posisi yang terlindungi, nilai 1 apabila karang berada pada posisi tidak terlindungi maupun tidak terpapar selama musim siklon, dan nilai 2 menunjukkan posisi karang yang terpapar angin kuat, suhu yang tinggi, serta menunjukkan potensi terpapar selama musim siklon. Paparan sinar matahari membuat suhu air laut meningkat. Suhu air laut yang tinggi dengan intensitas paparan yang lama akan merusak membran fotosintesis dan mitokondria *Zooxanthellae* (Kritiyasari, et al., 2021).

II.3.3 Kekeruhan

Kondisi lingkungan perairan dapat menentukan pertumbuhan terumbu karang. Ekosistem terumbu karang sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan hidup terutama pada suhu, salinitas, sedimentasi, eutrofikasi, dan aktivitas lainnya yang berpengaruh pada kualitas perairan. Kekeruhan air laut disebabkan oleh partikel seperti tanah, pasir atau plankton yang ada pada laut. Kekeruhan air laut menyebabkan intensitas cahaya matahari yang diterima oleh karang akan berkurang karena partikel pada kekeruhan air laut dapat menyerap dan memantulkan cahaya. Intensitas cahaya minim akan berpengaruh dalam proses fotosintesis sehingga karang akan mengalami stress dan dapat memutih. Kekeruhan air laut juga dapat

berpengaruh dalam kualitas air laut. Limbah industri yang mengandung bahan kimia seperti nitrogen dan fosfor dapat memicu pertumbuhan alga yang berlebihan. Apabila pertumbuhan alga yang berlebihan terjadi disekitar terumbu karang, maka alga tersebut akan mengurangi akses cahaya dan oksigen yang dibutuhkan karang dalam berfotosintesis (Barus et al., 2018).

II.3.4. Frekuensi Siklon

Gelombang tinggi serta angin yang kencang merupakan akibat dari siklon yang terjadi. Gelombang yang tinggi dapat menyebabkan pecahnya karang bahkan pencabutan karang dari dasar laut. Angin yang kencang dapat memicu terjadinya erosi pada pantai sehingga pasir dan kerikil dapat menumpuk pada terumbu karang dan mengurangi sumber cahaya dan oksigen yang diperlukan oleh karang. Selain itu, siklon tropis juga dapat mempengaruhi suhu air laut disekitar terumbu karang. Siklon tropis biasanya diikuti dengan penurunan suhu air laut yang signifikan sehingga dapat menyebabkan *bleaching* pada terumbu karang. Dalam periode waktu yang panjang, frekuensi siklon tropis dapat mengurangi keanekaragaman hayati pada terumbu karang karena beberapa jenis karang rentan terhadap kerusakan oleh siklon tropis (Van Woesik dan Kratochwill, 2022).

II.3.5 Kedalaman

Kedalaman karang dapat mempengaruhi pemutihan karang. Karang hidup dalam hubungan simbiosis dengan alga yang memberikan energi melalui fotosintesis. Karang memerlukan sinar matahari dalam melakukan fotosintesis sehingga karang yang berada dalam kedalaman yang lebih dalam akan mendapatkan cahaya matahari yang lebih sedikit. Ketika suhu air laut naik serta adanya perubahan kualitas perairan yang signifikan, maka alga akan mengalami kematian ataupun

meninggalkan karang. Kehilangan alga ini akan menyebabkan terjadinya pemutihan karang. Karang yang berada dalam posisi yang dalam dapat menyediakan perlindungan dari perubahan suhu serta memberikan kualitas air yang lebih baik sehingga karang ini akan lebih kebal terhadap pemutihan karang. Proporsi karang yang mengalami pemutihan menurun sesuai dengan kedalaman posisi karang. Semakin bertambah kedalaman karang, maka kemungkinan pemutihan karang dapat berkurang (Pérez-Rosales et al., 2021).

II.3.6 Kecepatan Angin

Kecepatan angin yang tinggi dapat mempengaruhi suhu, kejernihan air serta kecepatan arus laut di sekitar terumbu karang. Angin kencang dapat meningkatkan evaporasi air laut dan mempercepat kenaikan suhu air laut. Kenaikan suhu dapat memicu pemutihan karang karena alga akan mati pada suhu yang terlalu tinggi. Kecepatan angin dapat mengurangi kejernihan air sehingga memicu adanya sedimentasi dan berpengaruh pada proses fotosintesis alga endosimbiotik karang. Selain itu, kecepatan angin juga berpengaruh pada kerusakan fisik terumbu karang seperti yang terjadi selama badai ataupun siklon tropis. Kerusakan ini dapat memperburuk kondisi karang dan membuat karang lebih rentan terhadap pemutihan. Dalam jangka panjang, peningkatan kecepatan angin terkait dengan perubahan iklim dapat memperburuk pemutihan dengan meningkatkan suhu air laut secara keseluruhan (Isdianto, 2022).

II.3.7 SST

Sea Surface Temperature (SST) adalah suhu permukaan laut yang diukur pada lapisan atas laut hingga kedalaman 1 meter. SST dapat diukur dengan menggunakan

berbagai metode seperti pengukuran langsung dengan termometer ataupun menggunakan satelit dan perangkat pengukur otomatis yang terpasang di laut. Dalam konteks perubahan iklim global, peningkatan suhu permukaan laut menjadi perhatian utama karena dapat memicu pemutihan pada karang dan mempengaruhi kehidupan hewan laut. Kenaikan suhu air laut dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti sinar matahari, curah hujan, arus laut, angin, dan pergerakan pasang surut. Perubahan suhu air laut akan berpengaruh pada pola pergerakan hewan laut. Suhu air laut berperan penting dalam menentukan iklim dan cuaca sehingga kehidupan yang menjadikan laut sebagai sumber daya akan terpengaruh. Suhu permukaan air laut biasanya berkisar 27°C - 29°C di daerah tropis dan 15°C - 20°C di daerah subtropis. Penyimpangan dari kondisi rata-rata suhu permukaan laut pada lokasi dan waktu tertentu disebut dengan *Sea Surface Temperature Anomaly (SSTA)*. SSTA menunjukkan suhu yang lebih hangat maupun dingin pada permukaan laut. Beberapa anomali suhu permukaan laut hanyalah peristiwa sementara dan tidak menjadi pola ataupun tren tertentu. Penelitian yang dilakukan oleh Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) pada tahun 2018 menunjukkan bahwa peningkatan suhu air laut yang berhubungan dengan perubahan iklim menjadi faktor yang menyebabkan terjadinya pemutihan karang. Selain itu, studi yang dilakukan oleh Nature pada tahun 2018 menunjukkan bahwa suhu air laut yang tinggi dapat mempercepat pertumbuhan bakteri yang menyebabkan penyakit pada karang seperti *white syndrome*. Dampak gabungan dari tingginya SST dan tingginya paparan sinar matahari dapat mempercepat proses pemutihan sehingga mekanisme alami yang dimiliki oleh karang untuk melindungi diri dari sinar matahari akan terganggu (Shlesinger dan Van Woesik, 2023).

II.3.8 TSA

Perubahan tekanan termal yang nyata telah terjadi di sejumlah lokasi terumbu karang sejak tahun 1980-an yang seiring dengan peningkatan suhu darat dan laut global. Pada tahun 2011-2017, terumbu karang mengalami tekanan termal yang lebih besar daripada tahun 2000 dengan setiap dekade sejak tahun 1980 lebih hangat dari dekade sebelumnya. Tekanan termal dengan intensitas tinggi dan durasi yang lama menyebabkan pemutihan hingga kematian terumbu karang, sehingga akan menunjukkan degradasi kesehatan terumbu karang. Eskalasi tekanan termal diperkirakan paling besar terjadi pada wilayah Asia Tenggara. Terumbu karang hidup dengan batas termal sehingga akan rentan terhadap suhu laut. Tekanan termal yang dihasilkan dapat menyebabkan kerusakan simbiosis karang-alga dan menyebabkan terjadinya pemutihan karang. Hubungan yang menguntungkan antara hewan karang dan tumbuhan mikroskopis *Zooxanthellae* merupakan dasar dari ekosistem terumbu karang. Hilangnya ganggang yang menjadi pigmen fotosintetik dalam memberikan warna karang akan menyebabkan jaringan karang dan kerangka menjadi putih (Harman, et al., 2022).

Thermal Stress Anomaly (TSA) dan *Sea Surface Temperature (SST)* merupakan dua istilah yang sering digunakan dalam memahami suhu air laut namun memiliki perbedaan yang signifikan. SST merupakan ukuran suhu laut di permukaan, sedangkan TSA adalah ukuran perbedaan suhu aktual laut dengan suhu normal pada waktu dan tempat tertentu yang berpengaruh pada tekanan termal pada organisme. Kedua hal ini merupakan indikator yang penting dalam memahami suhu laut serta dampaknya pada lingkungan laut seperti yang terjadi pada kejadian *coral bleaching* di wilayah *French Polynesia* (Lough et al., 2018).

II.4 Model *Multiple Regression* (MR)

Analisis regresi merupakan salah satu teknik statistik yang digunakan dalam memperkirakan hubungan antar variabel yang memiliki hubungan sebab dan akibat. Persamaan regresi menggambarkan hubungan antara variabel yang ada didalamnya. Nilai variabel terikat dinyatakan oleh Y dan nilai variabel bebas dinyatakan dalam X. Regresi dikatakan linear apabila hubungan antara variabel terikat dan variabel bebasnya adalah linear, sedangkan regresi dikatakan non linear apabila hubungan antara variabel terikat dan variabel bebasnya tidak linear. Terdapat 6 jenis analisis regresi linear dalam statistik yaitu regresi linear sederhana, regresi linear berganda, regresi logistik, regresi ordinal, regresi multinomial, dan analisis diskriminan. Model regresi dengan satu variabel terikat dan lebih dari satu variabel bebas disebut regresi berganda (*Multiple Regression*). Regresi mampu mendeskripsikan fenomena data melalui terbentuknya suatu model hubungan yang bersifat numerik. Model regresi dapat dimanfaatkan dalam melakukan prediksi untuk variabel terikat. Prediksi dalam konsep regresi dilakukan dalam rentang data dari variabel-variabel bebas yang digunakan untuk membentuk model regresi (Uyanik dan Guler, 2013).

Multiple Regression (MR) dapat dirumuskan sebagai berikut (Kutner et al., 2004):

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

Y : Variabel Terikat / Hasil Regresi

X₁, X₂ ,X_n: Variabel Bebas / Prediktor

a : Konstanta

b₁, b₂, b_n : Koefisien Regresi

Dalam menentukan nilai a, b₁, b₂, digunakan metode kuadrat terkecil (*Least Square*) yang dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum X_1}{n} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{\sum X_2}{n} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{n} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$b_1 = \frac{(\sum X_2^2)(\sum X_1 Y) - (\sum X_1 X_2)(\sum X_2 Y)}{(\sum X_1^2)(\sum X_2^2) - (\sum X_1 X_2)^2} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$b_2 = \frac{(\sum X_1^2)(\sum X_2 Y) - (\sum X_1 X_2)(\sum X_1 Y)}{(\sum X_1^2)(\sum X_2^2) - (\sum X_1 X_2)^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana:

$\bar{X}_1 \bar{X}_2$: Jumlah Rata-rata Variabel Bebas / Prediktor

\bar{Y} : Jumlah Rata-rata Variabel Terikat/ Hasil Regresi

n : Jumlah Data

Dalam metode *Multiple Regression* dibagi menjadi 3 yaitu *forward selection*, *backward elimination*, dan *stepwise regression*. Ketiga metode tersebut dapat dikategorikan dalam prosedur bertahap. *Forward selection* adalah metode yang dilakukan dengan mengeliminasi prediktor berdasarkan korelasi parsial terbesar. *Backward elimination* adalah metode dengan memasukkan dan mengeliminasi prediktor hingga tersisa prediktor signifikan. *Stepwise regression* adalah metode yang menjalankan regresi berganda beberapa kali dan mengeliminasi variabel yang berkorelasi lemah hingga menyisakan variabel-variabel yang menjelaskan distribusi dengan baik. Metode *stepwise regression* merupakan kombinasi dari *forward selection* dan *backward elimination*. (Ghani dan Ahmad, 2010).

II.5 Verifikasi Prediksi

Proses membandingkan hasil prediksi dengan nilai pengamatan/observasi sebelumnya disebut dengan verifikasi. Secara sederhana, verifikasi dapat diartikan sebagai proses menilai kualitas suatu prediksi (*forecast*). Dalam proses verifikasi, perlu dilakukan secara kualitatif terlebih dahulu dengan menampilkan gambar-gambar hasil prediksi dengan nilai observasi (*data*). Kualitatif diperlukan untuk melihat kesesuaian (*visual-“eyeball”*) antara hasil prediksi dan observasi. Verifikasi dilakukan untuk memantau (*monitor*), meningkatkan (*improve*), dan membandingkan (*compare*). Pertama, memantau (*monitor*) akurasi prediksi dengan meninjau apakah prediksi tersebut semakin lama semakin baik. Kedua, untuk meningkatkan (*improve*) kualitas prediksi dengan menyelidiki kesalahan apa yang mungkin dilakukan selama memprediksi. Ketiga, untuk membandingkan (*compare*) hasil-hasil prediksi dengan berbagai model dalam memprediksi besaran/fenomena yang sama. Hasil perbandingan akan menemukan model yang lebih unggul dibanding dengan model-model lainnya serta memberikan letak keunggulan model tersebut (Halide, 2009).

II.5.1 Korelasi *Pearson*

Korelasi *pearson* merupakan korelasi sederhana yang melibatkan satu variabel terikat (*dependen*) dan satu variabel bebas (*independen*). Korelasi *pearson* menghasilkan koefisien korelasi yang berfungsi untuk mengukur kekuatan hubungan linear antara dua variabel. Pada umumnya korelasi *pearson* digunakan untuk mengetahui tingkat keeratan hubungan antara dua variabel ataupun dua fitur objek. Koefisien korelasi juga dapat digunakan sebagai ukuran yang dipakai untuk

mengetahui derajat hubungan antar variabel-variabel. Koefisien korelasi dapat dinyatakan dalam (Miftahuddin et al., 2021):

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{\{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2\} \{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2\}}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dengan:

n : Jumlah Data

R : Koefisien Korelasi antara Data Observasi dan Data Prediksi

x_i : Data Observasi

y_i : Data Prediksi

Nilai koefisien korelasi berada pada rentang negatif 1 hingga positif 1 yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Kriteria Korelasi Pearson (Miftahuddin, et al., 2021)

Nilai r	Interpretasi
0.00-0.199	Sangat Rendah
0.20-0.399	Rendah
0.40-0.599	Sedang
0.60-0.799	Kuat
0.80-1.000	Sangat Kuat

II.5.2 Root Mean Square Error (RMSE)

Nilai *Root Mean Square Error (RMSE)* adalah nilai yang diperoleh dengan cara menghitung nilai akar dari rata-rata kuadrat dari nilai kesalahan yang menggambarkan selisih antara data observasi dengan nilai hasil prediksi. Nilai RMSE dapat dihitung dengan persamaan (Halide, 2009):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan:

Y_i : Data Observasi

\hat{Y}_i : Data Prediksi

n : Jumlah Data