

*Skripsi Geofisika*

**PEMODELAN PENGARUH FAKTOR LINGKUNGAN TERHADAP  
PEMUTIHAN KARANG (*CORAL BLEACHING*) DI FLORIDA KEYS**



**OLEH :  
MURMAJIDAH SABIR  
H061191015**

**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 FLORIDA KEYS**

**SKRIPSI**

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

**OLEH:**

**MURMAJIDAH SABIR  
H061191025**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2023**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PEMODELAN PENGARUH FAKTOR LINGKUNGAN TERHADAP  
PEMUTIHAN KARANG (*CORAL BLEACHING*) DI FLORIDA KEYS**

**Disusun dan Diajukan Oleh:**

**MURMAJIDAH SABIR**

**H061191025**

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**

**Pembimbing Pertama**



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



**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 : Murmajidah Sabir  
NIM : H061191025  
Departemen : Geofisika  
Judul Tugas Akhir : Pemodelan Pengaruh Faktor Lingkungan Terhadap  
Pemutihan Karang (Coral Bleaching) di  
Florida Keys

Menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar hasil karya saya sendiri dan belum pernah diajukan 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,



**Murmajidah Sabir**

## ABSTRAK

Terumbu karang merupakan suatu ekosistem perairan yang dihuni oleh berbagai organisme, namun terancam karena berbagai faktor. Salah satunya diakibatkan oleh faktor lingkungan yang menyebabkan kerusakan atau kematian karang yang dikenal dengan istilah pemutihan karang (*coral bleaching*). Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mengidentifikasi prediktor paling signifikan penyebab Pemutihan Karang di Florida Keys dengan menggunakan model *Multiple Regression* dengan metode *Stepwise Linear Regression*. Data *severity code* digunakan untuk melihat data observasi dan data prediksi yang digunakan terdiri dari 36 faktor lingkungan dengan 66 data pada 24 titik lokasi. Data diolah menggunakan *software Matlab* untuk mengetahui prediktor lingkungan yang paling signifikan kemudian melakukan verifikasi prediksi. Verifikasi untuk prediktor yang signifikan menggunakan Korelasi *Pearson* dan RMSE. Hasil yang diperoleh berupa tabel yang menunjukkan koefisien standar (beta) dan nilai signifikan prediktor serta model prediktor terbaik. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa terdapat lima prediktor signifikan yaitu SSTA maksimum, windspeed, frekuensi SSTA rata-rata, TSA dan climSST dengan nilai korelasi *pearson* sebesar 0.7596 dan nilai RMSE sebesar 0.5505. Dari lima prediktor tersebut diperoleh prediktor signifikan, yaitu prediktor SSTA maksimum dengan nilai koefisien standar (beta) tertinggi sebesar -0.51.

**Kata Kunci:** Pemodelan; Faktor Lingkungan; Pemutihan Karang; Florida Keys

## ABSTRACT

*Coral reefs are aquatic ecosystems filled with various organisms but are threatened due to various factors. One of them is caused by environmental factors that cause damage or death of corals, known as coral bleaching. This study aims to model and identify the most significant predictors of the causes of coral bleaching in the Florida Keys using the Multiple Regression model with the Stepwise Linear Regression method. The data severity code is used to view the observation data and the prediction data used consists of 36 environmental factors with 66 data at 24 location points. The data is processed using Matlab software to determine the most significant predictive environment and verify the predictions. Verification for significant predictors using Pearson Correlation and RMSE. The results are in the form of a table showing the standard coefficient (beta), the significant value of the predictor, and the best predictor model. Based on the results obtained, it can be interpreted that there are five significant predictors, namely maximum SSTA, wind speed, SSTA frequency mean, TSA, and climSST, with a pearson correlation value of 0.7596 and an RMSE value of 0.5505. Of the five predictors, a significant predictor was obtained, namely the maximum SSTA predictor with the highest standard coefficient (beta) of -0.51.*

**Keywords:** *Modeling; Environmental Factor; Coral Bleaching; Florida keys*

## KATA PENGANTAR

**“Bismillahirrahmaanirrahiim”**

Q.S Al Baqarah: 286 “Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya. Dia mendapat (pahala) dari (kebajikan) yang dikerjakannya dan dia mendapat (siksa) dari (kejahatan) yang diperbuatnya”.

*Alhamdulillahirobbil ‘alamin*, tiada kata yang pantas penulis ucapkan selain kata syukur kepada ALLAH SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pemodelan Pengaruh Faktor Lingkungan Terhadap Pemutihan Karang (*Coral Bleaching*) di Florida Keys”** sebagai syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) pada Program Sarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Geofisika Universitas Hasanuddin. Sholawat serta salam tidak luput untuk selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, keluarga, para sahabat beliau dan pengikutnya yang senantiasa mengikuti sunnah beliau hingga akhir zaman.

Skripsi ini penulis persembahkan untuk kedua orang tua penulis, **Ayahanda Drs. Sabir** dan **Ibunda Rukayyah Salam, S.Ag** yang tanpa lelah dengan penuh kasih sayang memanjatkan doa yang luar biasa serta memberikan dukungan baik moril maupun materil untuk penulis. Terima kasih atas pengorbanan dan kerja keras dalam mendidik penulis.

Penulis menyadari bahwa rampungnya penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan

ini dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak **Prof. Dr. H. Halmar Halide, M.Sc** selaku pembimbing utama dan Bapak **Saaduddin, M.Sc** selaku pembimbing pertama yang senantiasa membantu dan bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, nasehat, motivasi serta masukan-masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak **Dr. Muh. Hamzah Syahrudin, S.Si, M.T** dan Bapak **Dr. Erfan Syamsuddin, M.Si** selaku tim penguji yang telah memberikan saran, kritik serta masukan yang bersifat membangun kepada penulis dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak **Saaduddin, M.Sc** selaku penasehat akademik yang telah memberikan banyak nasehat, arahan serta segala kebaikan selama penulis menempuh studi.
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. Seluruh **Dosen Departemen Geofisika** yang telah memberikan dan membagikan banyak ilmu dan pengetahuan selama penulis menempuh studi.
7. Seluruh **Staff Pegawai** di Departemen Geofisika dan di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin yang telah memberikan bantuan kepada penulis dalam pengurusan administrasi studi.



8. Bapak **Andika, S.Si., M.Si** yang telah memberikan motivasi dan membantu penulis dalam memulai penelitian ini, telah memberkan saran dan ilmunya kepada penulis.
9. Bapak **Rizky Yudha P, S.ST** selaku pembimbing Kerja Praktik yang sangat baik, selalu memberikan motivasi dan ilmunya.
10. Kepada seluruh Guru-guru **MAN Enrekang, MTs Darul Falah Enrekang** , dan **SDN No. 36 Buntu Lamba** yang telah menanamkan pendidikan dan ilmu kepada penulis.
11. Partner skripsi **Nur Fatihah**, teman seperjuangan yang telah membantu dalam menyelesaikan masalah-masalah yang muncul dalam setiap pengerjaan penelitian ini.
12. Saudara terkasih **Mustaqimah Sabir** dan **Zulfa Dirza Sudirman** serta semua keluarga besar atas segala doa, dukungan moril, materil, cinta dan kasih sayang tulus yang senantiasa diberikan kepada penulis.
13. Teruntuk **Kharina Syah** dan **Rismayanti**, *my sources of laughter*. Terima kasih telah menjadi sahabat dalam mewarnai hari yang menerima penulis seindah bianglala.
14. Sahabat seperjuangan **Indah Nurul Fitrah, Aisyah Sri Rejeki, Yulianti, Sindi Yustin Linggi, Ananda Novia, Nur Afidah Alimuddin dan Liani Khairunnisa**. *I'm so thankful having you guys in my college life –and so on. Thank you so much for e-ve-ry-thing.*

15. Teman-teman seperjuangan **Geofisika 2019** yang telah memberikan banyak kebersamaan, senantiasa memberikan bantuan dan dukungan selama perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.
16. Teman-teman **HMGF 2019** yang telah berproses bersama sejak awal masa mahasiswa baru hingga saat ini.
17. Keluarga **KKNT Perhutanan Sosial Pinrang Gel.108 Posko 5, Ari, Judda, Mega, Adda, Atira, Anisa, dan Fadya** yang telah membagikan banyak canda dan tawa serta kenangan-kenangan baik yang tidak akan pernah terlupakan.
18. Teman-teman **SEG SC UNHAS** yang telah berusaha dan bekerja sama dalam melaksanakan program kerja.
19. Serta kepada semua pihak yang telah membantu penulis namun tidak sempat penulis sebutkan dalam skripsi ini, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik, penulis ucapkan terima kasih.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kata sempurna, sehingga dengan segala kerendahan hati penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun untuk memperbaiki kekurangan yang ada. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan semua pihak.

Makassar, Agustus 2023

Penulis

## DAFTAR ISI

|   |            |
|---|------------|
| <b>SAMPUL</b> .....                                 | <b>i</b>   |
| <b>HALAMAN JUDUL</b> .....                          | <b>ii</b>  |
| <b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....                     | <b>iii</b> |
| <b>PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....                    | <b>iii</b> |
| <b>ABSTRAK</b> .....                                | <b>v</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                               | <b>vi</b>  |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....                         | <b>vii</b> |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....                             | <b>xi</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                          | <b>xiv</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....                      | <b>1</b>   |
| I.1 Latar Belakang .....                            | 1          |
| I.2 Ruang Lingkup.....                              | 3          |
| I.3 Rumusan Masalah .....                           | 3          |
| I.4 Tujuan Penelitian .....                         | 3          |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....                | <b>4</b>   |
| II.1 Pemutihan Karang .....                         | 4          |
| II.2 Peristiwa Pemutihan Karang Florida Keys .....  | 8          |
| II.3 Faktor Lingkungan.....                         | 10         |
| II.3.1 Jarak .....                                  | 10         |
| II.3.2 Kekeruhan .....                              | 11         |
| II.3.3 Paparan.....                                 | 12         |
| II.3.4 Frekuensi Siklon.....                        | 13         |
| II.3.5 Kedalaman.....                               | 14         |
| II.3.6 Kecepatan Angin .....                        | 15         |
| II.3.7 Sea Surface Temperature (SST).....           | 17         |
| II.3.8 Thermal Stress Anomaly (TSA) .....           | 19         |
| II.4 Metode <i>Stepwise Linear Regression</i> ..... | 20         |
| II.5 Verifikasi Prediksi .....                      | 23         |
| II.5.1 Korelasi Pearson.....                        | 23         |
| II.5.2 <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE) .....   | 25         |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....          | <b>26</b>  |

|   |           |
|---|-----------|
| III.1 Lokasi Penelitian .....   | 26        |
| III.2 Alat dan Bahan .....  | 27        |
| III.2.1 Alat.....   | 27        |
| III.2.2 Bahan .....   | 27        |
| III.3 Prosedur Penelitian.....  | 29        |
| III.3.1 Tahap Persiapan dan Pengumpulan Data.....   | 29        |
| III.3.2 Tahap Pengolahan Data .....   | 29        |
| III.5 Bagan Alir Penelitian .....   | 31        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>  | <b>32</b> |
| IV.1 Hasil .....  | 32        |
| IV.1.1 Prediktor Signifikan Penyebab Pemutihan Karang .....                                 | 32        |
| IV.1.2 Kesesuaian Data Observasi dan Data Prediksi Terhadap <i>Coral Bleaching</i> .....    | 34        |
| IV.1.3 Diagram Tebar Data Observasi dan Data Prediksi Kejadian <i>Coral Bleaching</i> ..... | 35        |
| IV.1.4 Verifikasi Prediksi Model Statistik.....   | 37        |
| IV.1.4.1 Korelasi <i>Pearson</i> .....  | 38        |
| IV.1.4.2 <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE).....  | 38        |
| IV.2 Pembahasan.....  | 39        |
| <b>BAB V PENUTUP.....</b>   | <b>41</b> |
| V.1 Kesimpulan.....   | 41        |
| V.2 Saran .....   | 41        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>   | <b>42</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>  | <b>48</b> |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabel 2.1</b> Interpretasi dari Nilai R positif (hubungan searah) (Wilks, 2006).....         | 24 |
| <b>Tabel 2.2</b> Interpretasi dari Nilai R negatif (hubungan berlawanan)<br>(Wilks, 2006) ..... | 24 |
| <b>Tabel 4.1</b> Nilai Koefisien dan Signifikan Beberapa Prediktor .....                        | 32 |
| <b>Tabel 4.2</b> Kesesuaian Data Prediksi Terhadap Data Observasi Model<br>Terbaik .....        | 36 |

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| <b>Gambar 2.1</b> Mekanisme terumbu karang memutih (NOAA, 2016).....   | 4  |
| <b>Gambar 2.2</b> Perbandingan terumbu karang secara berdampingan, sebelum dan sesudah pemutihan (Credit : XL Catlin Seaview Survey) .....   | 5  |
| <b>Gambar 2.3</b> Peta sebaran pemutihan karang secara global. Prevalensi pemutihan karang disajikan sebagai persentase dari kumpulan karang yang memutih di 3,351 lokasi di 81 negara dari tahun 1998 hingga 2017. Lingkaran putih menunjukkan tidak ada pemutihan. Lingkaran berwarna menunjukkan pemutihan 1% (biru) hingga pemutihan 100% (kuning) (Sully et al., 2019)..... | 6  |
| <b>Gambar 2.4</b> Karang di Florida Keys menunjukkan tiga peristiwa pemutihan massal termasuk : a September 1987, b November 1997, c Februari 1998, dan d–g September 2014 (Manzello, 2015).....   | 9  |
| <b>Gambar 3.1</b> Wilayah penelitian (Florida Keys).....   | 26 |
| <b>Gambar 3.2</b> Bagan alir penelitian .....  | 31 |
| <b>Gambar 4.1</b> Model klasifikasi berdasarkan observasi dan prediksi kejadian pemutihan karang untuk semua prediktor .....   | 34 |
| <b>Gambar 4.2</b> Diagram tebar hasil prediksi terhadap observasi untuk mode SSTA Max, windspeed, SSTA FM, TSA dan climSST.....  | 36 |

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Terumbu karang merupakan suatu ekosistem perairan yang dihuni oleh berbagai organisme yang berasosiasi dengan karang dan membentuk zat kapur (Whitten et al., 1987). Terumbu karang dibentuk oleh aktivitas hewan karang meliputi simbiosis antara polip dengan alga *Zooxanthellae* dan organisme penghasil kapur lainnya. Salah satu penyusun ekosistem terumbu karang adalah karang yang termasuk *Subphylum Cnidaria*, kelas *Anthozoa*, ordo *Scleractinia*. Ekosistem terumbu karang terdapat di lingkungan pesisir yang banyak ditemui di daerah tropis dan terletak di sepanjang garis pantai (Anderson, 1999). Terumbu karang dan segala kehidupan yang terdapat di dalamnya merupakan salah satu kekayaan alam yang bernilai tinggi (Uar et al., 2016). Namun di sisi lain terumbu karang juga merupakan salah satu ekosistem yang terancam karena berbagai faktor yang menyebabkan fungsi dan peranannya berkurang. Salah satunya diakibatkan oleh faktor lingkungan yang menyebabkan kerusakan atau kematian karang yang dikenal dengan istilah pemutihan karang (*coral bleaching*) (Wouthuyzen et al., 2015).

Pemutihan karang tahun 1998 adalah kejadian yang paling luas secara geografis dan parah dalam catatan sejarah. Peristiwa ini menyebabkan kematian yang signifikan di seluruh dunia (Wilkinson et al., 1999; Hoegh-Guldberg, 1999). Pada periode tersebut, untuk pertama kalinya, terumbu karang di setiap wilayah di dunia terkena dampak pemutihan yang parah. Salah satu peristiwa pemutihan karang

yang mengalami peningkatan frekuensi secara signifikan terjadi di Florida Keys. Pada tahun 1911, 1961, 1973, dan 1983, peristiwa pemutihan karang hanya terjadi di beberapa titik jalur terumbu, sedangkan peristiwa pertama yang mencakup seluruh jalur terumbu terjadi pada tahun 1987 dalam 25 tahun terakhir. Selain itu, peristiwa pemutihan pada tahun 1980-an terbatas pada jalur terumbu lepas pantai, sedangkan pada tahun 1990 *hydrocorals* (*Millepora* spp.) pada terumbu karang datar (*patch reefs*) di dekat pantai dan jalur terumbu bagian luar memutih (Causey, 2001). Peristiwa pemutihan yang paling luas dan parah telah terjadi sejak tahun 1997, 1998, dan 2005, diselingi oleh peristiwa pemutihan ringan dan lebih lokal untuk sementara (Manzello et al., 2007).

Terumbu karang berfungsi untuk menyediakan makanan dan habitat bagi spesies lain seperti berbagai jenis ikan, dan untuk melindungi garis pantai dari ombak besar. Menurut layanan Taman Nasional Amerika Serikat, terumbu karang yang ada di Florida Keys dikunjungi hampir 500.000 pengunjung setiap tahun sehingga mendukung faktor pariwisata. Namun fenomena pemutihan karang di perairan sekitar Florida Keys pada akhirnya tidak mungkin mendukung terumbu karang karena intensitas dan frekuensi pemutihan karang telah meningkat secara signifikan menyebabkan kematian atau kerusakan parah. Ketika karang mati, jumlah spesies laut yang bergantung terhadap terumbu karang menurun, dan kepunahan lokal dapat terjadi (U.S. Global Change Research Program, 2009).

Oleh karena itu, faktor lingkungan menjadi parameter yang memengaruhi secara signifikan jumlah kejadian pemutihan karang pada beberapa titik di daerah Florida Keys. Sehingga penelitian ini akan menganalisis model kejadian pemutihan karang di Florida Keys yang diakibatkan oleh kondisi lingkungan sekitarnya dengan menggunakan analisis model statistik *Stepwise Linear Regression*.



## **I.2 Ruang Lingkup**

Pada penelitian ini dibatasi oleh analisis data kejadian pemutihan (*bleaching*) pada terumbu karang dengan menggunakan data *severity code* (rentang kode tingkat keparahan pemutihan) yang diperoleh dari (Donner et al., 2017) dan data parameter lingkungan untuk melihat pengaruh faktor lokal di kawasan Florida Keys. Analisis model statistik yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode *Stepwise Linear Regression* untuk mengetahui prediktor yang signifikan memengaruhi pemutihan karang di Florida Keys.

## **I.3 Rumusan Masalah**

Berdasarkan permasalahan yang diperoleh dan dibahas di latar belakang, adapun rumusan masalah dalam penelitian ini, yaitu :

1. Bagaimana memodelkan kejadian pemutihan karang di Florida Keys berdasarkan kondisi parameter lingkungan yang signifikan dengan menggunakan metode *Stepwise Linear Regression*?
2. Bagaimana verifikasi model pemutihan karang yang dikembangkan dengan menggunakan korelasi *pearson* dan RMSE?

## **I.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dalam penelitian ini, yaitu :

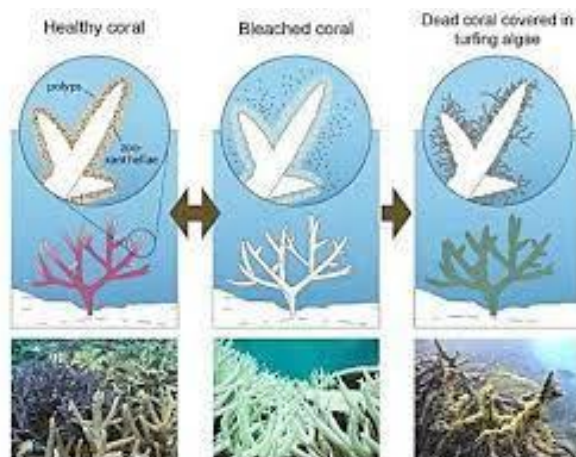
1. Untuk memodelkan kejadian Pemutihan Karang di Florida Keys berdasarkan kondisi parameter lingkungan yang signifikan dengan menggunakan metode *Stepwise Linear Regression*.
2. Untuk verifikasi model pemutihan karang yang dikembangkan dengan menggunakan korelasi *pearson* dan RMSE.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

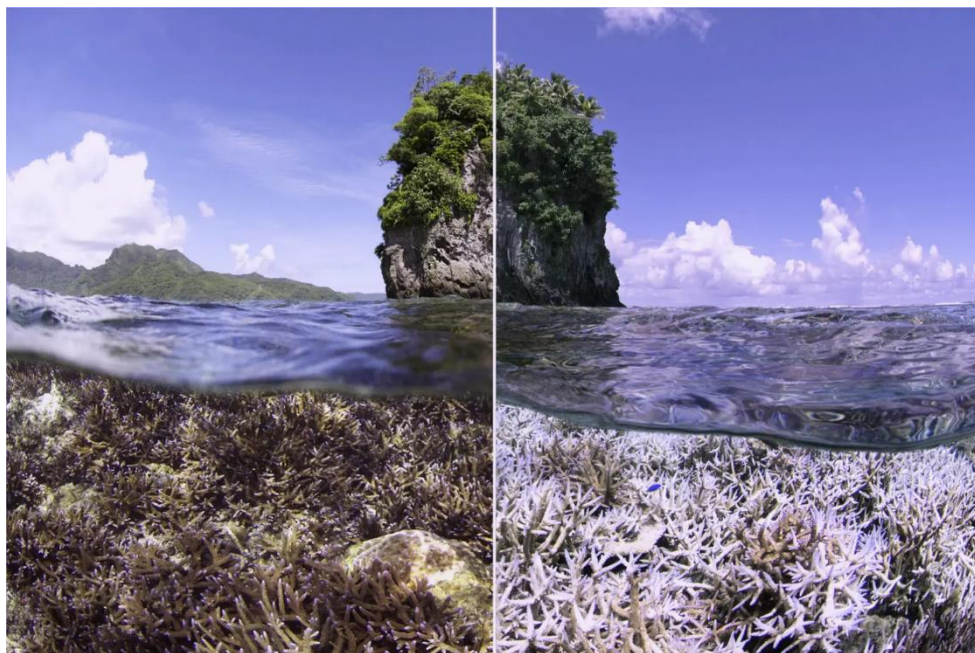
#### II.1 Pemutihan Karang

Sebagian besar karang adalah binatang-binatang kecil disebut polip yang hidup berkoloni dan membentuk terumbu, menutupi sekitar 600 ribu km<sup>2</sup> atau kurang lebih 0.2% dari luas lautan global dan sekitar 15% dari wilayah laut dangkal dengan kedalaman 0-30 m (Lalli & Parsons, 1993). Karang mendapat makanan melalui dua cara yaitu menggunakan tentakel untuk menangkap plankton dan melalui alga kecil (disebut *zooxanthellae*) yang hidup di jaringan karang. Beberapa jenis *zooxanthellae* dapat hidup disatu jenis karang (Rowan et al., 1997). Biasanya karang ditemukan dalam jumlah besar dalam setiap polip, hidup bersimbiosis, memberikan warna pada polip, serta memperoleh energi dari proses fotosintesis dan 90% karbon polip (Sebens, 1997). *Zooxanthellae* menerima nutrisi-nutrisi penting dari karang dan memberikan sebanyak 95% dari hasil fotosintesisnya (energi dan nutrisi) kepada karang (Muscatine, 1990).



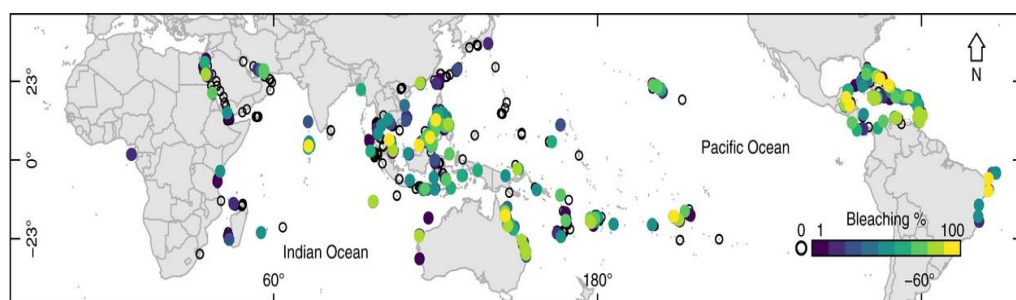
**Gambar 2.1** Mekanisme terumbu karang memutih diadopsi dari (NOAA, 2016).

Pemutihan karang atau *coral bleaching* terjadi akibat keluarnya *zooxanthellae* dari dalam jaringan tubuh karang secara permanen atau sulit terjadinya relokasi ke koloni yang sudah ditinggalkannya. *Zooxanthellae* merupakan alga uniseluler sebagai simbiosis bagi hewan karang (Veron, 1995; Westmacott et al., 2000; Ateweberhan & McClanahan, 2010). Karang sangat tergantung pada simbiosisnya itu, karena simbiosis dapat menghasilkan lebih dari 90% energi yang dibutuhkan karang. Namun, dalam kondisi tertekan, hubungan antara simbiosis dan karang rusak, sehingga densitas *zooxanthella* menurun, lalu dilepas oleh karang. Hal ini menyebabkan warna-warni karang yang sangat bervariasi dan indah berubah menjadi putih sesuai dengan warna kerangka karang, yaitu kapur ( $\text{CaCO}_3$ ) yang berwarna putih (Wouthuyzen et al., 2015). Selama peristiwa pemutihan, karang kehilangan 60-90% dari jumlah *zooxanthellae*-nya dan *zooxanthellae* yang masih tersisa dapat kehilangan 50-80% dari pigmen fotosintesisnya (Glynn, 1996).



**Gambar 2.2** Perbandingan terumbu karang secara berdampingan, sebelum dan sesudah pemutihan (Credit : XL Catlin Seaview Survey)

Kejadian pemutihan merupakan fenomena umum pada suatu terumbu karang. Namun pemutihan massal merupakan gejala yang tidak umum terjadi. Biasanya hal ini dipicu oleh naiknya suhu air laut secara tiba-tiba (Marshall & Baird, 2000). Kejadian pemutihan karang massal dilaporkan terjadi tahun 1998 di hampir seluruh perairan tropis dunia yang diikuti dengan kematian massal koloni karang, terutama spesies yang tidak toleran terhadap perubahan suhu menjadi lebih tinggi (Suharsono, 1999). pemutihan karang massal bisa dikorelasikan dengan gangguan spesifik seperti temperatur air yang ekstrem tinggi atau rendah, radiasi matahari, sedimentasi, masukan air tawar, kontaminasi / toksik dan penyakit (Glynn, 1996; Brown, 1997). Faktor peningkatan suhu air laut seringkali diasosiasikan dengan pemanasan global dimana karang termasuk fauna dengan toleransi suhu yang rendah dikarenakan peningkatan suhu sebesar  $1^{\circ}\text{C} - 1.5^{\circ}\text{C}$  diatas rata-rata diketahui sudah dapat memicu terjadinya pemutihan karang (Douglas, 2003). Meskipun batas toleransi karang terhadap suhu bervariasi antar spesis atau antar daerah pada spesis yang sama, tetapi hewan karang dan organisme terumbu karang hidup dengan suhu yang dekat batas atas toleransinya (Johannes, 1975).



**Gambar 2.3** Peta sebaran pemutihan karang secara global. Prevalensi pemutihan karang disajikan sebagai persentase dari kumpulan karang yang memutih di 3,351 lokasi di 81 negara dari tahun 1998 hingga 2017. Lingkaran putih menunjukkan tidak ada pemutihan. Lingkaran berwarna menunjukkan pemutihan 1% (biru) hingga pemutihan 100% (kuning) (Sully et al., 2019)

Pemutihan karang secara besar-besaran dalam kurun waktu dua dekade terakhir ini berhubungan dengan peningkatan suhu permukaan laut dan khususnya pada *HotSpots* (Hoegh-Guldberg, 1999). *HotSpot* adalah daerah dimana suhu permukaan laut naik hingga melebihi maksimal perkiraan tahunan (suhu tertinggi pertahun dari rata-rata selama 10 tahun) dilokasi tersebut (Goreau & Hayes, 1994). Apabila *HotSpot* dari 1°C diatas maksimal tahunan bertahan selama 10 minggu atau lebih, pemutihan pasti terjadi (Wilkinson et al., 1999). Dampak gabungan dari tingginya tingkat sinar matahari (pada gelombang panjang ultraviolet) dapat mempercepat proses pemutihan dengan mengalahkan mekanisme alami karang untuk melindungi dirinya sendiri dari sinar matahari yang berlebihan (Glynn, 1996).

Peristiwa pemutihan dalam skala besar di tahun 1980-an dan awal tahun 1990-an tidak dapat dijelaskan keseluruhannya sebagai akibat dari faktor tekanan lokal seperti contohnya sirkulasi air yang buruk dan segera dikaitkan dengan peristiwa *El Niño* (Glynn, 1990). Tahun 1983 adalah tahun tercatatnya *El Niño* terkuat hingga saat itu, diikuti oleh peristiwa serupa tahun 1987 dan yang kuat lagi tahun 1992 (Goreau & Hayes, 1994). Pemutihan karang telah muncul pula di tahun yang bukan merupakan tahun-tahun *El Niño*, dan telah dikenali sebagai faktor lain selain naiknya suhu permukaan laut yang dapat terkait, seperti angin, awan yang menutup dan hujan (Glynn, 1993; (Brown, 1997).

Peristiwa pemutihan dalam skala besar dipengaruhi oleh naik-turunnya suhu permukaan laut, dimana pemutihan dalam skala kecil seringkali disebabkan karena tekanan langsung dari manusia (contohnya polusi) yang berpengaruh pada karang dalam skala kecil yang terlokalisir. Pada saat pemanasan dan dampak langsung

manusia terjadi bersamaan satu sama lain dapat saling mengganggu. Apabila suhu rata-rata terus menerus naik karena perubahan iklim dunia, karang hampir dapat dipastikan menjadi subjek pemutihan yang lebih sering dan ekstrem nantinya. Oleh karena itu, perubahan iklim saat ini dapat menjadi ancaman terbesar satu-satunya untuk terumbu karang di seluruh dunia (Rudi, 2012).

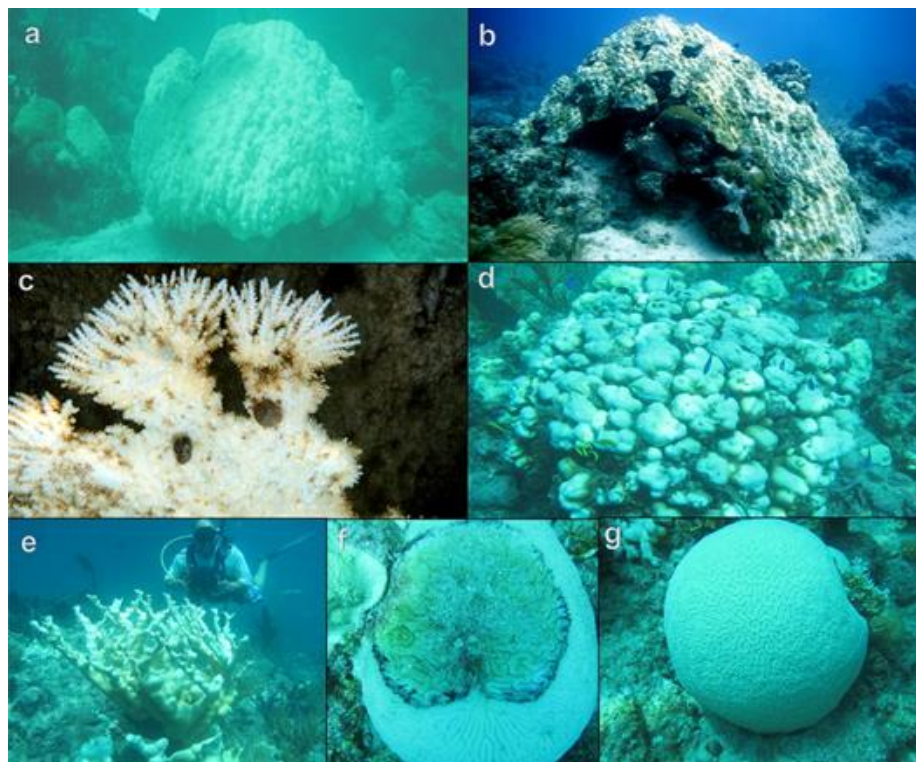
## **II.2 Peristiwa Pemutihan Karang Florida Keys**

Peningkatan terjadinya kasus pemutihan karang di beberapa tempat seperti Florida Keys yang menunjukkan terjadinya penurunan tingkat penutupan karang hingga mencapai 38% (Harvell et al., 2001). Terumbu karang Florida Keys telah mencerminkan tren global peningkatan pemutihan karang massal. Dalam banyak kasus, peristiwa pemutihan berulang pada tingkat yang semakin parah dan interval waktu yang lebih singkat, di mana peristiwa pemutihan karang besar-besaran telah diamati pada tahun 1983, 1987, 1990, 1997 dan 1998 yang berdampak pada seluruh Florida Keys (Obura et al., 2011).

Selama musim panas dan musim gugur tahun 2005, Karibia timur laut terkena beberapa suhu berkelanjutan tertinggi yang tercatat di wilayah ini, dan pemutihan massal didokumentasikan di banyak terumbu (Wilkinson & Souter, 2008). Komunitas karang di Florida Keys juga menunjukkan pemutihan yang parah selama periode ini, meskipun berlalunya beberapa angin topan mengurangi banyak tekanan termal. Pada awal tahun 2010, bagian atas Florida Keys mengalami dua front dingin abnormal yang menurunkan suhu air laut di bawah 12°C pada terumbu karang di pantai dan mempertahankan suhu di bawah 18°C selama kira-kira 2 minggu yang pada akhirnya mengakibatkan kematian massal dari banyak karang pembentuk

terumbu. Kejadian tersebut terkait dengan *Arctic Oscillation* (AO) yang luar biasa ekstrem (Manzello et al., 2007).

Pemutihan massal lainnya di sepanjang Florida Keys terjadi berturut-turut pada tahun 2014 dan 2015, selain karena tekanan panas, terumbu karang juga mengalami bencana penyakit multi-tahun yang dikenal sebagai penyakit kehilangan jaringan karang batu (SCTLD) yang mengakibatkan kematian besar-besaran untuk >20 spesies karang (Aeby et al., 2019; (Muller et al., 2020). Penyakit ini bersifat mematikan, menyebabkan hilangnya jaringan secara akut pada spesies yang sangat rentan, dan bertahan lama dengan mempengaruhi secara kronis spesies karang yang kurang rentan selama berbulan-bulan hingga bertahun-tahun setelah awal penyakit (Aeby et al., 2019; (Walton et al., 2018).



**Gambar 2.4** Karang di Florida Keys menunjukkan tiga peristiwa pemutihan massal termasuk : a September 1987, b November 1997, c Februari 1998, dan d–g September 2014 (Manzello, 2015).

Komunitas terumbu karang di Florida Keys ada di lingkungan yang memiliki fluktuasi suhu yang lebih besar dan peningkatan sedimentasi, kekeruhan, dan nutrisi relatif terhadap terumbu lepas pantai. Karakteristik lingkungan ini biasanya dianggap merusak perkembangan terumbu karang, namun terumbu karang di lepas pantai Florida Keys lebih sehat dalam hal persentase tutupan karang, tingkat pertumbuhan, dan tingkat kematian dibandingkan dengan spesies karang lain yang ada di lepas pantai (Lirman & Fong, 2007). Lokasi terumbu di Florida Keys juga mengalami kimia karbonat air laut yang sangat bervariasi, dengan beberapa nilai keadaan saturasi aragonit (mineral karbonat) musiman tertinggi yang pernah didokumentasikan (Manzello et al., 2012).

## **II.3 Faktor Lingkungan**

### **II.3.1 Jarak**

Salah satu faktor utama yang mempengaruhi intensitas pemutihan adalah kondisi lingkungan setempat, beberapa studi menunjukkan bahwa karang yang berada lebih dekat ke pantai atau di perairan dangkal memiliki tingkat pemutihan yang lebih tinggi dibandingkan dengan karang yang berada lebih jauh dari pantai atau di perairan yang lebih dalam. Ini karena karang yang berada di perairan dekat ke pantai cenderung lebih terpapar pada suhu yang lebih tinggi dan kualitas air yang buruk, termasuk peningkatan suhu air laut dan polusi (Coles & Brown, 2003).

Pengaruh kondisi lingkungan darat tetap ada di sepanjang pesisir pantai, namun berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dari pantai. Tren unimodal umum dalam kekayaan spesies karang, yang umumnya lebih rendah pada terumbu dangkal dekat garis pantai dan meningkat di lepas pantai hingga nilai maksimum pada



kedalaman menengah. Area pantai mengalami gangguan terbesar dan tingkat ini menurun dengan arah lepas pantai. Sebaliknya ada pengurangan efek pengaruh laut menuju pantai. Kedua gradien ini menghasilkan tingkat menengah dari kedua jenis gangguan tersebut dan mungkin karena itu keragaman yang lebih tinggi pada jarak lepas pantai menengah (Cleary et al., 2005).

### **II.3.2 Kekeruhan**

Kekeruhan adalah parameter kunci kualitas air yang mewakili jumlah cahaya yang diserap atau tersebar di kolom air oleh polutan berbahaya yang umumnya diakibatkan oleh kontribusi bahan buangan dari asap kendaraan dan mesin pabrik. Kekeruhan mengacu pada tingkat kekeruhan air yang disebabkan oleh partikel-partikel padat seperti tanah, lumpur atau debu yang berada dalam air . Partikel-partikel ini dapat menyebabkan pencemaran air, mempengaruhi kualitas air laut, dan menyerap atau memantulkan cahaya, sehingga mengurangi cahaya yang tersedia untuk alga simbiosis karang dan mengganggu fotosintesis. Kekeruhan mengurangi jumlah cahaya yang dapat diakses oleh alga simbiosis karang. Alga simbiosis karang membutuhkan cahaya matahari untuk fotosintesis, dan jika terlalu sedikit cahaya tersedia, maka tidak dapat memproduksi cukup energi untuk mempertahankan hubungan simbiosis dengan karang. Akibatnya, alga simbiosis karang mati atau keluar dari karang (Zweifler et al., 2021).

Kekeruhan paling sering dianggap merugikan karang karena berkurangnya cahaya dan abrasi jaringan, dengan kekeruhan berlebih yang menyebabkan berkurangnya zona eufotik dan matinya terumbu karang dalam kondisi ekstrem. Namun, beberapa spesies karang dapat bertahan dengan baik melalui peristiwa tekanan panas dengan

memakan partikel tersuspensi untuk mendapatkan kebutuhan karbon dan nitrogen. Studi yang dilakukan (Sully & Woesik, 2020) menunjukkan bahwa lingkungan yang keruh dapat terus menyediakan tempat berlindung bagi karang pembentuk terumbu saat lautan menghangat. Kekeruhan yang terus-menerus seperti itu memang dapat memberikan perlindungan bagi karang terumbu dari peristiwa tekanan panas yang disebabkan oleh perubahan iklim.

### **II.3.3 Paparan**

Respons komunitas karang tertentu selama peristiwa pemutihan massal dapat bergantung pada paparan populasi terhadap tekanan panas. Paparan ini dapat bervariasi berdasarkan kedalaman dan geografi, termasuk kedekatan dengan faktor mitigasi seperti zona *upwelling* dan aliran sungai. Karang kompetitif lebih berlimpah di puncak terumbu, terumbu yang lebih dangkal dan terumbu dengan paparan gelombang yang lebih tinggi dibandingkan dengan karang yang tahan stres yang lebih berlimpah di terumbu yang lebih dalam dan terumbu dengan paparan gelombang yang lebih rendah (Riegl & Piller, 2003).

Paparan terhadap faktor lingkungan dapat berupa paparan sinar ultraviolet, dimana paparan sinar ultraviolet yang berlebihan dapat merusak klorofil dan pigmen pada alga simbiosis karang, menunjukkan penurunan kinerja fotosintesis yang diikuti oleh pemutihan karang. Paparan juga dapat berasal dari endapan sedimen yang dapat tetap tersuspensi di air atau terendapkan di permukaan karang dan dapat mengandung racun, patogen, dan nutrisi, yang semuanya berdampak pada kesehatan karang. Paparan sedimen yang meningkat dalam jangka waktu yang lama atau peristiwa paparan yang lebih sering dapat menyebabkan kematian karang dan

perubahan permanen dalam struktur komunitas terumbu karang karena beberapa spesies beradaptasi dengan lingkungan dengan sedimen tinggi dan yang lainnya tidak (Tuttle & Donahue, 2022).

#### **II.3.4 Frekuensi Siklon**

Siklon tropis adalah badai dengan angin kencang dan hujan lebat yang terbentuk di wilayah tropis dan subtropis. Siklon tropis dapat menyebabkan kerusakan pada ekosistem karang dan menyebabkan pemutihan karang dalam beberapa cara, antara lain (Baird et al., 2009) :

1. Mengakibatkan turbulensi air dan sedimentasi: siklon tropis dapat menyebabkan turbulensi air dan sedimentasi yang dapat mengganggu dan merusak ekosistem karang. Partikel-partikel padat yang terusik dapat menyebabkan kekeruhan air yang dapat mengurangi cahaya yang tersedia untuk alga simbiosis karang dan mengganggu fotosintesis, yang dapat menyebabkan pemutihan karang.
2. Mengganggu lingkungan yang stabil: siklon tropis dapat mengganggu lingkungan laut yang stabil dan mengakibatkan fluktuasi suhu air dan kualitas air yang tidak biasa. Hal ini dapat menyebabkan stres pada karang dan meningkatkan risiko pemutihan karang.
3. Menghancurkan atau merusak karang: siklon tropis dapat menyebabkan kerusakan fisik pada ekosistem karang, termasuk karang mati atau terkelupas. Kerusakan fisik ini dapat mengurangi keberlangsungan hidup alga simbiosis karang dan menyebabkan pemutihan karang.
4. Menyebarkan penyakit dan patogen: siklon tropis dapat menyebarkan penyakit dan patogen yang dapat membahayakan karang dan menyebabkan pemutihan.

Selain kerusakan yang disebabkan oleh siklon di daratan, siklon juga menimbulkan gelombang besar di lautan, yang mengaduk air dan menghasilkan aliran naik yang mendinginkan permukaan air. Sebagai contoh, pada tahun 1998, siklon di Pasifik sangat sedikit, khususnya di Jepang selatan, yang umumnya banyak terjadi setiap tahun. Karena tidak ada topan, air menjadi sangat hangat, dan gelombang panas menyebabkan pemutihan karang besar. Siklon tropis diperkirakan akan meningkat dalam intensitasnya dan menggeser lintasnya ke arah lintang yang lebih rendah karena perubahan iklim (Darling et al., 2019).

### **II.3.5 Kedalaman**

Terumbu karang yang berada di dasar laut yang dalam memiliki lereng terumbu dan dasar terumbu yang dalam, sehingga menawarkan habitat bagi banyak spesies yang tidak ada di perairan yang lebih dangkal. Spesies yang tinggal di bagian terumbu yang lebih dalam menerima lebih sedikit cahaya dan tidak terlalu terpapar oleh gelombang dibandingkan spesies yang tinggal di rata-rata terumbu dan lereng terumbu bagian atas. Dengan demikian, terumbu karang ini memiliki fauna karang yang relatif kaya dengan menawarkan habitat bagi spesies yang lebih menyukai kondisi terumbu yang dalam (Hoeksema et al., 2019).

Dampak utama dari kedalaman terkait dengan penurunan transparansi cahaya, yang pada akhirnya dipengaruhi oleh ketersediaan nutrisi dan aliran fluvial. Transparansi akan selalu lebih rendah di daerah dengan aliran fluvial yang tinggi karena konsentrasi partikel anorganik dan organik yang lebih tinggi ditambah dengan peningkatan kelimpahan planktonik. Selain transparansi cahaya, suhu dan energi hidrodinamika juga menurun seiring dengan kedalaman. Energi hidrodinamika

dapat mempengaruhi komposisi komunitas secara langsung dan juga secara tidak langsung mempengaruhi komposisi habitat. Di daerah dengan tingkat energi hidrodinamika yang tinggi, organisme dapat tersapu, terfragmentasi, atau tidak dapat menetap dengan baik. Gelombang dapat mempengaruhi komposisi habitat dengan memecah koloni karang dan menciptakan petak-petak terbuka dengan puing-puing karang yang dapat digunakan sebagai habitat untuk organisme laut. Selain hidrodinamika energi, kedalaman dapat mempengaruhi komposisi habitat tutupan karang hidup, misalnya bisa sangat padat antara 12 dan 24 m sehingga membatasi habitat yang tersedia untuk organisme lain (Cleary et al., 2005).

Secara keseluruhan, karang pada kedalaman 10 m memiliki kemungkinan 1.3 kali lebih kecil untuk mengalami pemutihan yang parah dibandingkan dengan karang yang berada pada kedalaman 3-5m dan 70.8% dari spesies yang hanya hidup di perairan dangkal mengalami pemutihan yang lebih sedikit pada kedalaman 10 m. Individu yang muncul paling dalam di setiap populasi adalah yang paling mungkin untuk bertahan hidup dan mendorong pemulihan terumbu. Sementara distribusi kedalaman maksimum karang terumbu sering dibatasi oleh ketersediaan cahaya yang terbatas dan kedalaman minimum (Muir et al., 2017).

### **II.3.6 Kecepatan Angin**

Kecepatan angin adalah kecepatan udara yang bergerak secara horizontal yang disebabkan oleh pergerakan angin dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, biasanya karena perubahan suhu. Perubahan suhu harian sangat berkorelasi dengan kecepatan angin, dimana angin yang lebih lemah mengakibatkan peningkatan pemanasan sedangkan angin yang lebih cepat menyebabkan pendinginan, dan

besarnya penurunan suhu meningkat dengan kecepatan angin. Musim panas 2012 dan 2017 yang luar biasa hangat ditandai dengan kecepatan angin yang rendah, sedangkan tahun-tahun berikutnya yang lebih dingin memiliki musim panas dengan angin yang lebih cepat. Hal ini menunjukkan bahwa suhu air yang meningkat selama peristiwa pemutihan bertepatan dengan periode kecepatan angin yang rendah dan dengan demikian mengurangi pendinginan lokal (Paparella et al., 2019).

Angin kencang juga dapat mempengaruhi kekeruhan air dan ini juga berimplikasi pada risiko pemutihan karang. Pemutihan karang adalah respon tidak hanya untuk suhu tinggi tetapi juga untuk radiasi yang tinggi dan pengurangan radiasi selama kejadian suhu tinggi dapat mencegah karang dari pemutihan dengan membatasi tekanan pada fotosistem simbiosis alga karang. Kekeruhan yang disebabkan oleh angin kencang akan membatasi radiasi ultraviolet dan mengurangi tekanan cahaya pada karang selama periode suhu musim panas yang tinggi. Terlepas dari suhu, paparan radiasi ultraviolet yang tinggi dapat menyebabkan pemutihan dan selama peristiwa suhu tinggi, penurunan radiasi akibat peningkatan kekeruhan telah terbukti mengurangi pemutihan di saluran terumbu Florida. Dimana baru-baru ini diidentifikasi sebagai salah satu dari hanya 11 wilayah global yang dianggap sebagai tempat perlindungan potensial terhadap pemanasan iklim di masa depan melalui efek bayangan dari kekeruhan. Dari sudut pandang fisik murni pada albedo konstan, air keruh yang dangkal menyerap lebih banyak radiasi matahari daripada air jernih. Namun, sedimen yang tersuspensi dapat mengubah sifat pemantulan air secara berlebihan sehingga umumnya meningkatkan albedo (Paparella et al., 2019; Woessik & McCaffrey, 2017).

### II.3.7 Sea Surface Temperature (SST)

Suhu permukaan laut (SST) adalah suhu air dekat dengan permukaan laut yang merupakan variabel penting untuk dapat lebih memahami interaksi antara laut dan atmosfer (Smith & Reynolds, 2003). SST dipengaruhi oleh panas matahari, arus permukaan, keadaan awan, *upwelling*, divergensi dan konvergensi terutama pada daerah muara dan sepanjang garis pantai. Faktor-faktor meteorologi juga berperan yaitu curah hujan, penguapan, kelembaban udara, suhu udara, kecepatan angin dan intensitas radiasi matahari. SST biasanya berkisar antara 27°C–29°C di daerah tropis dan 15°C–20°C di daerah subtropis, kondisi lapisan permukaan laut tropis adalah hangat dan variasi suhu tahunannya kecil tetapi variasi suhu hariannya tinggi. Perubahan yang terjadi pada suhu laut telah memengaruhi fungsi ekosistem laut secara global (Wyrтки, 1961).

Pemutihan terumbu karang yang telah diamati di Great Barrier Reef, pantai Pasifik Panama dan di Laut Karibia telah berkorelasi dengan suhu permukaan laut anomali tinggi yang diduga menyebabkan pengusiran *zooxanthellae* dari inangnya (Lesser et al., 1990). Berdasarkan penelitian yang dilakukan (Berkelmans et al., 2004), pemodelan hubungan antara pemutihan (*bleaching*) dan SST menunjukkan bahwa peningkatan 1°C akan meningkatkan terjadinya pemutihan karang dari 50% (perkiraan kejadian pada tahun 1998 dan 2002) menjadi 82%, sedangkan peningkatan 2°C akan meningkatkan kejadian menjadi 97% dan 3°C meningkatkan hingga 100%. Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa terumbu karang sangat peka terhadap kenaikan suhu yang bahkan sedang dan tanpa adanya aklimatisasi/adaptasi.

Anomali suhu permukaan laut merupakan penyimpangan dari kondisi rata-rata suhu permukaan laut. Beberapa anomali suhu permukaan laut hanyalah peristiwa sementara, bukan bagian dari pola atau tren tertentu. Pada interval yang tidak teratur (kira-kira setiap 3-6 tahun), suhu permukaan laut di Samudera Pasifik sepanjang ekuator menjadi lebih hangat atau lebih dingin dari biasanya. Anomali ini adalah ciri khas siklus iklim *El Niño* dan *La Niña* yang dapat memengaruhi pola cuaca di seluruh dunia. Anomali suhu permukaan laut lokal yang kuat dapat mengungkapkan bahwa arus laut, seperti arus teluk di lepas pantai Amerika Serikat, telah menyimpang dari jalur biasanya untuk sementara waktu atau lebih kuat atau lebih lemah dari biasanya (NASA, 2008).

Anomali suhu permukaan laut yang bertahan selama bertahun-tahun dapat menjadi sinyal perubahan iklim regional atau global, seperti pemanasan global. Anomali hangat tampaknya meningkat di musim panas belahan bumi utara. Pola ini dihasilkan dari fakta bahwa es laut menyusut ke area yang lebih kecil di musim panas sekarang daripada di masa lalu, daerah yang dulu tertutup es sepanjang musim panas sekarang menjadi perairan terbuka. Sedangkan di daerah pesisir, suhu anomali (baik hangat atau dingin) dapat mendukung satu organisme dalam suatu ekosistem daripada yang lain, menyebabkan populasi dari satu jenis bakteri, ganggang, atau ikan berkembang atau menurun. Anomali suhu permukaan laut yang hangat juga dapat memperingatkan pengelola sumber daya alam di mana terumbu karang mungkin dalam bahaya pemutihan (NASA, 2008).



### **II.3.8 Thermal Stress Anomaly (TSA)**

Pemutihan sering dikaitkan dengan anomali tekanan termal (TSA), yang didefinisikan sebagai suhu yang melebihi klimatologis (rata-rata jangka panjang) minggu terhangat dalam setahun sebesar 1°C atau lebih. TSA terjadi ketika suhu air laut meningkat melebihi ambang batas tertentu yang dapat ditoleransi oleh karang dan alga simbiosis karang yang hidup di dalamnya. Jika suhu air meningkat terlalu tinggi atau terlalu cepat, maka alga simbiosis karang yang memberikan karang warna dan nutrisi dapat mati dan meninggalkan karang yang kosong dan putih (Glynn, 1993).

TSA dapat disebabkan oleh banyak faktor seperti peningkatan suhu air laut karena pemanasan global, suhu air yang tinggi selama periode musim panas, atau karena polusi. Selain itu, faktor seperti kecerahan cahaya dan kecepatan aliran air laut juga dapat mempengaruhi toleransi karang terhadap suhu. Pada kondisi TSA yang parah, karang dapat mengalami kematian massal dan menyebabkan kerusakan ekosistem yang luas dan serius. Jika TSA terus berlanjut dalam jangka waktu yang panjang, maka populasi karang dapat mengalami penurunan signifikan dan ekosistem karang dapat menjadi tidak stabil. Oleh karena itu, penting untuk memantau suhu air laut dan mengambil tindakan pencegahan untuk melindungi ekosistem karang dari factor stres lingkungan yang dapat menyebabkan pemutihan karang akibat TSA. Beberapa tindakan yang dapat dilakukan adalah mengurangi emisi gas rumah kaca, memperbaiki kualitas air laut dan mengembangkan teknologi yang ramah lingkungan (Brown & Ogden, 1993).

#### **II.4 Metode *Stepwise Linear Regression***

Persamaan regresi adalah persamaan yang dapat digunakan untuk meramalkan suatu variabel terikat (dependen atau prediktan) yang berasal dari satu atau lebih variabel bebas (independen atau prediktor). Persamaan ini menggambarkan hubungan antara variabel-variabel yang ada di dalamnya. Nilai variabel terikat dinyatakan dengan konotasi Y dan nilai variabel bebas dinyatakan dengan konotasi X. Regresi dikatakan linier, apabila hubungan antara variabel bebas dan variabel terikatnya adalah linier. Regresi dikatakan non linier, apabila hubungan antara variabel bebas dan variabel terikatnya tidak linier (Kutner et al., 2004).

Regresi linier adalah metode statistik yang digunakan untuk membentuk model hubungan antara variabel terikat dengan satu atau lebih variabel bebas. Ketika variabel bebas hanya satu, maka regresi linier disebut sebagai regresi linier sederhana. Sedangkan jika variabel bebas berjumlah lebih dari satu, maka regresi linier disebut sebagai regresi linier berganda atau *Multiple Regression (MR)*. Metode regresi linear mempunyai beberapa kegunaan seperti : sebagai tujuan deskripsi dari fenomena data atau kasus yang sedang diteliti, tujuan pengendalian dan tujuan prediksi. Regresi mampu mendeskripsikan fenomena data melalui terbentuknya suatu model hubungan yang bersifatnya numerik. Regresi juga dapat digunakan untuk melakukan pengendalian atau kontrol terhadap suatu kasus atau hal-hal yang sedang diamati melalui penggunaan model regresi yang diperoleh. Selain itu, model regresi juga dapat dimanfaatkan untuk melakukan prediksi untuk variabel terikat. Namun yang perlu diingat, prediksi di dalam konsep regresi hanya

boleh dilakukan di dalam rentang data dari variabel-variabel bebas yang digunakan untuk membentuk model regresi tersebut (Kutner et al., 2004).

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

$X_1X_2X_n$  : Variabel Bebas

$a$  : Konstanta

$b_1b_2b_n$  : Koefisien Regresi

Untuk menentukan nilai  $a, b_1, b_2$  digunakan metode kuadrat terkecil (Least Square) dapat dirumuskan sebagai berikut (Kutner et al., 2004) :

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

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

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

$$b_1 = \frac{(\sum X_2^2)(\sum X_1Y) - (\sum X_1X_2)(\sum X_2Y)}{(\sum X_1^2)(\sum X_2^2) - (\sum X_1X_2)^2} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$b_2 = \frac{(\sum X_1^2)(\sum X_2Y) - (\sum X_1X_2)(\sum X_1Y)}{(\sum X_1^2)(\sum X_2^2) - (\sum X_1X_2)^2} \dots \dots \dots (2.6)$$

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

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

*Stepwise linear regression* adalah metode *multiple regression* yang sekaligus menghapus variabel-variabel bebas yang tidak penting. *Stepwise linear regression* pada dasarnya menjalankan regresi berganda beberapa kali, setiap kali menghapus variabel berkorelasi lemah. Hingga pada akhirnya tersisa variabel-variabel yang menjelaskan distribusi yang terbaik. Satu-satunya persyaratan adalah bahwa data terdistribusi secara normal dan bahwa tidak ada korelasi antara variabel independen. Dalam penggunaannya, metode ini memungkinkan variabel bebas untuk masuk dan keluar dari model regresi, membuat langkah-langkah pembentukan model cukup banyak (Hanum, 2011).

Analisis ini merupakan metode statistik umum yang digunakan untuk meneliti hubungan antara satu variabel dependen (Y) dengan beberapa variabel independen ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ). Prosedur *Stepwise linear regression* merupakan salah satu prosedur pemilihan himpunan variabel prediktor terbaik. Tujuan *stepwise linear regression* adalah menggunakan nilai-nilai variabel dependen yang diketahui, untuk meramalkan nilai variabel dependen. Metode *stepwise linear regression* dilakukan dengan memasukkan variabel independen yang mempunyai kontribusi terbesar terhadap variabel dependen, hal ini dilakukan secara terus menerus sampai semua variabel independen yang mempunyai kontribusi signifikan.

## II.5 Verifikasi Prediksi

Verifikasi adalah proses menilai kualitas suatu prediksi (*forecast*). Dalam proses ini, suatu hasil prediksi dibandingkan dengan nilai pengamatan/observasi. Sebelumnya, perlu dilakukan secara kualitatif dengan menampilkan gambar-gambar hasil prediksi dengan nilai observasi (data). Pengertian kualitatif di sini adalah untuk melihat kesesuaian (*visual-“eyeball”*) antara hasil prediksi dan observasi. Kita juga dapat membandingkan hasil prediksi secara kuantitatif dengan menentukan akurasi model sekaligus kesalahannya dalam memprediksi dengan menggunakan seperangkat formulasi matematik (Halide, 2009).

Ada 3 (tiga) alasan utama mengapa sebuah verifikasi dilakukan. Pertama, untuk memantau (*monitor*) akurasi prediksi dan apakah prediksi itu semakin lama semakin baik. Kedua, untuk meningkatkan (*improve*) kualitas prediksi yaitu dengan menyelidiki kesalahan apa yang telah kita lakukan ketika memprediksi. Ketiga untuk membandingkan (*compare*) hasil-hasil prediksi beberapa model dalam memprediksi besaran/fenomena yang sama. Dari hasil perbandingan ini, kita akan menemukan model yang unggul dibanding model-model lainnya dan mengetahui letak/alasan keunggulan model tersebut (Halide, 2009).

### II.5.1 Korelasi Pearson

Korelasi pearson adalah suatu bentuk rumus yang digunakan untuk mencari dan mengukur kemampuan asosiasi atau hubungan linear antara dua variabel yaitu variabel bebas (Independen) dan variabel terikat (dependen). Koefisien korelasi dinyatakan dalam (Halide, 2009) :

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n Y_i \hat{Y}_i - (\sum_{i=1}^n Y_i)(\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i)}{\sqrt{\{n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2\} \{n \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i^2 - (\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i)^2\}}} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana :

$n$  = Jumlah data

$R$  = Koefisien korelasi antara data observasi dan data prediksi

$Y_i$  = Data observasi

$\hat{Y}_i$  = Data prediksi

Korelasi digunakan untuk menyatakan hubungan variabel satu terhadap variable lainnya yang dinyatakan dalam persen.

**Tabel 2.1** Interpretasi dari Nilai R positif (hubungan searah) (Wilks, 2006).

| <b>R</b>      | <b>Interpretasi</b> |
|---------------|---------------------|
| 0             | Tidak berkorelasi   |
| 0,01 s/d 0,20 | Sangat rendah       |
| 0,21 s/d 0,40 | Rendah              |
| 0,41 s/d 0,60 | Agak rendah         |
| 0,61 s/d 0,80 | Cukup               |
| 0,81 s/d 0,99 | Tinggi              |
| 1             | Sangat tinggi       |

**Tabel 2.2** Interpretasi dari Nilai R negatif (hubungan berlawanan) (Wilks, 2006).

| <b>R</b>        | <b>Interpretasi</b> |
|-----------------|---------------------|
| 0               | Tidak berkorelasi   |
| -0,01 s/d -0,20 | Sangat rendah       |
| -0,21 s/d -0,40 | Rendah              |
| -0,41 s/d -0,60 | Agak rendah         |
| -0,61 s/d -0,80 | Cukup               |
| -0,81 s/d -0,99 | Tinggi              |
| -1              | Sangat tinggi       |

### II.5.2 *Root Mean Square Error (RMSE)*

Nilai *Root Mean Square Error (RMSE)* diperoleh dengan cara menghitung nilai akar dari rata – rata kuadrat dari nilai kesalahan yang menggambarkan selisih antara data observasi dengan nilai hasil prediksi. Dapat di hitung dengan persamaan (Halide, 2009).

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

dimana :

$Y_i$  = Data observasi

$\hat{Y}_i$  = Data prediksi

$n$  = Jumlah data