

Skripsi Geofisika

**ANALISIS PENGARUH *GREENHOUSE GASES* TERHADAP
PERUBAHAN IKLIM DI ASIA TENGGARA BAGIAN SELATAN
(1901-2021)**

AMELIA PUTRI

H061201039



PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



HALAMAN JUDUL

**ANALISIS PENGARUH *GREENHOUSE GASES* TERHADAP
PERUBAHAN IKLIM DI ASIA TENGGARA BAGIAN SELATAN
(1901-2021)**

SKRIPSI

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

OLEH:

AMELIA PUTRI

H061201039

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH *GREENHOUSE GASES* TERHADAP
PERUBAHAN IKLIM DI ASIA TENGGARA BAGIAN SELATAN
(1901-2021)**

Disusun dan Diajukan Oleh:

AMELIA PUTRI

H061201039

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

Pada 31 Januari 2024

Dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

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

Pembimbing Pertama

Andika, S.Si., M.Si.
NIP. 7306062804970003

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

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

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Amelia Putri
NIM : H061201039
Departemen : Geofisika
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh *Greenhouse Gases* Terhadap Perubahan Iklim di Asia Tenggara Bagian Selatan (1901-2021)

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 dari Tim Pembimbing dan masukan Tim Penguji.

Makassar, 31 Januari 2024

Yang membuat pernyataan,



Amelia Putri

SARI BACAAN

Asia Tenggara sebagai wilayah yang rentan terhadap perubahan iklim, mendorong penelitian ini untuk mengeksplorasi dampak dari peningkatan emisi *Greenhouse Gases* (GHG). Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan faktor antropogenik (*Greenhouse Gases*) dan faktor alami (*sunspot*) dalam perubahan iklim di wilayah Asia Tenggara bagian Selatan. Dengan menggunakan metode Regresi Linear Sederhana dan Regresi Polinomial, penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis akurasi model dalam memodelkan perubahan iklim, serta mengidentifikasi hubungan antara faktor-faktor tersebut di wilayah Asia Tenggara bagian Selatan. Berdasarkan hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan hubungan signifikan antara *Greenhouse Gases* dan suhu udara di Asia Tenggara bagian Selatan. Peningkatan emisi GHG, terutama dari aktivitas antropogenik mempengaruhi suhu udara wilayah tersebut, sementara aktivitas *sunspot* tidak signifikan. Metode Regresi Polinomial Orde 3 memberikan akurasi terbaik dalam memodelkan perubahan iklim, validasi model suhu udara menunjukkan hubungan yang kuat ($r = 0,64 - 0,87$). Sebaliknya, model variabel perubahan iklim terhadap *sunspot* menunjukkan korelasi rendah ($r = 0,07 - 0,34$) dan RMSE yang tinggi. Kesimpulan mengindikasikan dominasi peran *Greenhouse Gases* dalam perubahan iklim di Asia Tenggara bagian Selatan. Sebagai saran, penelitian berikutnya dapat fokus pada analisis emisi GHG spesifik untuk memperdalam pemahaman kontribusinya pada perubahan iklim di wilayah tersebut.

Kata Kunci: *Greenhouse Gases*, *Sunspot*, Metode Regresi Linear Sederhana, Metode Regresi Polinomial, Analisis Korelasi Pearson



ABSTRACT

Southeast Asia, as a region vulnerable to climate change, prompted this study to explore the impacts of increasing *Greenhouse Gases* (GHG) emissions. This research aims to model anthropogenic (*Greenhouse Gases*) and natural factors (*sunspot*) in climate change in the Southern Southeast Asia region. Using Simple Linear Regression and Polynomial Regression methods, this study aims to analyze the accuracy of the model in modeling climate change, as well as identify the relationship between these factors in the Southern Southeast Asia region. Based on the results of Pearson correlation analysis, there is a significant relationship between *Greenhouse Gases* and air temperature in Southern Southeast Asia. Increased GHG emissions, mainly from anthropogenic activities, affect the region's air temperature, while *sunspot* activity is not significant. The 3rd Order Polynomial Regression method provides the best accuracy in modeling climate change, validation of the air temperature model shows a strong relationship ($r = 0.64 - 0.87$). In contrast, the model of climate change variables against *sunspot* showed a low correlation ($r = 0.07 - 0.34$) and high RMSE. The conclusion confirms the dominant role of *Greenhouse Gases* in climate change in Southern Southeast Asia. As a suggestion, future research could focus on analyzing specific GHG emissions to deepen the understanding of their contribution to climate change in the region.

Keywords: *Greenhouse Gases*, *Sunspot*, Simple Linear Regression Method, Polynomial Regression Method, Pearson Correlation Analysis



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillah Rabbil 'alamin. Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT. Atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini yang berjudul “**Analisis Pengaruh Greenhouse Gases Terhadap Perubahan Iklim di Asia Tenggara Bagian Selatan (1901-2021)**” untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin. Shalawat beserta salam semoga senantiasa terlimpah curahkan kepada Rasulullah SAW. Kepada keluarganya, para sahabat, dan kepada umatnya hingga akhir zaman, Aamiin.

Dalam penulisan skripsi ini tentu tidak lepas dari hambatan dan kesulitan, namun berkat Ridho Sang Maha Kuasa, penyusunan skripsi ini dapat selesai tepat waktu. Sebelumnya izinkan penulis untuk ucapkan terimakasih sedalam-dalamnya kepada orangtua tercinta **Ayahanda Tutu Dg Tombong** dan **Ibunda Aty Dg Ngiji**, kakak-kakak tersayang **Asri** dan **Asrul**, dan seluruh keluarga besar penulis yang selalu memberikan dukungan moril maupun materil, doa, dan kasih sayang tulus yang tiada hentinya untuk penulis.

Dalam kesempatan ini pula, penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya dari berbagai pihak atas bantuan, nasihat, didikan, dan bimbingan yang diberikan kepada penulis selama ini. Untuk itu, dengan senang hati menyampaikan rasa terimakasih kepada yang terhormat :



1. Bapak **Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc** selaku Pembimbing Utama yang telah banyak membantu, memberikan bimbingan, kepercayaan yang sangat berarti dan memberikan motivasi penulis hingga terselesaikannya skripsi ini.
2. Bapak **Andika, S.Si., M.Si.** selaku Pembimbing Pertama yang telah memberikan banyak motivasi, bimbingan juga semangat dan arahan kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak **Saaduddin, M.Sc.** dan bapak **Andi Muhammad Pramatadie, ST., M.Eng., Ph.D** selaku Dosen Penguji Penulis yang memberikan kritik dan saran kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak **Dr. Sakka, M.Si.** selaku dosen Penasehat Akademik Penulis yang telah memberi masukan selama menjalani pendidikan di Geofisika.
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, Staf Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, dan Staf Departemen Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin atas semua ilmu yang telah diajarkan, serta pelayanan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.
7. Seluruh Staf Stasiun Meteorologi Andi Jemma Masamba, adik **Alqi** yang enemani penulis ketika merasa jenuh di kantor sendirian, terkhusus kakak **nnisa Puspa Rani, S. Tr** selaku pembimbing kerja praktek saya di Stasiun



Meteorologi Andi Jemma Masamba yang memberikan nasehat serta arahan kepada penulis.

8. Kepada teman seperjuangan TA dan teman dari zaman maba **Defina Damayanti** yang saling memberikan bantuan, motivasi, semangat, dan tempat bertukar pikiran mengenai penulisan tugas akhir ini.
9. Kepada sahabat penulis dari SMA sampai sekarang sekampus namun berbeda fakultas **Grace** yang telah memberikan semangat dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
10. Teman-teman Paskibra SMAN 11 Makassar Angkatan 2020 **SIKI'** yang menjadi tempat berkeluh kesah penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Teman-teman seangkatan Geofisika 2020 atas kebersamaannya dari maba hingga sekarang.
12. Teman-teman KKNT PS LUWU Gelombang 109 **Akbar, Davi, dan Ficky** terkhusus kepada **Sri Asnita** yang telah memberikan semangat, doa, dan supportnya kepada penulis.
13. Kepada grup **WE JURNAL** yang setia menjadi pendengar ketika penulis merasakan lelah dalam situasi apapun.
14. Kepada teman healing semasa pengerjaan TA **Arpah** yang memberikan doa dan supportnya, serta selalu ada dalam hal apapun.
15. Kepada diri sendiri yang berhasil melewati segala rintangan hingga saat ini, saya mengucapkan terimakasih atas setiap keluhan yang terucap. Setiap rintangan yang saya hadapi selama masa perkuliahan telah menjadiendorong yang memotivasi diri ini untuk terus maju.



16. Dan untuk semua yang pernah datang maupun pergi dalam kehidupan penulis, terimakasih karena mengajarkan penulis bagaimana rasanya kehilangan sehingga menjadi motivasi terbaru di dalam hidup penulis sehingga terselesaikanlah skripsi ini.

17. Kepada manusia tersayang di hidup penulis **Henry** yang telah membuat warna dalam hidup penulis, memberikan doa dan support dalam hal apapun, terimakasih telah menjadi rumah ternyaman kedua di dalam hidupku, terimakasih selalu ada. Last but not least, terimakasih telah bertahan hingga saat ini.

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. Penulis pun tetap berharap agar tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Makassar, 31 Januari 2024

Penulis



DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
SARI BACAAN	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Ruang Lingkup.....	3
I.3 Rumusan Masalah	3
I.4 Tujuan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Perubahan Iklim.....	5
II.2 <i>Greenhouse Gases</i>	6
1 <i>Greenhouse Gases</i> dan Pemanasan Global.....	7
2 <i>Greenhouse Effect</i>	8
3 <i>Greenhouse Gases</i> di Asia Tenggara Bagian Selatan.....	10



II.3 <i>Sunspot</i> dan Pemanasan Global	17
II.4 Metode Regresi Linear Sederhana	20
II.5 Metode Regresi Polinomial	21
II.6 Analisis Korelasi Pearson	22
II.7 <i>Root Mean Square Error</i> (RMSE).....	24
II.8 Anomali dan Normalisasi	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
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.....	30
III.3.2 Tahap Pengolahan Data	30
III.4 Bagan Alir Penelitian	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	32
IV.1 Korelasi Pengaruh <i>Greenhouse Gases</i> (GHG) dan <i>Sunspot</i> Terhadap Perubahan Iklim	32
IV.1.1 Korelasi Pengaruh <i>Greenhouse Gases</i> Terhadap Perubahan Iklim....	32
IV.1.2 Korelasi Pengaruh <i>Sunspot</i> Terhadap Perubahan Iklim	34
IV.2 Model Perubahan Iklim Terhadap <i>Greenhouse Gases</i> (GHG) dan <i>Sunspot</i>	37
IV.2.1 Model Suhu Udara Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	37



IV.2.2 Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i>	39
IV.2.3 Model Curah Hujan Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	40
IV.2.4 Model Curah Hujan Terhadap <i>Sunspot</i>	42
IV.2.5 Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	44
IV.2.6 Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i>	46
IV.3 Grafik Model Perubahan Iklim Terhadap <i>Greenhouse Gases</i> dan <i>Sunspot</i>	48
IV.3.1 Model Perubahan Iklim Terhadap <i>Greenhouse Gases</i> (GHG).....	48
IV.3.2 Model Perubahan Iklim Terhadap <i>Sunspot</i>	56
IV.4 Validasi Model	64
IV.4.1 Validasi Model Perubahan Iklim Terhadap <i>Greenhouse Gases</i> (GHG)	64
IV.4.2 Validasi Model Perubahan Iklim Terhadap <i>Sunspot</i>	65
BAB V PENUTUP	67
V.1 Kesimpulan.....	67
V.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN	73



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Korelasi CO ₂ dan Suhu Global (Easterbrook, 2016)	8
Gambar 2.2 Skematis <i>Greenhouse Effect</i> (Guidoni, dkk., 2022)	9
Gambar 2.3 Profil Emisi Indonesia 2010-2020 (Gg CO ₂ e) (Rahmanulloh, 2023)	11
Gambar 2.4 Suhu Udara Vs <i>Sunspot</i>	19
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian.....	26
Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian	31
Gambar 4.1 Grafik Model Suhu Udara Terhadap GHG Indonesia.....	48
Gambar 4.2 Grafik Model Suhu Udara Terhadap GHG Malaysia	49
Gambar 4.3 Grafik Model Suhu Udara Terhadap GHG Brunei Darussalam	49
Gambar 4.4 Grafik Model Suhu Udara Terhadap GHG Singapore.....	50
Gambar 4.5 Grafik Model Suhu Udara Terhadap GHG Filipina.....	50
Gambar 4.6 Grafik Model Curah Hujan Terhadap GHG Indonesia.....	51
Gambar 4.7 Grafik Model Curah Hujan Terhadap GHG Malaysia.....	51
Gambar 4.8 Grafik Model Curah Hujan Terhadap GHG Brunei Darussalam.....	52
Gambar 4.9 Grafik Model Curah Hujan Terhadap GHG Singapore	52
Gambar 4.10 Grafik Model Curah Hujan Terhadap GHG Filipina	53
Gambar 4.11 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap GHG Indonesia.....	53
Gambar 4.12 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap GHG Malaysia	54
Gambar 4.13 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap GHG Brunei Darussalam	54
Gambar 4.14 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap GHG Singapore.....	55



Gambar 4.15 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap GHG Filipina	55
Gambar 4.16 Grafik Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i> Indonesia	56
Gambar 4.17 Grafik Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i> Malaysia	57
Gambar 4.18 Grafik Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i> Brunei Darussalam	57
Gambar 4.19 Grafik Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i> Singapore.....	58
Gambar 4.20 Grafik Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i> Filipina.....	58
Gambar 4.21 Grafik Model Curah Hujan Terhadap <i>Sunspot</i> Indonesia.....	59
Gambar 4.22 Grafik Model Curah Hujan Terhadap <i>Sunspot</i> Malaysia.....	59
Gambar 4.23 Grafik Model Curah Hujan Terhadap <i>Sunspot</i> Brunei Darussalam	60
Gambar 4.24 Grafik Model Curah Hujan Terhadap <i>Sunspot</i> Singapore	60
Gambar 4.25 Grafik Model Curah Hujan Terhadap <i>Sunspot</i> Filipina	61
Gambar 4.26 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i> Indonesia	61
Gambar 4.27 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i> Malaysia	62
Gambar 4.28 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i> Brunei Darussalam.....	62
Gambar 4.29 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i> Singapore.....	63
Gambar 4.30 Grafik Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i> Filipina	63
Gambar 4.31 Peta Nilai Korelasi Suhu Udara Terhadap <i>Greenhouse Gases</i> di Asia Tenggara bagian Selatan	66



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Interpretasi dari Nilai Koefisien Korelasi (Anwar, 2009)	23
Tabel 4.1 Nilai Korelasi Antara Anomali <i>Greenhouse Gases</i> dan Variabel Iklim di Asia Tenggara Bagian Selatan.....	32
Tabel 4.2 Nilai Korelasi Antara Anomali <i>Sunspot</i> dan Variabel Iklim di Asia Tenggara Bagian Selatan.....	34
Tabel 4.3 Nilai Korelasi Model Suhu Udara Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	37
Tabel 4.4 Nilai RMSE Model Suhu Udara Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	38
Tabel 4.5 Nilai Korelasi Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i>	39
Tabel 4.6 Nilai RMSE Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i>	39
Tabel 4.7 Nilai Korelasi Model Curah Hujan Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	41
Tabel 4.8 Nilai RMSE Model Curah Hujan Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	41
Tabel 4.9 Nilai Korelasi Model Curah Hujan Terhadap <i>Sunspot</i>	43
Tabel 4.10 Nilai RMSE Model Suhu Udara Terhadap <i>Sunspot</i>	43
Tabel 4.11 Nilai Korelasi Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	44
Tabel 4.12 Nilai RMSE Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Greenhouse Gases</i>	45
Tabel 4.13 Nilai Korelasi Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i>	46
Tabel 4.14 Nilai RMSE Model Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i>	46



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Suhu, Curah Hujan, <i>Sunspot</i> , GHG dan Tinggi Muka Laut... 73	
Lampiran 2. Program Matlab untuk Nilai Observasi & Anomali GHG VS Suhu, Curah Hujan dan Tinggi Muka Laut 89	
Lampiran 3. Program Matlab untuk Nilai Observasi & Anomali <i>Sunspot</i> VS Suhu, Curah Hujan dan Tinggi Muka Laut 91	
Lampiran 4. Program Matlab untuk Pemodelan Suhu, Curah Hujan dan Tinggi Muka Laut Terhadap GHG..... 92	
Lampiran 5. Program Matlab untuk Pemodelan Suhu, Curah Hujan dan Tinggi Muka Laut Terhadap <i>Sunspot</i> 94	
Lampiran 6. Program Matlab Fungsi Tambahan..... 95	
Lampiran 7. Nilai Korelasi Data Observasi Semua Prediktor 96	
Lampiran 8. Nilai Konstanta (β_0) dan Koefisien (β_1) untuk Semua Model 97	
Lampiran 9. Hasil Grafik Observasi dan Anomali Semua Negara untuk Suhu, curah hujan, dan Tinggi Muka Laut Vs GHG 104	
Lampiran 10. Hasil Grafik Observasi dan Anomali Semua Negara untuk Suhu, curah hujan, dan Tinggi Muka Laut Vs <i>Sunspot</i> 109	
Lampiran 11. Peta Nilai Korelasi Untuk Semua Model.....114	



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Asia Tenggara merupakan salah satu wilayah yang paling rentan terhadap perubahan iklim. Dalam beberapa dekade terakhir, perubahan iklim menjadi perhatian seluruh dunia yang merupakan akibat langsung dari peningkatan industrialisasi dan pertumbuhan ekonomi yang begitu cepat. Hal tersebut dapat meningkatkan suhu permukaan bumi sekitar satu derajat *Celcius* dibandingkan dengan suhu pada masa pra-industri (Ding, dkk., 2022). Selain itu, peningkatan emisi *Greenhouse Gases* akibat industrialisasi memiliki dampak yang signifikan terhadap perubahan iklim, dimana peningkatan emisi *Greenhouse Gases* dari aktivitas industri memperkuat *greenhouse effect* dan menyebabkan peningkatan suhu global (Noor, dkk., 2020). Sehingga, perubahan iklim merupakan tantangan pembangunan yang signifikan bagi Asia Tenggara pada abad ke-21 sekarang ini (Development Bank, 2009).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) melaporkan tren peningkatan suhu udara permukaan rata-rata di Asia Tenggara selama beberapa dekade terakhir dengan peningkatan sebesar 0,1-0,3 °C per dekade tercatat antara tahun 1951 dan 2000. Wilayah ini juga mengalami tren penurunan curah hujan dan kenaikan permukaan laut (pada 1-3 mm per tahun). Frekuensi dan intensitas



cuaca ekstrem juga meningkat dalam beberapa dekade terakhir, bahkan banjir besar, longsor dan kekeringan di banyak bagian wilayah. Oleh karena itu, pemerintah dan masyarakat di Asia Tenggara perlu mengambil tindakan segera untuk beradaptasi

terhadap perubahan iklim, membangun ketahanan dan meminimalkan dampak buruk emisi *Greenhouse Gases* (GHG) yang sudah tertanam dalam sistem iklim (Development Bank, 2009).

Berdasarkan laporan IPCC (2013), terdapat prediksi terkait dampak perubahan iklim yang salah satunya adalah kenaikan muka air laut sebesar 2,8-3,6 mm per tahun. Kenaikan muka air laut ini merupakan konsekuensi langsung dari perubahan iklim dan prediksi ini telah menjadi perhatian selama beberapa dekade, baik dalam skala global maupun regional. Peningkatan suhu permukaan global juga berperan dalam proses pelelehan es di Kutub Utara dan Selatan bumi. Pelelehan es tersebut berkontribusi pada kenaikan muka air laut yang pada gilirannya mengakibatkan perluasan area yang tergenang di daerah pesisir. Dengan demikian, perubahan iklim juga memiliki dampak yang signifikan terhadap dinamika muka air laut dan lingkungan pesisir (Anggraeni, 2016).

Studi penelitian yang dilakukan oleh Prakash menyatakan bahwa peningkatan emisi *Greenhouse Gases*, terutama karbon dioksida (CO₂) merupakan faktor utama yang menyebabkan perubahan iklim di Asia Tenggara. Aktivitas manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi, telah menyebabkan peningkatan suhu rata-rata di wilayah ini. Semakin tinggi konsentrasi *Greenhouse Gases* di atmosfer, semakin banyak panas yang terperangkap dan suhu bumi meningkat (Prakash, 2018). Sedangkan, menurut penelitian yang dilakukan oleh Kristoufek, aktivitas *sunspot* memiliki efek tertunda yang positif terhadap suhu global, dengan

n dalam jumlah *sunspot* mendahului perubahan suhu selama lebih dari dua amun, peningkatan emisi CO₂ sejak tahun 1960 telah mengganggu



hubungan tersebut, sehingga tanpa mengontrol efek pemanasan global, temuan tersebut akan berbeda dan bias. Dengan demikian, aktivitas *sunspot* tidak menyebabkan perubahan iklim atau peningkatan suhu, akan tetapi memiliki hubungan yang terganggu oleh peningkatan emisi CO₂ (Kristoufek, 2016).

Dengan mempertimbangkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan faktor antropogenik dan faktor alami terhadap perubahan iklim menggunakan metode Regresi Linear Sederhana dan metode Regresi Polinomial. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh *Greenhouse Gases* (GHG) terhadap perubahan iklim di Asia Tenggara bagian Selatan melalui analisis Korelasi Pearson.

I.2 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup penelitian ini yaitu menganalisis perubahan iklim yang terjadi akibat pengaruh *Greenhouse Gases* menggunakan metode Regresi Linear Sederhana, metode Regresi Polinomial, dan Korelasi Pearson. Adapun data yang digunakan ialah *Greenhouse Gases* dan *sunspot* sebagai variabel prediktor, serta suhu udara, curah hujan, dan tinggi muka laut sebagai variabel respons pada tahun 1901-2021.

I.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana hubungan faktor antropogenik dan faktor alami terhadap perubahan iklim di wilayah Asia Tenggara bagian Selatan?



Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:
1. Bagaimana hubungan faktor antropogenik dan faktor alami terhadap perubahan iklim di wilayah Asia Tenggara bagian Selatan?
2. Bagaimana akurasi model faktor antropogenik dan faktor alami terhadap perubahan iklim menggunakan *Simple Linear Regression Model* dan *Polynomial Regression Model*?

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis hubungan faktor antropogenik dan faktor alami terhadap perubahan iklim di wilayah Asia Tenggara bagian Selatan.
2. Untuk menganalisis akurasi model faktor antropogenik dan faktor alami terhadap perubahan iklim menggunakan *Simple Linear Regression Model* dan *Polynomial Regression Model*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Perubahan Iklim

Perubahan iklim merujuk pada modifikasi dalam kondisi fisik atmosfer bumi, termasuk perubahan suhu dan pola curah hujan. Dampak dari perubahan ini memiliki jangkauan yang sangat luas dan memengaruhi berbagai aspek kehidupan manusia. Perubahan iklim bukanlah peristiwa yang terjadi dalam waktu singkat, melainkan berlangsung selama periode yang cukup lama. Konsep perubahan iklim dapat diartikan sebagai perubahan dalam nilai rata-rata satu atau lebih parameter cuaca dalam suatu wilayah tertentu. Sementara itu, perubahan iklim global merujuk pada modifikasi iklim di seluruh Bumi, yang mencakup variasi rata-rata kondisi iklim di suatu lokasi atau variabilitasnya yang signifikan secara statistik selama periode waktu yang cukup panjang, biasanya dalam skala dekade atau lebih (Gernowo, dkk., 2012).

Isu perubahan iklim menjadi perhatian utama di seluruh dunia saat ini karena tingginya emisi *Greenhouse Gases* yang terjadi dengan cepat. *Greenhouse Gases* di atmosfer menghalangi pelepasan panas dan menyebabkan akumulasi *Greenhouse Gases* yang menghambat radiasi matahari yang dipantulkan dari permukaan bumi ke luar angkasa. Gas-gas yang termasuk *Greenhouse Gases* yaitu metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), nitrit oksida (N₂O), sulfat heksafluorida (SF₆), karbon (PFC) dan hidrofluorokarbon (HFC). Gas-gas itulah yang menyebabkan perubahan iklim di bumi. Perubahan iklim utamanya disebabkan oleh peningkatan konsentrasi CO₂ dan berbagai jenis *Greenhouse Gases* lainnya.



Peningkatan konsentrasi *Greenhouse Gases* ini disebabkan oleh sejumlah aktivitas manusia, terutama hasil dari pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, kegiatan pertanian dan lainnya (Nurfadillah, 2022).

Perubahan iklim merupakan fenomena multi-dimensi dan dipengaruhi oleh banyak faktor dalam jangka waktu yang panjang. Sementara banyak orang menganggap efek pemanasan global lebih cepat dan lebih besar daripada yang lain. Konsensus ilmiah mengenai perubahan iklim yang berkaitan dengan pemanasan global adalah bahwa suhu rata-rata global bumi telah meningkat antara 0.4 hingga 0.8 °C selama 100 tahun terakhir. Mayoritas komunitas ilmiah sepakat bahwa perubahan iklim global terutama terjadi karena pembakaran bahan bakar fosil yang berlebihan yang menyebabkan emisi karbon dioksida dan *Greenhouse Gases* (GHG) lainnya ke atmosfer (Kumar, 2021).

II.2 *Greenhouse Gases*

Greenhouse Gases yang sering disingkat sebagai GHG, merujuk kepada sekelompok gas yang terdapat dalam atmosfer yang memiliki kemampuan untuk menyerap dan memancarkan radiasi inframerah yang bersumber dari matahari. Proses penyerapan dan pemancaran ini menciptakan *greenhouse effect*, di mana panas yang tertangkap oleh *Greenhouse Gases* menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi, mengakibatkan perubahan iklim global yang signifikan.

Greenhouse Gases (GHG) bisa berasal dari dua sumber utama, yaitu alamiah dan buatan yang merupakan hasil dari aktivitas manusia (Wahyudi, 2019). Bumi mengandung berbagai jenis *Greenhouse Gases*, di antaranya uap air, karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), nitrogen oksida (NO₂), dan ozon (O₃).



Tanpa adanya *Greenhouse Gases* ini, suhu rata-rata permukaan bumi akan jauh lebih rendah daripada suhu saat ini, yang mencapai sekitar 15 °C (27 °F) lebih dingin dari suhu rata-rata saat ini, yang sekitar 14 °C (57 °F) (Easterbrook, 2016).

Greenhouse Gases adalah bagian dari atmosfer bumi. Alasan inilah yang membuat bumi sering disebut sebagai planet “*Goldilocks*”, kondisinya ideal, tidak terlalu panas dan tidak terlalu dingin, sehingga memungkinkan kehidupan untuk bisa bertahan hidup. Sehingga, salah satu hal yang membuat bumi begitu rentan adalah efek rumah kaca (*greenhouse effect*) alami, yang mempertahankan suhu rata-rata 15°C (59°F) (NASA, 2020).

II.2.1 *Greenhouse Gases* dan Pemanasan Global

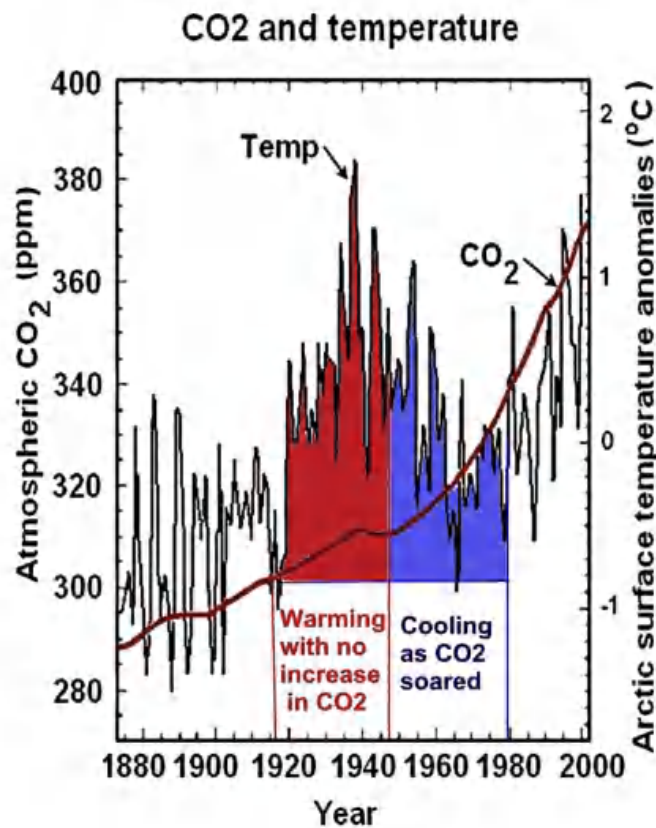
Faktor utama yang bertanggungjawab atas perubahan iklim selama periode waktu tertentu adalah karena peningkatan konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) dan gas-gas pemanasan global lainnya di atmosfer. Peningkatan volume CO₂ dan *Greenhouse Gases* (GHG) lainnya yang dilepaskan oleh pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batu bara, pembukaan lahan hutan, kegiatan pertanian dan aktivitas manusia lainnya diyakini sebagai sumber utama pemanasan global yang terjadi selama 50 tahun terakhir (Kumar, 2021).

CO₂ adalah *Greenhouse Gases* utama yang saat ini menyumbang sekitar 77% dari potensi pemanasan global. Akumulasi GHG di atmosfer telah meningkat selama dua abad terakhir karena emisi melebihi kapasitas alamiah atmosfer untuk



nya. Sebagai contoh, konsentrasi CO₂ telah meningkat hampir 100 ppm periode ini. Emisi global saat ini berkontribusi sebesar 2-3 ppm GHG setara

CO₂ setiap tahunnya (Kumar, 2021). **Gambar 2.1** menunjukkan bahwa terdapat kurangnya korelasi yang kuat antara tingkat CO₂ di atmosfer dan suhu global. Kurangnya korelasi ini mengimplikasikan bahwa ada faktor lain yang mungkin mempengaruhi perubahan suhu global, bukan hanya perubahan tingkat CO₂ (Humlum, dkk., 2011).



Gambar 2.1 Korelasi CO₂ dan Suhu Global (Easterbrook, 2016)

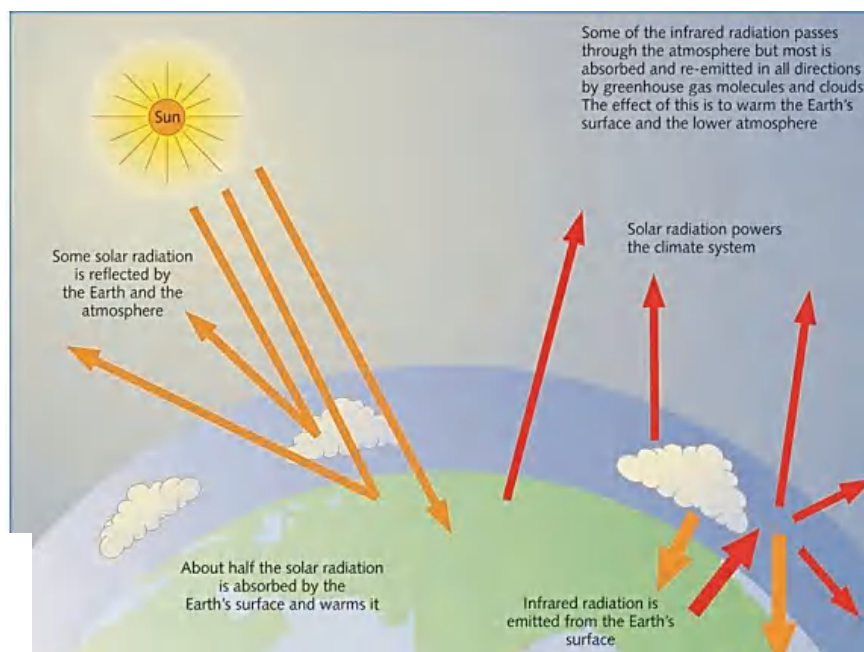
II.2.2 Greenhouse Effect

Greenhouse effect adalah fenomena alami yang terjadi ketika jumlah gas tertentu di atmosfer Bumi, seperti uap air, karbon dioksida, dan metana, berfungsi menahan panas dari matahari. Prinsip dasar *greenhouse effect* dengan interaksi antara energi radiasi dari matahari yang memanaskan



permukaan Bumi dan radiasi termal yang dipancarkan oleh Bumi dan atmosfer ke luar angkasa. Keseimbangan aliran radiasi dari matahari dan radiasi termal dari Bumi dijaga agar suhu global tetap stabil (Guidoni, dkk., 2022) .

Secara skematis, *greenhouse effect* dapat diterangkan melalui serangkaian langkah yang melibatkan interaksi radiasi matahari dan radiasi termal di atmosfer Bumi. Proses dimulai dengan pancaran radiasi matahari yang sebagian diabsorpsi oleh permukaan bumi. Selanjutnya, permukaan Bumi menghasilkan radiasi termal sebagai respons terhadap pemanasan dari matahari. *Greenhouse Gases* di atmosfer menangkap dan mereabsorpsi sebagian dari radiasi termal ini, kemudian memancarkannya ke segala arah termasuk kembali ke permukaan Bumi. Proses ini menciptakan suatu mekanisme penahanan panas, analog dengan prinsip *greenhouse* yang menahan panas di dalamnya. Fenomena ini secara umum juga dikenal sebagai “*greenhouse effect*” yang terlihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Skematis *Greenhouse Effect* (Guidoni, dkk., 2022)



II.2.3 *Greenhouse Gases* di Asia Tenggara Bagian Selatan

Asia Tenggara dengan karakteristik ekonomi dan sosial yang unik, garis pantai yang panjang, serta mayoritas wilayahnya beriklim tropis merupakan salah satu wilayah yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim. Pada tahun 2000, Asia Tenggara berkontribusi sebanyak 12% terhadap total emisi *Greenhouse Gases* (GHG) dunia, mencapai 5.187 Mt CO₂e. Angka ini mengalami peningkatan sebesar 27% sejak tahun 1990, melebihi pertumbuhan rata-rata global. Meskipun tingkat emisi per kapita di wilayah ini relatif rendah jika dibandingkan dengan negara-negara maju, namun tetap jauh melampaui rata-rata global. Dimana sektor *land use change and forestry* (LUCF) merupakan sumber utama emisi di kawasan ini, dengan kontribusi sebesar 75% dari total emisi *Greenhouse Gases* di kawasan ini pada tahun 2000. Dua sumber utama lainnya adalah sektor energi (15%) dan sektor pertanian (8%), dengan pertumbuhan emisi dari sektor energi sebesar 83% selama tahun 1990-2000, yang merupakan pertumbuhan tercepat di antara ketiga sumber tersebut. Adapun negara yang termasuk ke dalam Asia Tenggara bagian Selatan ialah Indonesia, Malaysia, Singapura, Brunei Darussalam, dan Filipina (Development Bank, 2009).

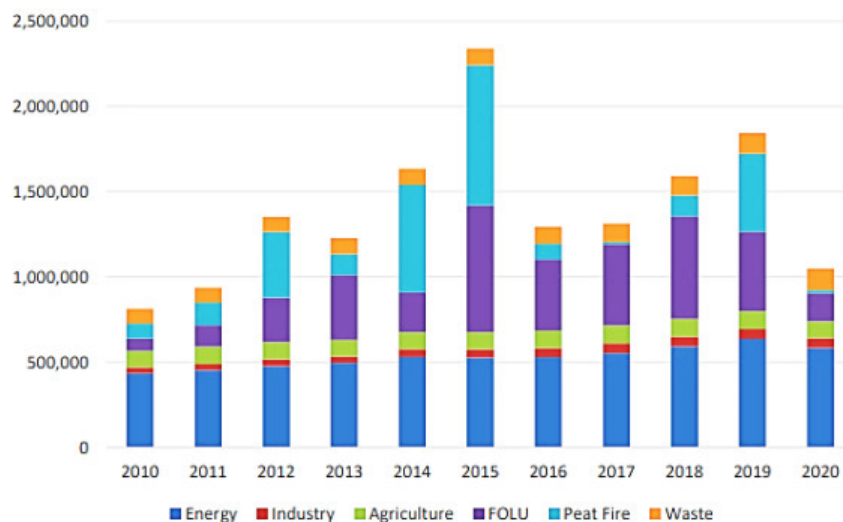
II.2.3.1 Indonesia

Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.500 pulau dan garis pantai mencapai lebih dari 81.000 kilometer (km), memiliki populasi mencapai 270,6 juta jiwa dan merupakan ekonomi terbesar di kawasan negara hingga tahun 2019. Negara ini sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim yang meliputi peristiwa bencana seperti banjir dan kekeringan,



sekaligus menghadapi perubahan jangka panjang yang dipengaruhi oleh kenaikan permukaan air laut, perubahan pola curah hujan, serta fluktuasi suhu udara (Kurniawan, dkk., 2022).

Pada tahun 1994, sektor kehutanan dan energi menjadi sumber utama emisi CO₂ di Indonesia, menyumbang sekitar 98% dari total emisi CO₂ pada tahun tersebut. Emisi CO₂ dari sektor kehutanan terutama berasal dari pembakaran biomassa selama kegiatan konversi padang rumput dan hutan (Mariah, 2010). Terkait dengan kontribusi sektor pertanian terhadap emisi *Greenhouse Gases* (GHG), pada tahun 2000, Indonesia berkontribusi sebanyak 5% terhadap total emisi *Greenhouse Gases* (GHG) nasional. Emisi yang berasal dari fermentasi enterik dan pengelolaan pupuk kandang masing-masing menyumbang sebanyak 18,14% dan 2,57% terhadap total kontribusi emisi dari sektor pertanian (Nugrahaeningtyas, dkk., 2018).



Gambar 2.3 Profil Emisi Indonesia 2010-2020 (Gg CO₂e) (Rahmanulloh, 2023)



yang dapat dilihat dalam **Gambar 2.3**, terjadi peningkatan emisi total di
 dari tahun 2010 hingga 2020 sebesar 29%, mencapai jumlah sekitar

235.768 Gg CO₂e. Sumber utama emisi di Indonesia berasal dari kebakaran hutan dan lahan gambut yang diikuti oleh sektor energi. Di sektor pertanian, terdapat stabilitas relatif dengan rentang emisi antara 96.955 Gg CO₂e hingga 105.363 Gg CO₂e selama periode tersebut dengan emisi dari *Forestry and Other Land Use* (FOLU) mencapai rata-rata sekitar 358.435 Gg CO₂e per tahun. Pada tahun 2020, total emisi *Greenhouse Gases* (GHG) Indonesia dilaporkan sebesar 1.050.413 Gg CO₂e, mengalami penurunan sebesar 43% dari tahun sebelumnya. Sektor energi berkontribusi sekitar 56% dari total emisi pada tahun 2020, diikuti oleh sektor FOLU (16%), dan sektor limbah (12%). Selain itu, sumber emisi lainnya mencakup sektor pertanian, industri, dan kebakaran lahan gambut.

Indonesia masih tetap bergantung pada batu bara sebagai sumber utama energi untuk pembangkit listrik. Pada tahun 2020, emisi dari sektor pembangkit listrik dan produksi panas mencapai 47% dari total emisi dalam sektor energi. Selain itu, penggunaan bahan bakar cair dalam sektor transportasi juga berdampak signifikan dengan menghasilkan emisi sekitar 135.217 Gg CO₂e pada tahun 2020, setara dengan 23% dari total emisi dalam sektor energi (Rahmanulloh, 2023).

Sejalan dengan komitmen yang diambil oleh Pemerintah Indonesia untuk mengurangi emisi *Greenhouse Gases* (GHG) melalui *National Appropriate Mitigation Action* (NAMA), Indonesia telah berkomitmen untuk mengurangi emisi karbon sebesar 26% dari tingkat *Business-As-Usual* (BAU) pada tahun 2020.



l, melalui *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang disampaikan in 2016, Indonesia juga berkomitmen untuk berpartisipasi dalam upaya tuk mencegah kenaikan suhu rata-rata global hingga mencapai 2°C di atas

tingkat pra-industri, dengan upaya maksimal untuk membatasi kenaikan suhu hingga 1,5°C di atas tingkat tersebut (Nugrahaeningtyas, dkk., 2018).

Pada artikel yang dipublikasikan di situs Media Indonesia yang berjudul “Mengkritisi Instrumen Pajak Karbon Sebagai Pengendali Polutan Udara”, penulis menyatakan bahwa penyebab dari perubahan iklim bukan karena peristiwa alami (natural), melainkan sesuatu yang disebabkan manusia via emisi karbonnya (antropogenik) berdasarkan artikel pemodelan dari Meehl, dkk., 2004 yang berjudul “*Combinations of Natural and Anthropogenic Forcings in Twentieth-Century Climate*” (Halide, 2023).

II.2.3.2 Malaysia

Malaysia sebagai salah satu kawasan Asia Tenggara, terbagi menjadi dua wilayah utama, yakni Semenanjung Malaysia (Malaysia Barat) dan Borneo Malaysia (Malaysia Timur) dengan luas total mencapai 330.803 km² dan diperkirakan memiliki populasi sekitar 32,7 juta jiwa pada tahun 2020 (Tan, dkk., 2021). Kawasan ini memiliki karakteristik iklim yang unik yang menjadi kunci penting dalam konteks perubahan iklim global. Khususnya peran Malaysia dalam mengurangi emisi CO₂ menjadi sangat signifikan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, baik dalam skala regional di Asia Tenggara maupun dalam konteks global yang lebih luas. Karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu gas utama yang berkontribusi terhadap peningkatan *greenhouse effect* secara global dan



menonjol sebagai salah satu produsen emisi *Greenhouse Gases* terbesar dengan pertumbuhan rata-rata sekitar 7,9% dari tahun 1990 hingga 2006 k., 2023).

Di Malaysia, sektor-sektor yang signifikan dalam penyumbangan emisi CO₂ meliputi transportasi, pembangkit listrik, industri, dan manajemen limbah. Data statistik yang diperoleh dari *Asian Pacific Energy Center* (APEC) mengindikasikan bahwa proyeksi pertumbuhan emisi CO₂ dari konsumsi energi di Malaysia diperkirakan akan meningkat sekitar 4,2% setiap tahunnya dengan perkiraan mencapai 414 juta ton karbon dioksida pada tahun 2030. Selain aktivitas pembakaran bahan bakar, sektor pertanian, serta manajemen limbah material yang mencakup pembuangan dan pengolahan air, juga memainkan peran penting sebagai sumber emisi *Greenhouse Gases* (GHG) di Malaysia (Hosseini, dkk., 2013).

Selain itu, Malaysia telah berhasil mencapai pengurangan intensitas emisi karbon sebesar 33% pada tahun 2011, dan kemungkinan besar akan mencapai targetnya. Komitmen terbaru Malaysia sebagaimana tercermin dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) terhadap Perjanjian Paris adalah mengurangi intensitas emisi sebesar 45% pada tahun 2030 dibandingkan dengan intensitas emisi per unit PDB pada tahun 2005 dengan 10% dari target tersebut bergantung pada bantuan internasional (Susskind, dkk., 2020).

II.2.3.3 Singapura

Meskipun Singapura hanya berkontribusi kurang dari 1% terhadap emisi *Greenhouse Gases* (GHG) secara global, negara ini telah menunjukkan niatnya untuk berpartisipasi dalam upaya global menjaga kelestarian lingkungan. Singapura



ekonomi yang sangat tergantung pada ekspor dan memiliki keterbatasan sumber daya energi terbarukan, namun menyadari batasan dalam upaya pengurangan emisi karbon dioksida (CO₂) yang dapat dilakukan. Melalui upaya

efisiensi energi dan energi bersih, Singapura berhasil mengurangi intensitas karbonnya sebanyak 22% antara tahun 1990 dan 2004. Singapura telah berkomitmen untuk mencapai target lebih lanjut, yaitu mengurangi tingkat emisi hingga 25% lebih rendah dari tingkat tahun 1990 pada tahun 2012. Dengan demikian, meskipun menghadapi beberapa tantangan, Singapura terus berusaha untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi *Greenhouse Gases*, menjadikannya sebagai langkah positif dalam menjaga kelestarian lingkungan (Development Bank, 2009).

II.2.3.4 Brunei Darussalam

Brunei Darussalam yang memiliki tutupan hutan mencakup sekitar 72% dari luas daratannya, memiliki peran penting dalam penyerapan karbon. Negara ini bertujuan meningkatkan cadangan hutan hingga mencakup 55% dari total luas daratan, naik dari tingkat saat ini sekitar 41% dan telah mengidentifikasi 104.920 pohon untuk program reboisasi. Dalam skenario *Business-As-Usual* (BAU), tercatat penurunan emisi *Greenhouse Gases* (GHG) sekitar 4% setiap tahun selama periode 2015 hingga 2018 yang sebagian besar disebabkan oleh pengurangan emisi sektor pertanian dan ventilasi. Namun, skenario Kebijakan Perubahan Iklim Nasional Brunei Darussalam (BNCCP) menunjukkan potensi mengurangi emisi GHG hingga lebih dari 50% pada tahun 2035 jika dibandingkan dengan *Business-As-Usual* (BAU). Dalam konteks BAU, emisi GHG diperkirakan akan meningkat sekitar 4,9% setiap tahun mencapai 30,2 Mt CO₂e pada tahun 2035. Prediksi ini didasarkan



nsi pertumbuhan Produk Domestik Bruto (PDB) sebesar 1,8% setiap tahun ngkatan aktivitas pembakaran bahan bakar. Dalam skenario ini, sekitar

80% dari emisi GHG pada tahun 2035 diharapkan dapat diserap oleh hutan-hutan Brunei yang berfungsi sebagai penyerap alami, dengan asumsi bahwa tutupan hutan tetap pada tingkat 72%. Negara ini juga telah menerapkan pendekatan *Whole-of-Nation* untuk mengatasi perubahan pola iklim yang merugikan (Besman, dkk., 2020).

II.2.3.5 Filipina

Filipina adalah salah satu negara yang sangat rentan terhadap perubahan iklim dengan berbagai dampak seperti kenaikan suhu, variasi curah hujan, naiknya permukaan air laut, dan cuaca ekstrem yang semakin sering terjadi. Menurut *Global Climate Risk Index (2000–2019)*, Filipina bahkan menempati peringkat keempat sebagai salah satu negara yang paling terdampak oleh cuaca ekstrem. Meskipun Filipina memiliki emisi *Greenhouse Gases (GHG)* per kapita yang relatif rendah pada tahun 2018, yaitu sekitar 2,2 Mt CO₂e dibandingkan rata-rata global sekitar 6,5 Mt CO₂e per kapita, namun emisi tersebut mengalami peningkatan signifikan sebesar 139% dari tahun 1990 hingga 2018. Peningkatan ini didorong oleh pertumbuhan ekonomi, urbanisasi yang pesat, serta meningkatnya permintaan akan energi dan sumber daya lainnya (Asian Development Bank, 2022).

Meskipun sektor energi dan transportasi menjadi penyumbang utama emisi (59% pada tahun 2018), memiliki biaya pengurangan GHG yang paling efisien. Oleh karena itu, dekarbonisasi ekonomi menjadi langkah krusial untuk mitigasi dampak iklim dan memberikan peluang bagi pertumbuhan ekonomi. Peningkatan emisi *Greenhouse Gases* menjadi perhatian karena kontribusinya terhadap perubahan iklim global. NDC Filipina bertujuan



mengurangi emisi GHG dari sektor energi, transportasi, pertanian, limbah, dan industri sebesar 75,0% dari tingkat biasa pada tahun 2030, dengan sebagian kecil (3,6%) dukungan dari anggaran domestik dan mayoritas (96,4%) bersyarat pada pendanaan eksternal serta dukungan lainnya seperti transfer teknologi dan penguatan kapasitas (Asian Development Bank, 2022).

II.3 *Sunspot* dan Pemanasan Global

Sunspot adalah area relatif gelap dan dingin pada permukaan matahari yang disebabkan oleh interaksi dengan medan magnetik matahari. *Sunspot* juga merupakan suatu fenomena sementara yang muncul sebagai bintik gelap dibandingkan dengan area sekitarnya. *Sunspot* berhubungan dengan aktivitas magnetik matahari dan sering muncul secara berpasangan atau berkelompok. Jumlah bintik matahari (*sunspot*) pada permukaan matahari bervariasi dan tidak konstan selama siklus surya sekitar 11 tahun. Dimana jumlah bintik matahari adalah ukuran standar aktivitas matahari dan digunakan untuk melacak siklus matahari. (Clette et al., 2016).

Proses pengamatan *sunspot* dapat dilakukan dengan berbagai cara, tergantung pada alat yang digunakan dan kondisi atmosfer. Pengamatan *sunspot* dapat dilakukan dengan mata telanjang ketika bintik matahari cukup besar dan ada kondisi atmosfer tertentu seperti kabut, debu, atau asap yang mengurangi intensitas cahaya matahari.

Selain itu, pengamatan *sunspot* juga dapat dilakukan dengan menggunakan teleskop



dan instrumen pengamatan matahari lainnya, seperti *Solar Optical Observing* (SOON) (Clette et al., 2014).

Berikut adalah rumus *sunspot* yang digunakan setelah data pengamatan *sunspot* telah dikumpulkan dan memasukkan dalam perhitungan *Internasional Sunspot Number* (Vaquero, 2007).

$$R_z = k(10g + f) \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

R_z = Observasi bintik matahari

k = Faktor koreksi

g = Jumlah kelompok bintik matahari

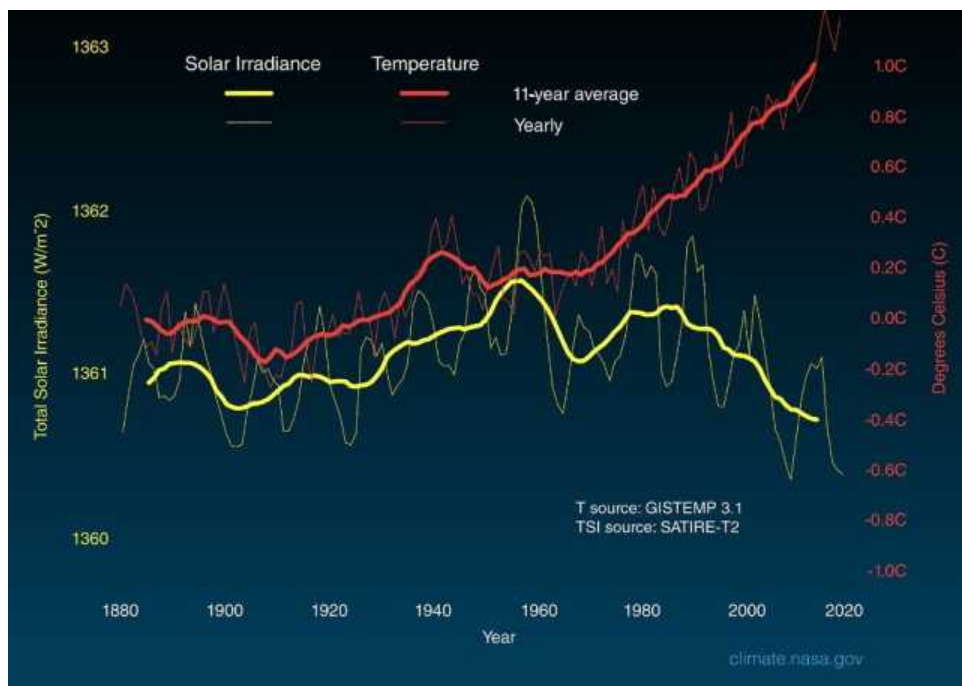
f = Jumlah bintik matahari individu

Sunspot dapat mempengaruhi perubahan iklim melalui berbagai mekanisme. Salah satu cara utamanya adalah melalui variasi dalam radiasi matahari, terutama dalam spektrum sinar matahari yang pendek, yaitu radiasi ultraviolet (UV), yang mempengaruhi komposisi ozon di stratosfer. Meskipun aktivitas *sunspot* dapat berdampak pada perubahan iklim, kontribusi utama pada pemanasan global saat ini dikaitkan dengan aktivitas antropogenik, khususnya peningkatan emisi *Greenhouse Gases* (Georgieva, 2009).

Berdasarkan **Gambar 2.4**, dimana grafik tersebut membandingkan perubahan suhu permukaan global (garis merah) dan energi matahari yang diterima bumi (garis kuning) (dalam satuan watt per meter persegi) sejak tahun 1880. Garis yang lebih tipis menunjukkan data tahunan, sedangkan garis yang lebih tebal menunjukkan rata 11 tahun. Jumlah energi matahari yang diterima bumi telah mengikuti tahun matahari yang mengalami siklus naik turun secara alamiah tanpa



peningkatan sejak tahun 1880. Selama periode yang sama, suhu global telah meningkat secara signifikan. Oleh karena itu, sangat tidak memungkinkan bahwa aktivitas matahari telah menyebabkan peningkatan suhu global yang teramati selama setengah abad terakhir (NASA, 2024).



Gambar 2.4 Suhu Udara Vs *Sunspot*

Pemanasan global akibat peningkatan jumlah emisi *Greenhouse Gases* telah menyebabkan terjadinya peristiwa perubahan iklim secara global. Aktivitas manusia di Bumi bergantung pada energi yang berasal dari matahari. Sebagian energi cahaya yang mencapai atmosfer Bumi melewati udara dan awan menuju permukaan, dimana energi tersebut diserap dan dipancarkan dalam bentuk panas inframerah. Sekitar 90% dari panas tersebut kemudian diserap oleh *Greenhouse*

n dipancarkan kembali, sehingga memperlambat hilangnya panas ke luar Bumi. Bukti menunjukkan bahwa pemanasan global saat ini tidak dapat



disebabkan oleh aktivitas matahari. Para ilmuwan menggunakan pengukuran yang disebut *Total Solar Irradiance* (TSI) untuk mengukur perubahan energi yang diterima bumi dari matahari. TSI menggabungkan siklus matahari 11 tahun dan *flare*/badai matahari dari permukaan bumi (NASA, 2024).

II.4 Metode Regresi Linear Sederhana

Simple Linear Regression Model atau yang juga dikenal sebagai metode regresi linear sederhana merupakan suatu pendekatan statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan linear antara dua variabel, yaitu variabel respons (y) dan variabel prediktor tunggal (x). Model ini mengasumsikan bahwa hubungan antara kedua variabel dapat dijelaskan oleh persamaan garis lurus. Persamaan umum untuk Metode regresi linear sederhana dapat dirumuskan sebagai berikut (Rencher, dkk., 2008) :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

y : Variabel respons

x : Variabel prediktor

β_0 : *Intercept* (konstanta) dari model

β_1 : Koefisien regresi untuk variabel prediktor

ε : Kesalahan acak

Simple Linear Regression Model digunakan untuk memahami dan memodelkan hubungan antara variabel prediktor (x) dan variabel respons (y), serta untuk melakukan estimasi dan inferensi tentang koefisien regresi dan hubungan antara



variabel. Nilai konstanta (β_0) dan koefisien regresi (β_1) dapat ditentukan dengan menggunakan metode kuadrat terkecil (*Least Squares Method*) dengan persamaan sebagai berikut (Rencher, dkk., 2008):

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n yx - \frac{(\sum_{i=1}^n y)(\sum_{i=1}^n x)}{n}}{\sum_{i=1}^n x^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x)^2}{n}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana:

\bar{x} = Nilai Rata-rata Prediktor

\bar{y} = Nilai Rata-rata Variabel Respons

n = Jumlah Data

II.5 Metode Regresi Polinomial

Metode regresi polinomial adalah suatu pendekatan analisis statistik yang menggambarkan hubungan antara variabel independen dan dependen sebagai fungsi polinomial dengan derajat hingga p . Dibandingkan dengan model regresi linear sederhana, metode regresi polinomial mampu memodelkan hubungan yang lebih realistis antara variabel yang tidak dapat diakomodasi oleh model regresi



yang lebih sederhana. Oleh karena itu, metode regresi polinomial akan tingkat fleksibilitas yang lebih besar dalam proses analisis dan

pemodelan data. Persamaan (2.6) merupakan bentuk umum dari model regresi polinomial menurut (Miller, 1986).

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3 + \dots + \beta_px^p \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

y = Variabel respons

x, x^2, x^3, \dots, x^p = Variabel prediktor

p = Derajat polinomial

β_0 = *Intercept* (konstanta) dari model

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_p$ = Koefisien regresi untuk variabel prediktor

II.6 Analisis Korelasi Pearson

Analisis korelasi adalah metode statistika yang digunakan untuk mengukur tingkat hubungan antara dua variabel. Tingkat hubungan tersebut dapat dinilai berdasarkan kekuatannya menggunakan indeks yang dikenal sebagai koefisien korelasi. Koefisien korelasi (r) memiliki nilai yang dapat diinterpretasikan sebagai berikut (Vusvitasari, dkk., 2016):

- Jika $r = 1$, maka hubungan antara variabel X dan Y adalah sempurna dan positif. Nilai mendekati 1 menunjukkan hubungan yang sangat kuat dan positif.
- Jika $r = -1$, maka hubungan antara variabel X dan Y adalah sempurna dan negatif. Nilai mendekati -1 menunjukkan hubungan yang sangat kuat dan negatif.



$r = 0$, maka hubungan antara variabel X dan Y sangat lemah atau tidak ada hubungan antara keduanya.

Sedangkan metode korelasi Pearson adalah metode statistik yang digunakan untuk mengukur sejauh mana dan arah hubungan linear antara dua variabel numerik. Koefisien korelasi Pearson dihitung dengan menggunakan rumus berikut (Halide, 2009):

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

Dimana:

n = Jumlah Data

r = Koefisien Korelasi Pearson

x_i = Data Observasi

y_i = Data Prediksi

Hubungan antardua variabel atau lebih itu bila dilihat dari arahnya dapat dibagi menjadi dua, yaitu hubungan yang sifatnya searah dan berlawanan arah. Hubungan searah disebut korelasi positif, sementara yang berlawanan arah disebut korelasi negatif (Anwar, 2009).

Tabel 2.1 Interpretasi dari Nilai Koefisien Korelasi (Anwar, 2009)

Interval Koefisien Korelasi	Tingkat Hubungan
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.7 Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan metode alternatif untuk mengevaluasi ketepatan suatu model prediksi. RMSE digunakan untuk mengukur sejauh mana estimasi model mendekati nilai sebenarnya. Nilai yang dihasilkan adalah akar kuadrat dari rata-rata kesalahan kuadrat prediksi model yang memberikan gambaran tentang seberapa akurat model tersebut dalam memprediksi hasil sebenarnya. Nilai RMSE dapat dihitung dengan persamaan berikut (Dama, dkk., 2021):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

\bar{y}_i = Data prediksi

y_i = Data observasi

n = Jumlah data

II.8 Anomali dan Normalisasi

Dalam konteks studi iklim, ada yang dikatakan data observasi dan data anomali. Anomali dalam konteks studi iklim merupakan penyimpangan dari kondisi klimatologi standar. Anomali iklim dapat mencakup perubahan suhu, curah hujan, atau pola angin yang tidak sesuai dengan kondisi iklim yang diharapkan. Anomali ditentukan dengan mengurangkan rata-rata jangka panjang dari pengamatan yang



... gga menghasilkan sebuah analisis iklim lebih lanjut. Sedangkan, observasi pada data yang dikumpulkan melalui pengamatan langsung. Dimana data , penting untuk menganalisis kondisi iklim dan tren perubahan

iklim (Rao, 2023). Adapun normalisasi ialah proses penskalaan yang menggunakan *minimum* dan *maximum* dari fitur untuk mengubah skala nilai ke dalam suatu rentang, biasanya rentang yang dipakai 0 hingga 1 atau -1 hingga 1 (Adams, dkk., 2021). Proses normalisasi data ditunjukkan pada **Persamaan 2.9**.

$$X' = \frac{(X - X_{min}) * (maxRange - minRange)}{(X_{max} - X_{min})} + minRange \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

X' = Data hasil normalisasi

X = Data observasi

X_{max} = Nilai maksimum data observasi

X_{min} = Nilai minimum data observasi

$maxRange$ = Batas nilai terbesar dari normalisasi

$minRange$ = Batas nilai terkecil dari normalisasi

