



P-ISSN 2086-5589
E-ISSN 2723-2239



megასაინს
buletin meteorologi, klimatologi, kualitas udara, geofisika, dan lingkungan

VOL 15 | NO.2 | DESEMBER 2024

EVALUASI RESIKO CUACA DI PELABUHAN TELUK BAYUR MENGGUNAKAN PENDEKATAN ANALISIS FREKUENSI

AJIS NUR EFENDI, YOSYEA OKTAVIANDRA, MUHAMAD FARID GEONOVA

IDENTIFIKASI SEBARAN ABU VULKANIK DAN ANALISIS PROFIL VERTIKAL STABILITAS ATMOSFER PASCA ERUPSI GUNUNG MARAPI DESEMBER 2023

NINDYA SEKAR ANNISA, IRSYAD HUMAIDI, NAJLA AILIYA AZZAHRA

ANALISIS THRESHOLDS CURAH HUJAN PEMICU LONGSOR DI KULON PROGO DIY BERDASARKAN DATA KOMPOSIT GSMAP PADA PERIODE OND TAHUN 2020 - 2022

LU'LU NABILA KHANSA, DENISA AJENG SABRINA, BELA SELA CLEODORA YOSTYA, YOGI PRATAMA HIDAYAT, ANDUNG BAYU SEKARANOM, ANDRIYAS ARYO PRABOWO

ANALISIS DINAMIKA ATMOSFER KEJADIAN ANGIN PUTING BELIUNG TANJUNG BALAI KARIMUN (STUDI KASUS: 14 MEI 2024)

MUHAMAD SAWAL, DEA ANDITA SIREGAR, YOUNGGY H.M HUTABARAT

MEGASAINS

VOLUME 15

NOMOR 2

**HALAMAN
1 - 48**

**BKT
DESEMBER 2024**

**P-ISSN 2086-5589
E-ISSN 2723-2239**

**BADAN METEOROLOGI, KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA
STASIUN PEMANTAU ATMOSFER GLOBAL (GAW) BUKIT KOTOTABANG**



Vol. 15, No.2 – Desember 2024

Diterbitkan Oleh

Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika

Jl. Raya Bukittinggi-Medan Km.17 Palupuh, Sumatera Barat

SUSUNAN REDAKSI

PENANGGUNG JAWAB

Dr. Sugeng Nugroho, M.Si

REDAKTUR KEPALA

Reza Mahdi, ST, MM

REDAKTUR

Darmadi, ST

EDITOR TAMU

Dr. Hamdi Rivai

Dr. Fajar Gumbira

Alberth Christian Nahas, MCC, P.hD

Dr. Ida Pramuwardani

REVIEWER

Prof. Vera Bachtiar

Dr. Ardhasena Sopaheluwakan

Dr. Donaldi Permana

Supari, PhD

Dr. Supriadi Rohadi

Dr. Erwin Syah Makmur

Dr. Nofi Yetri Sudiar

Dr. Marzuki

Dr. Didin Agustan Permadi

Dr. Ahmad Faqih

Dr. Perdinan

Dr. Deni Okta Lestari

Dr. Eng. Indra Chandra

EDITOR

Andi Sulistiyono, S.Si

Dodi Saputra, S.Si

Tanti Tritama Okaem, M.Si

Ikhsan Buyung Arifin, S.Tr

DESAIN GRAFIS DAN FOTOGRAFER

Rinaldi, A.Md

Dhiyaul Qalbi Syofyan, S.Tr

Soni Miftah Pratama, S.Tr

SEKRETARIAT

Diko Revano Umbara, SE

Rendi Septa Davi, S.Tr

Dwiky Pujo Pratama, S.Tr

Quartha Rivaldo, S.Tr

Iman Ahmadi Hardian, S.Si

Kharir Frestia Deastari, S.Tr.Klim

Kiagus Ardi Zulistiawan, S.Tr.Klim

Ridwan, S.Tr.Inst

Rizka Fayu Fadila, A.Md

Ibrahim

MEGASAINS

MEGASAINS merupakan buletin yang diterbitkan oleh Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang sebagai media penuangan Karya Tulis ilmiah (KTI) yang bersumber dari kegiatan penelitian berbasis ilmu-ilmu Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara, dan Geofisika (MKKuG), serta Lingkungan.

Dewan Redaksi membuka kesempatan bagi para pakar ataupun praktisi untuk dapat mengirimkan naskah KTI, terutama yang berkaitan dengan fokus utama dari Buletin MEGASAINS.

Naskah KTI yang dikirimkan hendaknya asli dan belum pernah dipublikasikan. Naskah diketik dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Word* dengan ketentuan panjang naskah maksimal 8 halaman pada kertas ukuran A4; dengan margin atas, bawah, kiri, dan kanan 2.5 cm; dua kolom; font Arial. Judul ditulis menggunakan font 14 pts, rata kiri, spasi tunggal, huruf kapital dan cetak tebal, isi ditulis menggunakan font 10 pts, rata kiri-kanan dan spasi tunggal, tulisan disertai dengan abstrak sepanjang satu alinea, dicetak dengan font 10 pts, spasi tunggal dan disertai dengan 2-5 kata kunci.

Dewan Redaksi berhak mengubah isi naskah sepanjang tidak mengubah substansinya. Isi naskah adalah sepenuhnya tanggung jawab penulis. Pemilihan naskah yang laik cetak adalah sepenuhnya hak Dewan Redaksi.

Informasi lebih lanjut dan pengiriman naskah tulisan dapat mengunjungi portal:
<https://megasains.gawbkt.id>.

-halaman ini sengaja dikosongkan-

Pengantar Redaksi

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Puji syukur kami ucapkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena dengan izin-Nya lah Jurnal Megasains Volume 15 No. 2 tahun 2024 ini dapat terbit sebagaimana yang diharapkan.

Jurnal Megasains didedikasikan oleh Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Bukit Kototabang sebagai sarana penerbitan karya ilmiah yang bersumber dari kegiatan penelitian berbasis ilmu-ilmu Meteorologi, Klimatologi, Kualitas udara dan Geofisika (MKKuG), serta Lingkungan. Jurnal ini diterbitkan setahun dua kali guna memberikan kesempatan bagi penulis-penulis berbakat untuk berkontribusi.

Mulai Volume 10 No 2 tahun 2019 kami sudah menerapkan sistem jurnal online yang memudahkan para penulis untuk mengirim naskahnya, kemudian memantau progress review hingga kemudian mendapat notifikasi diterima atau harus diperbaiki. Dari sisi Redaksi dan Mitra Bestari selaku tim *review* dapat memberi notifikasi semua proses penerimaan naskah hingga kemudian terbit.

Akhir kata, semoga jurnal ini dapat memberikan manfaat kepada khalayak ramai dalam bagian usaha bersama untuk mencerdaskan bangsa. Kami ucapkan terima kasih kepada para penulis. Tim reviewer dan Tim Redaksi yang telah bekerja keras demi terbitnya Volume 15 No.2 tahun 2024 ini.

Sekian, wassalamu'alaikum Wr. Wb

Bukit Kototabang, Desember 2024

Daftar KTI

EVALUASI RESIKO CUACA DI PELABUHAN TELUK BAYUR MENGGUNAKAN PENDEKATAN ANALISIS FREKUENSI Ajis Nur Efendi, Yosyea oktaviandra, Muhamad Farid Geonova	1-12
IDENTIFIKASI SEBARAN ABU VULKANIK DAN ANALISIS PROFIL VERTIKAL STABILITAS ATMOSFER PASCA ERUPSI GUNUNG MARAPI DESEMBER 2023 Nindya Sekar Annisa, Irsyad Humaidi, Najla Ailiya Azzahra	13-22
ANALISIS THRESHOLDS CURAH HUJAN PEMICU LONGSOR DI KULON PROGO DIY BERDASARKAN DATA KOMPOSIT GSMAP PADA PERIODE OND TAHUN 2020 - 2022 Lu'lu Nabila Khansa, Denisa Ajeng Sabrina, Bela Sela Cleodora Yostya, Yogi Pratama Hidayat, Andung Bayu Sekaranom, Andriyas Aryo Prabowo	23-37
ANALISIS DINAMIKA ATMOSFER KEJADIAN ANGIN PUTING BELIUNG TANJUNG BALAI KARIMUN (STUDI KASUS: 14 MEI 2024) Muhamad Sawal, Dea Andita Siregar, Younggy H.M Hutabarat	38-48

EVALUASI RESIKO CUACA DI PELABUHAN TELUK BAYUR MENGGUNAKAN PENDEKATAN ANALISIS FREKUENSI

WEATHER RISK EVALUATION AT TELUK BAYUR HARBOR USING FREQUENCY ANALYSIS APPROACH

Ajis Nur Efendi^{1*}, Yosyea oktaviandra², Muhamad Farid Geonova³

¹Stasiun Meteorologi Nangapinoh-Melawi, Jl. Juang Km 2,5 Kompleks Bandar Udara Nangapinoh

²Stasiun Meteorologi Maritim Teluk Bayur, Jl. Sutan syahrir komp. Pelindo no. 26, Rawang, Padang Selatan

³Pusat Meteorologi Maritim, Jl. Angkasa I No. 2 Kemayoran Jakarta

*E-mail: ajis.efendi@bmkg.go.id

Naskah masuk: 01-03-2024

Naskah diperbaiki: 09-06-2024

Naskah diterima: 23-11-2024

ABSTRAK

Penilaian risiko cuaca di pelabuhan memegang peranan penting dalam menjaga keselamatan dan efisiensi operasional. Dalam penelitian ini, evaluasi risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur dilakukan melalui pendekatan analisis frekuensi. Data historis cuaca, seperti curah hujan dan tinggi gelombang laut, dikumpulkan selama periode 2017-2022. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi distribusi statistik dari variabel cuaca yang relevan. Hasil analisis menunjukkan bahwa curah hujan rata-rata tertinggi terjadi pada bulan November, mencapai 528,55 mm, dan rata-rata jumlah hari hujan tertinggi juga pada bulan yang sama, yaitu November, dengan nilai mencapai 21,5 hari. Sementara itu, rata-rata tinggi gelombang tertinggi di sekitar pelabuhan terjadi pada bulan Juli dan Agustus, dengan tinggi gelombang rata-rata mencapai 1,25 meter. Informasi ini dapat digunakan sebagai dasar untuk merancang strategi mitigasi risiko yang tepat, seperti penjadwalan kegiatan operasional yang lebih efisien, peningkatan infrastruktur pelabuhan, atau pengembangan sistem peringatan dini yang lebih baik.

Kata kunci: Cuaca, Curah Hujan, Gelombang, risiko

ABSTRACT

The assessment of weather risks at ports plays a crucial role in maintaining safety and operational efficiency. In this study, weather risk evaluation at Teluk Bayur Port was conducted using a frequency analysis approach. Historical weather data, such as rainfall and sea wave height, were collected during the period 2017-2022. This approach was utilized to identify the statistical distribution of relevant weather variables. The analysis results indicated that the highest average rainfall occurred in November, reaching 528.55 mm, with the highest average number of rainy days also recorded in the same month at 21.5 days. Meanwhile, the highest average wave height around the port was observed in July and August, reaching 1.25 meters. This information can serve as a basis for designing appropriate risk mitigation strategies, such as scheduling more efficient operational activities, enhancing port infrastructure to withstand extreme weather conditions, or developing better early warning systems.

Keywords: Weather, Rainfall, Waves, Risk

1. Pendahuluan

Pelabuhan Teluk Bayur merupakan salah satu pelabuhan penting di wilayah pesisir Sumatera Barat, Indonesia. Pelabuhan ini, memiliki peran yang signifikan dalam mendukung kegiatan ekonomi dan perdagangan regional [1]. Sebagai pintu gerbang maritim yang penting, pelabuhan ini menjadi pusat aktivitas bongkar muat, distribusi barang, dan layanan transportasi laut [2]. Namun, seperti halnya pelabuhan-pelabuhan lainnya, Pelabuhan Teluk Bayur juga dihadapkan pada risiko cuaca yang dapat mempengaruhi operasional dan keselamatan di pelabuhan tersebut.

Dalam situasi cuaca ekstrem atau tidak menguntungkan, pelabuhan dapat menghadapi berbagai tantangan, termasuk penundaan pelayaran, risiko kecelakaan kapal, kerugian finansial, dan dampak negatif terhadap rantai pasokan [3]. Cuaca ekstrem merujuk pada kondisi cuaca yang di luar norma atau di luar pola cuaca yang umum terjadi di suatu wilayah pada suatu waktu tertentu [4]. Oleh karena itu, evaluasi risiko cuaca yang akurat dan efektif sangat penting untuk meningkatkan keselamatan, efisiensi operasional, dan kesiapan dalam menghadapi kondisi cuaca yang berubah-ubah [5]. Evaluasi risiko sendiri merupakan proses sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi potensi risiko yang terkait dengan suatu kegiatan, kejadian, atau situasi tertentu [6].

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur menggunakan pendekatan analisis frekuensi. Pendekatan ini akan membantu mengidentifikasi pola dan tingkat keparahan cuaca ekstrem yang mungkin terjadi di pelabuhan. Dengan memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang distribusi statistik dari variabel cuaca, seperti kecepatan angin, curah hujan, dan tinggi gelombang laut, kita dapat memprediksi dan mengukur risiko yang terkait dengan kondisi cuaca yang tidak menguntungkan.

Evaluasi risiko cuaca yang komprehensif akan memberikan wawasan yang lebih baik tentang tingkat risiko yang terkait dengan kondisi cuaca ekstrem [7]. Hal ini akan membantu dalam pengembangan strategi mitigasi risiko yang efektif, termasuk penjadwalan kegiatan operasional, pengembangan infrastruktur yang tahan cuaca, pelaksanaan sistem peringatan dini, dan pelatihan personel dalam menghadapi situasi cuaca yang kompleks.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh informasi yang dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait keselamatan, efisiensi operasional, dan manajemen risiko di Pelabuhan Teluk Bayur. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat berkontribusi pada pemahaman lebih lanjut tentang risiko cuaca dalam konteks pelabuhan di wilayah pesisir Indonesia.

Dengan meningkatnya pemahaman tentang risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur, diharapkan akan ada upaya yang lebih baik dalam memitigasi risiko, mengoptimalkan operasional pelabuhan, dan melindungi aset serta kepentingan yang terkait.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan analisis frekuensi untuk mengevaluasi risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur. Metode kuantitatif adalah suatu metode penelitian yang melibatkan pengumpulan, analisis, dan interpretasi data berdasarkan angka-angka atau ukuran kuantitatif [8]. Metode ini berfokus pada penggunaan data numerik untuk memahami pola, hubungan, dan tren dalam suatu fenomena atau populasi [9]. Metode kuantitatif sering digunakan dalam berbagai bidang, seperti ilmu sosial, ekonomi, ilmu alam, dan kedokteran, untuk menghasilkan pemahaman yang lebih objektif dan dapat diukur terhadap berbagai fenomena.

Pendekatan analisis frekuensi dipilih karena mampu mengidentifikasi pola-pola frekuensi kejadian cuaca yang dapat membantu dalam merumuskan strategi manajemen risiko. Penelitian ini akan dilakukan di Pelabuhan Teluk Bayur, Indonesia. Data cuaca yang akan digunakan mencakup rentang waktu 6 tahun terakhir yaitu periode 2017-2022. Data yang digunakan dalam penelitian ini akan berupa data historis cuaca yang mencakup parameter-parameter seperti, curah hujan, dan gelombang laut.

Data gelombang laut diolah melalui penggunaan model gelombang yang dimiliki oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Model ini merupakan bagian dari Ocean Forecasting System (OFS), suatu sistem yang digunakan untuk meramalkan kondisi laut. Dalam pemodelan gelombang ini, metode yang diterapkan mengacu pada WaveWatch III (WW3), sebuah sistem model gelombang generasi ketiga yang dikembangkan oleh National Centers for Environmental Prediction

(NCEP), yang merupakan bagian dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [10]. Sementara itu, data mengenai Curah Hujan, hari hujan, serta arah dan kecepatan angin diperoleh dari stasiun meteorologi maritim di Teluk Bayur. Informasi ini digunakan dalam analisis dan penilaian risiko cuaca di pelabuhan tersebut. Prosedur penelitian yang akan dijalankan dalam evaluasi risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur menggunakan pendekatan analisis frekuensi terdiri dari beberapa langkah. Pertama, pengumpulan data cuaca historis akan dilakukan dengan mengambil data dari stasiun meteorologi maritime Teluk Bayur dengan lokasi penelitian, yaitu Pelabuhan Teluk Bayur. Data cuaca historis ini akan meliputi informasi seperti kecepatan angin, curah hujan, dan gelombang laut dalam kurun waktu yang relevan.

Setelah data terkumpul, langkah berikutnya adalah melakukan analisis data. Data cuaca historis yang telah terkumpul akan diolah menggunakan metode analisis statistik. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengidentifikasi distribusi frekuensi dari parameter-parameter cuaca yang relevan. Analisis statistik ini akan membantu dalam memahami pola frekuensi kejadian cuaca ekstrem di Pelabuhan Teluk Bayur.

Setelah distribusi frekuensi teridentifikasi, langkah selanjutnya adalah penggunaan model. Model distribusi frekuensi yang sesuai dengan data akan digunakan untuk memprediksi frekuensi kejadian cuaca ekstrem di masa mendatang. Model ini akan memberikan gambaran tentang potensi frekuensi kejadian cuaca ekstrem yang dapat terjadi di pelabuhan tersebut.

Langkah terakhir dalam prosedur penelitian adalah evaluasi risiko. Dengan mengacu pada frekuensi kejadian cuaca ekstrem yang diidentifikasi melalui analisis frekuensi, risiko cuaca akan dievaluasi secara komprehensif. Evaluasi risiko ini akan membantu dalam merumuskan strategi mitigasi dan manajemen risiko yang tepat. Hasil evaluasi risiko akan memberikan panduan berharga dalam mengembangkan langkah-langkah konkret untuk menghadapi cuaca ekstrem di Pelabuhan Teluk Bayur, sehingga operasi pelabuhan dapat tetap berjalan dengan lebih efektif dan aman.

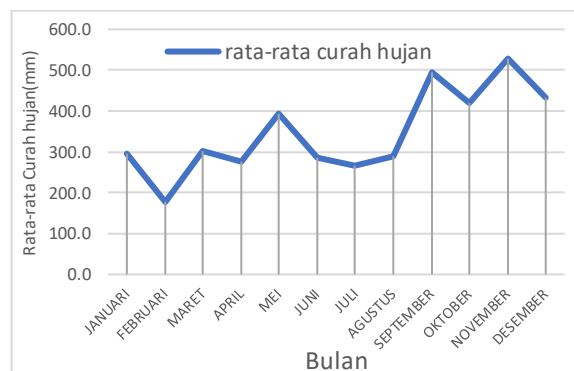
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Curah Hujan

Dalam pembahasan ini, analisis curah hujan difokuskan pada tiga parameter utama yang meliputi rata-rata curah hujan bulanan, rata-rata jumlah hari hujan, dan curah hujan maksimum yang terjadi setiap bulan. Ketiga parameter ini penting untuk memahami pola distribusi hujan di suatu wilayah dan menentukan intensitas serta durasi hujan yang dapat mempengaruhi kondisi operasional di pelabuhan atau kawasan tertentu terutama dalam penelitian ini wilayah sekitar Pelabuhan Teluk Bayur.

Untuk pembahasa yang pertama, akan dibahas mengenai rata-rata curah hujan. Rata-rata curah hujan bulanan memberikan gambaran tentang jumlah air hujan yang turun dalam satu bulan secara rata-rata. Analisis ini penting karena membantu mengidentifikasi bulan-bulan dengan tingkat hujan tertinggi dan terendah. Bulan dengan curah hujan rata-rata tertinggi menunjukkan periode dengan potensi genangan atau banjir lebih tinggi, sedangkan bulan dengan curah hujan rendah biasanya menjadi periode yang lebih aman dari segi risiko banjir.

Berdasarkan hasil pengolahan data yang dilakukan untuk hasil rata-rata curah hujan bisa dilihat pada gambar di bawah ini:

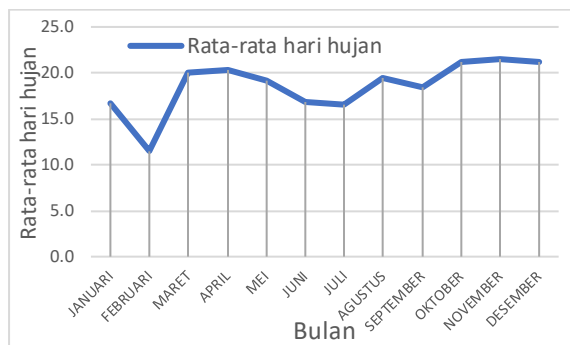


Gambar 1. Rata-rata Curah hujan di stasiun meteorologi Teluk Bayur

Berdasarkan gambar 1, Analisis data curah hujan rata-rata untuk periode 2017 hingga 2022 mengungkapkan variasi yang signifikan dalam pola curah hujan bulanan di lokasi studi. Bulan-bulan dengan curah hujan tertinggi seperti September dan November menunjukkan angka yang jauh lebih tinggi daripada bulan-bulan lainnya, dengan nilai masing-masing mencapai 493,68 mm dan 528,55 mm. Di sisi lain, bulan-bulan dengan curah hujan terendah seperti Februari dan Juli memiliki angka yang lebih rendah, yaitu 177,23 mm dan 267,22 mm. Dengan perbedaan yang mencolok ini, dapat diketahui bahwa musim hujan yang terjadi pada akhir tahun (September-Desember) memiliki dampak yang lebih besar dalam kontribusinya terhadap curah hujan tahunan di wilayah

tersebut. Hal ini dapat memiliki implikasi penting dalam evaluasi risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur, karena kejadian cuaca ekstrem terkait hujan lebat dapat lebih mungkin terjadi pada bulan-bulan ini. Oleh karena itu, manajemen risiko di pelabuhan perlu mempertimbangkan dampak curah hujan yang tinggi selama periode ini dalam mengembangkan strategi mitigasi dan penyesuaian operasional yang diperlukan.

Untuk analisis curah hujan berikutnya adalah rata-rata hari hujan. Rata-rata hari hujan bulanan merujuk pada jumlah hari dalam satu bulan di mana terjadi hujan. Parameter ini memberikan informasi tentang frekuensi hujan dalam sebulan. Dengan mengetahui rata-rata hari hujan, kita dapat memahami pola frekuensi hujan. Misalnya, jika sebuah bulan memiliki rata-rata hari hujan yang tinggi, berarti hujan turun hampir setiap hari, meskipun tidak selalu intens. Hal ini penting bagi perencanaan aktivitas yang tergantung pada cuaca di luar ruangan. Hasil rata-rata hari hujan dalam analisis ini bisa dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2. Rata-rata hari hujan di stasiun meteorologi Teluk Bayur.

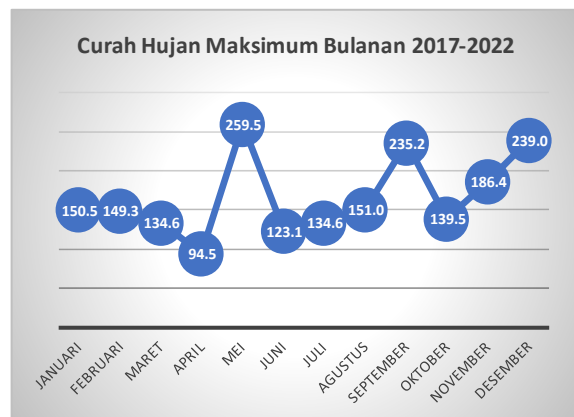
Berdasarkan gambar 2. Analisis data rata-rata jumlah hari hujan selama periode 2017 hingga 2021 memberikan gambaran yang menarik tentang pola kejadian hujan dalam setiap bulan. Data ini memberikan indikasi tentang frekuensi kejadian hujan dalam kurun waktu tersebut. Berdasarkan data, dapat dilihat bahwa bulan-bulan dengan jumlah hari hujan yang lebih tinggi, seperti Oktober, November, dan Desember, menunjukkan angka yang signifikan. Bulan Oktober memiliki rata-rata 21 hari hujan, sementara November dan Desember memiliki rata-rata masing-masing sebanyak 22 dan 21 hari hujan. Hal ini mengindikasikan bahwa akhir tahun cenderung mengalami periode yang lebih basah dan cuaca lebih lembab. Di sisi lain, bulan-bulan seperti Februari dan Juli memiliki jumlah hari hujan yang lebih rendah, yaitu masing-masing 12 dan 17 hari. Ini menunjukkan bahwa musim kemarau atau periode dengan kejadian

hujan yang lebih sedikit cenderung terjadi pada bulan-bulan ini.

Analisis ini memiliki implikasi penting dalam manajemen risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur. Bulan-bulan dengan jumlah hari hujan yang tinggi dapat mengindikasikan potensi risiko banjir atau gangguan operasional akibat hujan yang berkepanjangan. Oleh karena itu, strategi manajemen risiko harus mencakup rencana dan penyesuaian operasional yang tepat untuk mengatasi periode-periode cuaca lembab ini. Di sisi lain, bulan-bulan dengan jumlah hari hujan yang rendah mungkin menjadi periode yang lebih aman untuk pelaksanaan operasi di pelabuhan.

Analisis berikutnya terkait curah hujan adalah analisis curah hujan maksimum bulanan. Curah hujan maksimum bulanan adalah jumlah curah hujan tertinggi yang tercatat dalam satu hari pada suatu bulan tertentu. Analisis curah hujan maksimum penting untuk mengidentifikasi hari-hari ekstrem dengan intensitas hujan tinggi yang berpotensi menimbulkan bencana hidrometeorologi. Informasi ini sangat berguna dalam perencanaan mitigasi risiko bencana, khususnya untuk bulan-bulan dengan potensi hujan ekstrem.

Berikut adalah hasil analisis curah hujan maksimum bulanan periode 2017 – 2022 di sekita belabuhan Teluk Bayur:



Gambar 3. Curah Hujan Maksimum bulanan di stasiun meteorologi Teluk Bayur.

Berdasarkan hasil analisis data curah hujan maksimum bulanan periode 2017-2022, terlihat adanya variasi intensitas hujan sepanjang tahun. Pada bulan Januari, curah hujan maksimum tercatat sebesar 150,5 mm pada 9 Januari 2020. Bulan Februari menunjukkan angka yang hampir serupa dengan curah hujan maksimum sebesar 149,3 mm pada 14 Februari 2018. Selanjutnya, pada bulan Maret, curah hujan maksimum tercatat 134,6 mm

pada 6 Maret 2021, dan pada bulan April, turun menjadi 94,5 mm pada 22 April 2018. Pada bulan Mei, curah hujan maksimum mencapai puncaknya dengan 259,5 mm pada 30 Mei 2017. Di bulan Juni, nilai maksimum tercatat sebesar 123,1 mm pada 23 Juni 2018. Pada bulan Juli, curah hujan kembali naik dengan angka maksimum 134,6 mm pada 22 Juli 2020, dan di bulan Agustus tercatat 151,0 mm pada 28 Agustus 2022. Pada bulan September, curah hujan maksimum tercatat sebesar 235,2 mm pada 9 September 2020. Bulan Oktober mencatat angka 139,5 mm pada 9 Oktober 2017. Sementara itu, curah hujan maksimum pada bulan November mencapai 186,4 mm pada 16 November 2022, dan pada bulan Desember, angka tersebut mencapai 239,0 mm pada 24 Desember 2019.

Dari data ini, dapat dilihat bahwa bulan Mei dan Desember memiliki curah hujan maksimum tertinggi dalam periode analisis ini. Informasi ini dapat menjadi dasar dalam merencanakan langkah-langkah yang diperlukan untuk mengantisipasi dampak dari curah hujan yang tinggi, khususnya dalam perencanaan operasional dan mitigasi risiko di wilayah pelabuhan.

3.2 Analisis Angin

Dalam Pembahasan terkait analisis angin terdapat beberapa unsur diantaranya arah angin, rata-rata kecepatan angin dan juga kecepatan angin maksimum. Untuk pembahasan yang pertama yaitu arah angin rata-rata yang dapat dilihat dari data berikut ini:

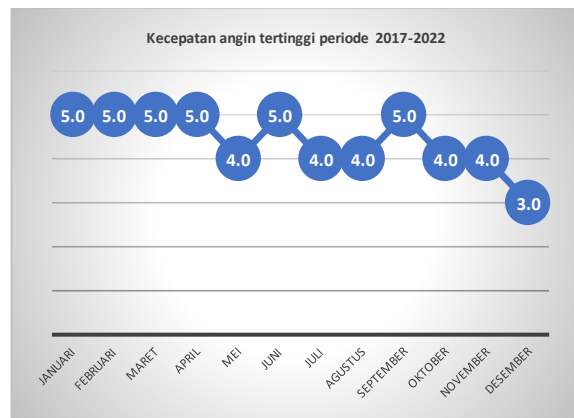
Tabel 1. Arah dan Kecepatan angin rata-rata periode 2017 – 2022

Tahun / Bulan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	dd	ff	dd	ff	dd	ff	dd	ff	dd	ff	dd	ff
2017	S	2,5	S	2,9	W	2,5	SW	1,8	S	1,6	SW	1,7
2018	SW	1,7	SW	2,1	SW	2,0	SW	1,7	S	1,6	S	1,6
2019	S	1,9	S	2,3	SW	2,2	S	2,2	S	1,9	S	1,6
2020	S	1,7	S	1,9	S	1,5	S	1,6	NE	1,7	S	1,3
2021	S	1,1	S	1,4	S	1,4	SW	1,3	SW	1,4	S	1,2
2022	SW	1,1	S	1,1	W	1,2	S	1,2	S	1,2	SW	1,1

Berdasarkan data rata-rata arah dan kecepatan angin dari tahun 2017 hingga 2022, terlihat bahwa arah angin dominan berasal dari Selatan (S) dan Barat Daya (SW). Arah Selatan mendominasi hampir setiap bulan, terutama dari Januari hingga Juli, sedangkan arah Barat Daya sering muncul di bulan Maret, April, dan Agustus. Pada bulan tertentu, seperti Mei dan Oktober, arah angin juga bervariasi dengan adanya angin dari Timur Laut (NE) dan Barat (W), meskipun frekuensinya tidak setinggi arah Selatan dan Barat Daya. Kecepatan angin rata-rata tertinggi tercatat pada bulan Januari 2017 dengan kecepatan 2,5 knot dan pada bulan

September 2019 sebesar 2,8 knot, menunjukkan bahwa kecepatan angin cenderung lebih tinggi di awal tahun dan pada bulan September. Secara keseluruhan, kecepatan angin rata-rata berkisar antara 1,0 hingga 2,5 knot, namun pada tahun 2021 dan 2022 terlihat kecenderungan penurunan kecepatan, dengan rata-rata berkisar antara 1,0 hingga 1,4 knot. Pola arah angin yang dominan dari Selatan sepanjang tahun menunjukkan pengaruh musiman yang kuat, sedangkan arah Timur Laut yang sesekali muncul di bulan Mei dan Oktober menandakan adanya perubahan pola musiman. Informasi ini bermanfaat dalam perencanaan operasional, terutama untuk aktivitas yang dipengaruhi kondisi angin, seperti pelayaran dan logistik di pelabuhan.

Data mengenai kecepatan angin maksimum yang pernah tercatat selama periode penelitian ditampilkan pada gambar berikut ini. Informasi ini memberikan gambaran mengenai kecepatan angin tertinggi yang terjadi pada berbagai waktu, sehingga dapat membantu dalam memahami pola dan intensitas angin di wilayah tersebut. Melalui data ini, kita dapat melihat variasi kecepatan angin maksimum yang tercatat, yang berguna untuk analisis lebih lanjut terkait potensi dampaknya terhadap aktivitas di area tersebut. Gambar berikut menampilkan rincian kecepatan angin maksimum yang pernah terjadi.



Gambar 4. Kecepatan Angin Maksimum Periode 2017 - 2022 Di Stasiun Meteorologi Teluk Bayur.

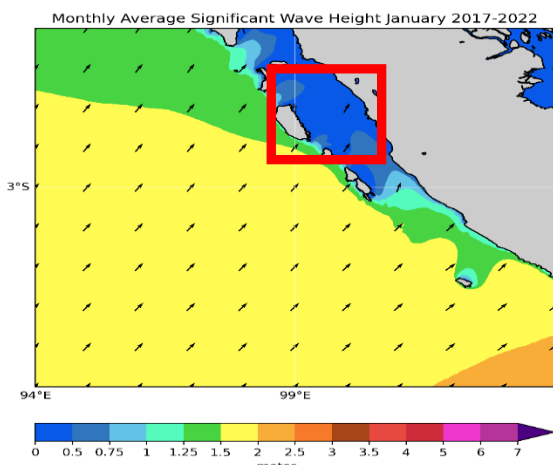
Berdasarkan data kecepatan angin maksimum bulanan dari periode 2017 hingga 2022, terlihat bahwa kecepatan angin maksimum berkisar antara 3 hingga 5 knot di berbagai bulan. Kecepatan angin maksimum tertinggi, yaitu 5 knot, tercatat pada bulan Januari, Februari, Maret, April, Juni, dan September. Sementara itu, bulan Mei, Juli, Agustus, Oktober, dan November mencatatkan kecepatan angin maksimum sebesar 4 knot, sedangkan kecepatan terendah terjadi pada bulan Desember dengan nilai 3 knot.

Data ini menunjukkan bahwa kecepatan angin maksimum relatif stabil sepanjang tahun, dengan sedikit penurunan pada bulan Desember. Bulan-bulan dengan kecepatan angin maksimum tinggi (5 knot) mencakup bulan awal tahun seperti Januari hingga April, serta bulan pertengahan hingga akhir tahun seperti Juni dan September. Penurunan kecepatan angin pada bulan Desember menandakan adanya perbedaan kondisi angin dibandingkan dengan bulan-bulan lainnya.

Informasi mengenai kecepatan angin maksimum ini penting untuk kegiatan operasional yang sensitif terhadap kondisi angin, terutama di sektor maritim dan pelabuhan.

3.3 Analisis Gelombang

Analisis mengenai kondisi gelombang di wilayah penelitian ini akan ditampilkan dalam bentuk data rata-rata tinggi gelombang bulanan selama periode 2017 hingga 2022. Data ini mencakup informasi mengenai gelombang signifikan yang terjadi di area penelitian, yaitu Pelabuhan Teluk Bayur dan lautan di sekitarnya. Dengan menggunakan data ini, diharapkan dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai variasi tinggi gelombang yang terjadi setiap bulan dalam periode tersebut. Seluruh informasi terkait rata-rata tinggi gelombang bulanan dapat dilihat pada gambar berikut ini, yang memuat rincian lengkap untuk setiap bulan dan memberikan pandangan lebih komprehensif mengenai kondisi perairan di wilayah penelitian selama beberapa tahun terakhir.

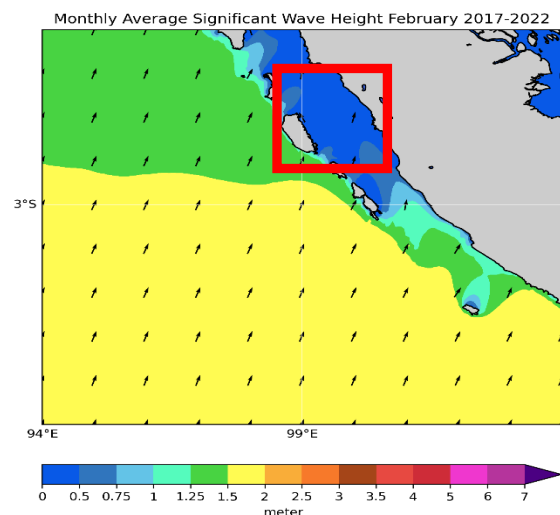


Gambar 5. Gelombang signifikan bulan Januari

Pada bulan Januari, wilayah di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur menunjukkan karakteristik gelombang yang berbeda tergantung pada lokasi geografis. Di dekat pelabuhan itu sendiri, gelombang signifikan

cenderung relatif rendah, dengan kisaran antara 0 hingga 0,75 meter. Namun, ketika menjelajahi perairan lebih dalam di sekitar Laut lepas dan sekitar Samudra Hindia, pola gelombang mengalami perubahan. Di area ini, gelombang signifikan memiliki kisaran yang lebih tinggi, yaitu berkisar antara 1,25 hingga 2,0 meter.

Untuk gelombang signifikan pada bulan Februari bisa dilihat pada gambar berikut ini :

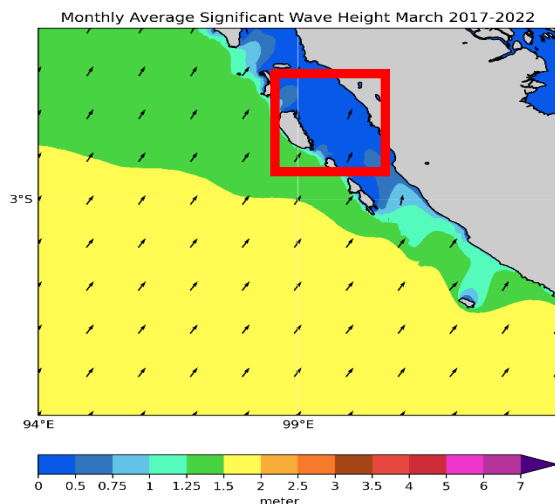


Gambar 6. Gelombang signifikan bulan Februari

Pada bulan Februari, pola gelombang signifikan di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur menunjukkan konsistensi dengan bulan Januari. Wilayah di sekitar pelabuhan tetap memiliki gelombang signifikan dengan rentang yang sama seperti bulan Januari, yaitu antara 0 hingga 0,75 meter. di sekitar Laut lepas dan Samudra Hindia, gelombang signifikan juga tetap dalam rentang yang serupa dengan bulan sebelumnya. Di area ini, gelombang signifikan berkisar antara 1,25 hingga 2,0 meter.

Pola ini menunjukkan adanya kestabilan dalam karakteristik gelombang selama bulan Februari. Meskipun ada variasi antara lokasi di dekat pelabuhan dan area lebih jauh seperti Laut lepas dan Samudra Hindia, tinggi gelombang signifikan tetap dalam rentang yang diperkirakan. Informasi ini dapat membantu dalam merencanakan aktivitas maritim, operasional pelabuhan, dan navigasi dengan mempertimbangkan kondisi gelombang yang dapat diharapkan selama bulan Februari di wilayah tersebut.

Untuk Bulan Maret gelombang signifikan bisa dilihat pada gambar berikut ini:



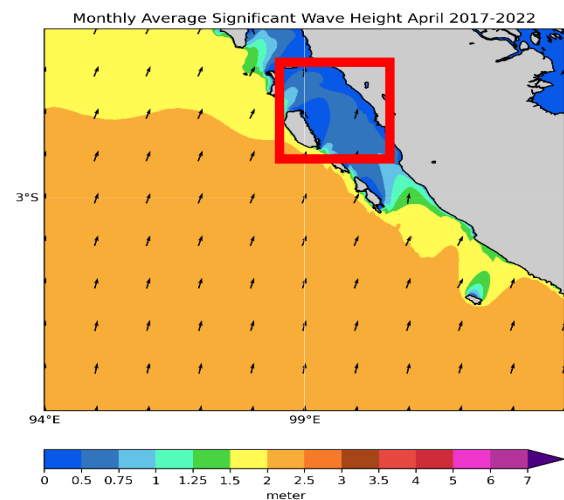
Gambar 7. Gelombang signifikan bulan Maret

Berdasarkan data yang diberikan, terlihat bahwa karakteristik gelombang signifikan tetap relatif stabil di wilayah sekitar Pelabuhan Teluk Bayur pada bulan Maret. Seperti yang diamati sebelumnya, baik di sekitar pelabuhan maupun dekat Samudra Hindia, gelombang signifikan memiliki nilai yang tetap sama dengan bulan-bulan sebelumnya, yaitu berkisar antara 0 hingga 0,75 meter di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur dan berkisar antara 1,25 hingga 2,0 meter ketika memasuki perairan Samudra Hindia.

Pola ini menunjukkan adanya konsistensi dalam karakteristik gelombang selama beberapa bulan terakhir. Stabilitas ini dalam tinggi gelombang mungkin disebabkan oleh faktor-faktor cuaca dan geografis yang relatif tetap selama periode tersebut. Namun, walaupun karakteristik gelombang tidak mengalami perubahan yang signifikan, penting untuk tetap memantau nilai-nilai ini secara berkala dalam upaya evaluasi risiko dan manajemen operasional di Pelabuhan Teluk Bayur.

Pada bulan April, tinggi gelombang signifikan di wilayah penelitian menunjukkan variasi tertentu yang menarik untuk dianalisis lebih lanjut. Gambar berikut ini menampilkan rincian mengenai gelombang signifikan yang tercatat selama bulan April. Melalui data ini, kita dapat melihat pola perubahan tinggi gelombang dan memahami dinamika laut yang terjadi pada bulan tersebut. Informasi yang ditampilkan memberikan gambaran tentang karakteristik gelombang di perairan sekitar lokasi penelitian, termasuk potensi peningkatan atau penurunan tinggi gelombang pada periode ini. Gambar berikut akan membantu dalam mengidentifikasi tingkat aktivitas gelombang signifikan yang

terjadi di bulan April dan menjadi referensi penting untuk keperluan analisis serta pengambilan keputusan operasional di area tersebut.

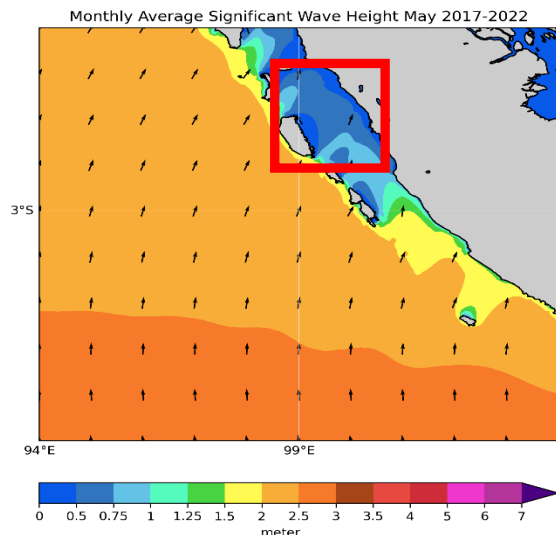


Gambar 8. Gelombang signifikan bulan April

Dari analisis data yang diperoleh dan dapat dilihat pada Gambar 6, pola karakteristik gelombang di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur dapat diuraikan dengan jelas. Dominasi ketinggian gelombang signifikan terjadi di wilayah sekitar pelabuhan, di mana ketinggian gelombang berkisar antara 0,5 hingga 0,75 meter. Namun, ketika kita memperluas pandangan ke wilayah laut lepas dan sekitar Samudra Hindia, gelombang signifikan menunjukkan tinggi yang lebih besar, yakni berkisar antara 1,5 hingga 2,5 meter. Perbedaan ini menggambarkan adanya transisi dari perairan yang lebih tenang di sekitar pelabuhan ke perairan yang lebih terbuka dan rentan terhadap pengaruh cuaca dan arus laut.

Dengan demikian, analisis data dan Gambar 6 secara visual menggarisbawahi perbedaan yang mencolok dalam ketinggian gelombang di kedua lokasi tersebut. Hal ini memiliki implikasi penting dalam penilaian risiko cuaca dan kegiatan maritim di Pelabuhan Teluk Bayur. Pihak terkait perlu mempertimbangkan pola dan karakteristik gelombang ini untuk mengambil tindakan yang sesuai dalam manajemen operasional serta keselamatan di perairan sekitarnya.

Untuk gelombang signifikan pada bulan Mei di lokasi penelitian yaitu pelabuhan Teluk Bayur dan sekitarnya bisa dilihat pada gambar berikut ini:



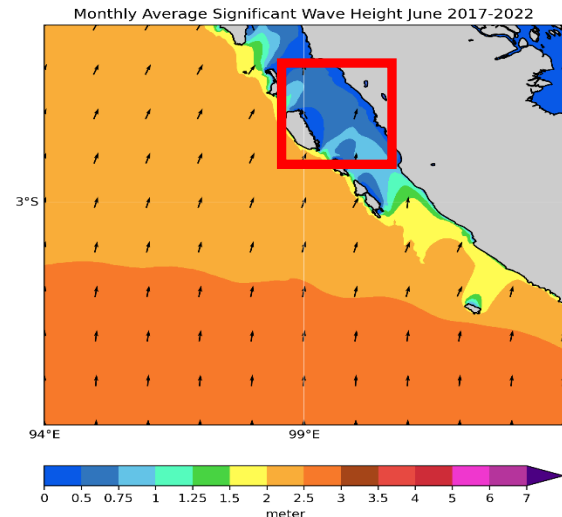
Gambar 9. Gelombang signifikan bulan Mei

Dari penafsiran terhadap Gambar 7, dapat dilihat bahwa karakteristik gelombang di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur memiliki variasi yang mencolok. Di sekitar pelabuhan, nilai ketinggian gelombang signifikan cenderung lebih rendah, berkisar antara 0 hingga 1 meter. Pola ini mengindikasikan bahwa perairan dekat pelabuhan cenderung memiliki gelombang yang cukup tenang dan relatif stabil.

Namun, ketika pandangan diperluas ke wilayah laut lepas dan sekitar Samudra Hindia, gambaran yang berbeda muncul. Di area ini, ketinggian gelombang signifikan jauh lebih tinggi, dengan kisaran berkisar antara 2 hingga 3 meter. Perbedaan ketinggian gelombang yang signifikan antara wilayah pelabuhan dan wilayah lepas ini menggambarkan adanya perubahan yang cukup drastis dalam karakteristik gelombang tergantung pada kedalaman dan eksposur terhadap pengaruh cuaca dan kondisi laut yang lebih terbuka.

Pada bulan Juni, tinggi gelombang signifikan di wilayah penelitian menunjukkan pola dan karakteristik tertentu yang penting untuk diperhatikan. Gambar berikut ini menyajikan data mengenai tinggi gelombang signifikan yang tercatat selama bulan Juni di wilayah perairan yang menjadi fokus penelitian, yaitu di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur dan laut sekitarnya. Dari informasi yang ditampilkan, kita dapat memahami lebih mendalam mengenai kondisi laut di bulan Juni, termasuk potensi peningkatan atau penurunan gelombang yang mungkin memengaruhi aktivitas di perairan ini. Data ini dapat memberikan wawasan penting bagi pihak-pihak yang berkepentingan, seperti pelaku industri pelayaran dan pengelola pelabuhan, untuk mengantisipasi kondisi gelombang pada

bulan tersebut. Gambar berikut ini akan membantu dalam menggambarkan fluktuasi dan tren dari gelombang signifikan yang terjadi selama bulan Juni, serta menjadi dasar dalam merencanakan langkah-langkah mitigasi atau strategi operasional yang tepat di wilayah ini.

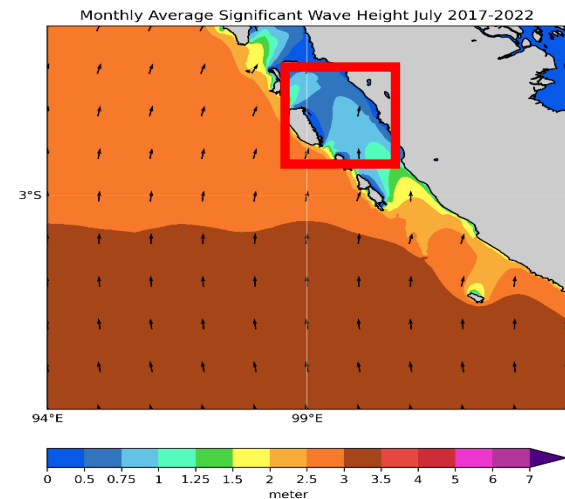


Gambar 10. Gelombang signifikan bulan Juni

Analisis data gelombang pada bulan Juni menunjukkan kesamaan dengan bulan Mei, sesuai dengan informasi yang telah dijelaskan sebelumnya. Dalam kedua bulan tersebut, karakteristik gelombang di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur memiliki pola yang hampir identik. Di wilayah dekat pelabuhan, ketinggian gelombang signifikan cenderung berada dalam kisaran 0 hingga 1 meter. Namun, perlu dicatat bahwa saat bergerak lebih jauh ke wilayah laut lepas dan sekitar Samudra Hindia, terlihat perbedaan yang cukup besar dalam ketinggian gelombang. Di wilayah ini, gelombang signifikan mencapai tinggi yang berkisar antara 2 hingga 3 meter.

Konsistensi dalam karakteristik gelombang yang relatif tetap di wilayah pelabuhan dapat memberikan dasar yang kuat bagi manajemen operasional dan evaluasi risiko terkait cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur. Meskipun karakteristik gelombang yang serupa antara bulan Juni dan Mei dapat memberikan pandangan stabil, variabilitas dalam ketinggian gelombang antara perairan dekat pelabuhan dan wilayah laut lepas tetap harus diakui dan diperhatikan dalam pengambilan keputusan terkait kegiatan maritim dan navigasi.

Untuk bulan Juli gelombang signifikan bisa dilihat pada gambar berikut ini:



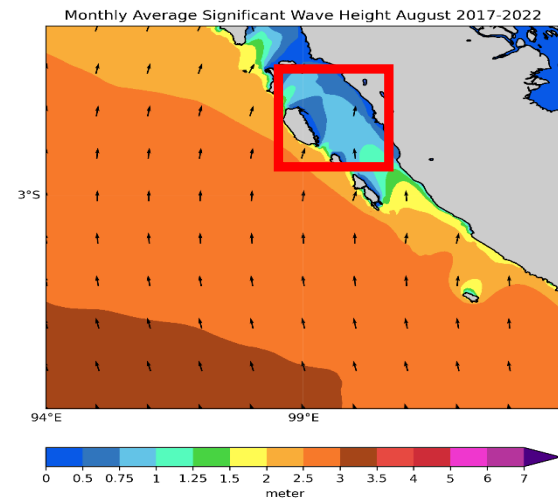
Gambar 11. Gelombang signifikan bulan Juli

Melalui analisis data yang disajikan dalam Gambar 9, dapat diamati dengan jelas karakteristik gelombang di berbagai lokasi yang terkait dengan Pelabuhan Teluk Bayur. Di sekitar pelabuhan tersebut, tinggi gelombang signifikan menunjukkan kisaran antara 0,5 hingga 1,25 meter. Hal ini menggambarkan bahwa perairan yang berdekatan dengan pelabuhan memiliki gelombang yang cenderung lebih rendah dan stabil. Namun, ketika memperluas pandangan ke wilayah laut lepas dan sekitar Samudra Hindia, terlihat perbedaan yang mencolok dalam karakteristik gelombang. Di lokasi ini, ketinggian gelombang signifikan mencapai kisaran antara 2,5 hingga 3,5 meter. Perbedaan ini menunjukkan transisi yang signifikan dalam kondisi gelombang ketika bergerak dari perairan yang lebih terlindung ke perairan yang lebih terbuka.

Analisis ini menggarisbawahi pentingnya memahami variasi ketinggian gelombang di berbagai wilayah perairan dalam konteks evaluasi risiko cuaca dan pengelolaan operasional di Pelabuhan Teluk Bayur. Ketinggian gelombang yang lebih rendah di sekitar pelabuhan dapat mempengaruhi navigasi dan kegiatan maritim, sementara ketinggian gelombang yang lebih tinggi di wilayah laut lepas dan Samudra Hindia perlu diperhitungkan dalam merencanakan operasi kapal dan infrastruktur di perairan tersebut.

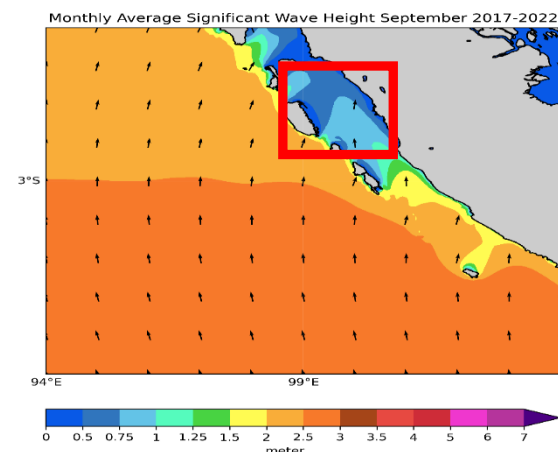
Pada bulan Agustus, terdapat kesamaan nilai ketinggian gelombang dengan bulan Juli. Namun, perlu dicatat bahwa terdapat sedikit penurunan secara spasial dalam karakteristik gelombang di wilayah tersebut. Nilai ketinggian gelombang signifikan di bulan Agustus dan Juli memiliki kesamaan, yang berkisar antara 0,5 hingga 1,25 meter. Meskipun demikian, adanya penurunan spasial mengindikasikan bahwa

meskipun nilai-nilai gelombang tetap konsisten, perubahan sedikit dalam tinggi gelombang dapat diamati di berbagai titik di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur.



Gambar 12. Gelombang signifikan bulan Agustus

Penting untuk mempertimbangkan perubahan ini dalam konteks manajemen risiko cuaca dan aktivitas maritim. Meskipun perubahan ini mungkin tidak signifikan, tetap penting untuk memantau dan mengidentifikasi variabilitas spasial dalam ketinggian gelombang untuk memastikan keselamatan dan efisiensi dalam operasi pelabuhan dan navigasi di perairan tersebut.

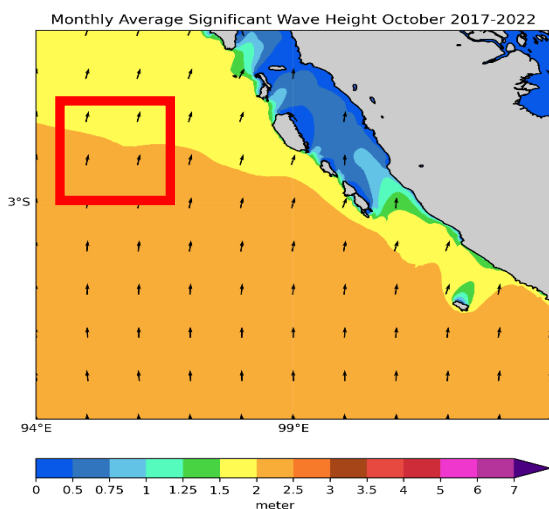


Gambar 13. Gelombang signifikan bulan September

Pada bulan September, karakteristik gelombang di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur menunjukkan kesamaan dengan bulan sebelumnya. Nilai ketinggian gelombang signifikan di perairan sekitar pelabuhan tetap dalam kisaran yang sama seperti bulan sebelumnya, yakni berkisar antara 0,5 hingga 1,25 meter. Ini mengindikasikan bahwa wilayah dekat pelabuhan memiliki kecenderungan untuk

mengalami gelombang yang relatif rendah dan stabil, sebagaimana telah diamati sebelumnya. Namun, perbedaan yang signifikan muncul ketika kita mengarah ke perairan laut lepas dan Samudra Hindia. Di wilayah ini, ketinggian gelombang signifikan meningkat dan berkisar antara 2 hingga 3 meter. Ini menggarisbawahi perubahan yang mencolok dalam karakteristik gelombang tergantung pada kedalaman dan paparan terhadap pengaruh cuaca di wilayah laut terbuka. Hasil analisis ini menunjukkan pentingnya memahami perubahan spasial dalam karakteristik gelombang di berbagai lokasi perairan dalam konteks evaluasi risiko cuaca dan manajemen operasional di Pelabuhan Teluk Bayur.

Pada bulan Oktober, data mengenai tinggi gelombang signifikan di wilayah penelitian menunjukkan pola yang khas dan perlu diperhatikan. Gambar berikut ini menyajikan data gelombang signifikan yang tercatat selama bulan Oktober di area perairan yang menjadi fokus kajian, yaitu di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur dan laut di sekitarnya. Melalui tampilan data ini, kita dapat memperoleh gambaran yang lebih rinci mengenai kondisi laut pada bulan Oktober, yang mungkin mengalami variasi tertentu dalam hal ketinggian dan frekuensi gelombang. Informasi ini sangat bermanfaat bagi berbagai pihak, seperti operator pelabuhan,



Gambar 14. Gelombang signifikan bulan Oktober

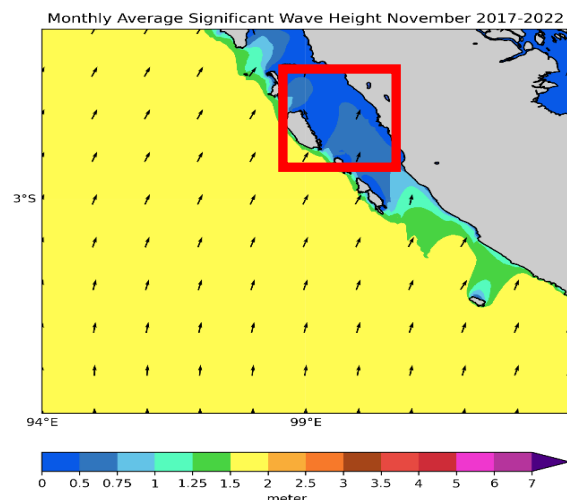
nelayan, dan pelaku industri maritim, untuk mengantisipasi perubahan kondisi laut selama bulan tersebut. Data yang ditampilkan dalam gambar berikut ini akan memberikan wawasan mengenai fluktuasi gelombang yang terjadi pada bulan Oktober, membantu dalam perencanaan operasional, serta sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait keselamatan dan efisiensi kegiatan di perairan. Gambar ini akan

menjadi referensi yang penting untuk memahami tren gelombang signifikan di bulan Oktober dan sebagai acuan bagi langkah-langkah yang perlu diambil dalam mengelola potensi risiko di wilayah ini.

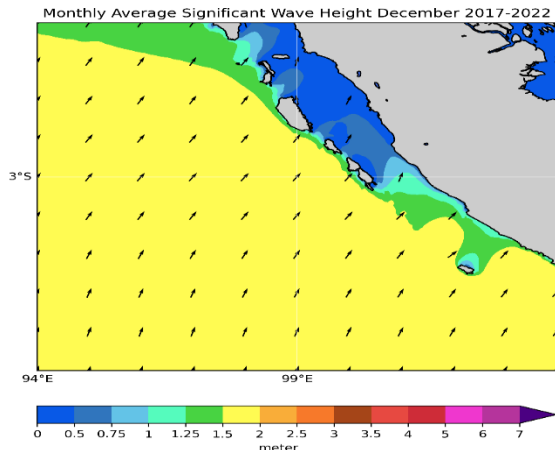
Analisis data gelombang pada bulan Oktober menunjukkan perubahan karakteristik gelombang yang menonjol. Dibandingkan dengan bulan-bulan sebelumnya, terjadi penurunan ketinggian gelombang secara umum di berbagai lokasi perairan yang terhubung dengan Pelabuhan Teluk Bayur. Di wilayah sekitar pelabuhan, ketinggian gelombang signifikan mengalami penurunan dan berkisar antara 0 hingga 1 meter. Perubahan ini menunjukkan bahwa perairan yang berdekatan dengan pelabuhan pada bulan Oktober memiliki gelombang yang lebih rendah dan cenderung lebih tenang. Namun, saat fokus beralih ke wilayah laut lepas dan Samudra Hindia, nilai ketinggian gelombang tetap lebih tinggi dibandingkan di sekitar pelabuhan. Meskipun terjadi penurunan, ketinggian gelombang signifikan berkisar antara 1,5 hingga 2,5 meter.

Analisis ini memberikan pandangan penting mengenai fluktuasi karakteristik gelombang sepanjang tahun. Penurunan ketinggian gelombang di wilayah sekitar pelabuhan pada bulan Oktober dapat memiliki implikasi bagi operasi pelabuhan dan aktivitas navigasi. Meskipun demikian, tinggi gelombang yang lebih tinggi di wilayah laut lepas dan Samudra Hindia tetap perlu diperhitungkan dalam manajemen risiko dan perencanaan kegiatan maritim.

Untuk gelombang signifikan pada bulan November bisa dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 15. Gelombang signifikan bulan November



Gambar 16. Gelombang signifikan bulan Desember

Berdasarkan gambar 15 diketahui bahwa di sekitar pelabuhan tersebut, terjadi penurunan ketinggian gelombang signifikan dibandingkan dengan bulan sebelumnya. Nilai ketinggian gelombang berkisar antara 0 hingga 0,75 meter. Perubahan ini menunjukkan bahwa wilayah sekitar pelabuhan mengalami gelombang yang lebih rendah dan lebih tenang dibandingkan dengan bulan sebelumnya. Untuk wilayah laut lepas dan sekitar Samudra Hindia, juga mengalami penurunan dari bulan sebelumnya, dengan nilai ketinggian gelombang, berkisar antara 1,5 hingga 2 meter.

Pada bulan Desember, karakteristik gelombang signifikan menunjukkan kesamaan dengan bulan November. Di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur, ketinggian gelombang signifikan berkisar antara 0 hingga 0,75 meter, yang juga merupakan kisaran yang sama seperti bulan November. Ini mengindikasikan bahwa wilayah perairan yang berdekatan dengan pelabuhan memiliki pola gelombang yang relatif stabil dan tidak mengalami perubahan yang signifikan dari bulan sebelumnya. Namun, di wilayah laut lepas dan sekitar Samudra Hindia, tinggi gelombang signifikan tetap berkisar antara 1,5 hingga 2 meter, seperti yang juga terlihat pada bulan November.

Kesamaan karakteristik gelombang antara bulan Desember dan November memiliki implikasi penting dalam manajemen risiko cuaca dan operasional di Pelabuhan Teluk Bayur. Meskipun nilai gelombang tetap stabil, perubahan cuaca atau faktor lainnya masih dapat mempengaruhi kondisi gelombang secara mendalam. Oleh karena itu, penting untuk terus memantau dan mengevaluasi kondisi gelombang secara berkala guna menjaga keselamatan dan efisiensi dalam kegiatan maritim di perairan tersebut.

4. Kesimpulan

Dalam evaluasi risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur menggunakan pendekatan analisis frekuensi, pola hujan dan tinggi gelombang menjadi dua faktor utama yang dianalisis. Pola hujan menunjukkan variasi yang signifikan selama periode evaluasi, dengan bulan-bulan tertentu memiliki curah hujan tinggi seperti September dan November, sementara bulan lainnya cenderung memiliki pola hujan yang lebih moderat. Variasi ini dapat meningkatkan risiko gangguan operasional di pelabuhan, seperti penundaan bongkar muat barang dan navigasi kapal.

Di sisi lain, evaluasi tinggi gelombang menunjukkan adanya konsistensi dalam kondisi gelombang di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur. Untuk Rata-rata tinggi gelombang tertinggi yang terjadi disekitar pelabuhan terjadi pada bulan Juli dan Agustus dengan gelombang rata-rata tertinggi 1,25 meter. Untuk gelombang maksimum terjadi pada bulan Juli dan Agustus dengan gelombang maksimumnya 2,5 meter. Meskipun terdapat fluktuasi kecil dari bulan ke bulan, umumnya tinggi gelombang cenderung rendah hingga sedang di sekitar pelabuhan. Namun, di wilayah laut lepas dan Samudra Hindia, tinggi gelombang cenderung lebih tinggi, yang dapat meningkatkan risiko keselamatan pelayaran dan operasi kapal di perairan terbuka.

Dengan demikian, dalam merencanakan pengelolaan risiko cuaca di Pelabuhan Teluk Bayur, penting untuk mempertimbangkan kedua faktor ini. Perencanaan yang efektif harus dapat mengakomodasi pola hujan yang bervariasi serta fluktuasi dalam tinggi gelombang untuk mengurangi risiko gangguan operasional dan meningkatkan keselamatan dalam navigasi kapal..

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada Kepala Stasiun Meteorologi Nangapinoh, Kepala Stasiun Meteorologi Maritim Teluk Bayur dan seluruh staff dan pegawai stasiun Meteorologi Nangapinoh dan teluk bayur.

Daftar Pustaka

- [1] Paramata, S. H., Machmud, J., & Arbie, A. (2023). PERANAN PELABUHAN GORONTALO TERHADAP PERTUMBUHAN EKONOMI DI PROVINSI GORONTALO. *Akademika*, 11(2), 168-185.
- [2] Daniswari, A. M., Agustin, I. W., & Hariyani, S. (2023). KINERJA OPERASIONAL PELABUHAN SEMAYANG BALIKPAPAN. *Planning for Urban Region and Environment Journal (PURE)*, 12(3), 159-168.
- [3] Gusty, S., Wulansari, I., Mustika, W., Kusuma, A., Abduh, N., Muslimin, E., ... & Iskandar, A. C. S. (2023). *Dasar-Dasar Transportasi*. TOHAR MEDIA.
- [4] Guo, X., Cheng, J., Yin, C., Li, Q., Chen, R., & Fang, J. (2023). The extraordinary Zhengzhou flood of 7/20, 2021: How extreme weather and human response compounding to the disaster. *Cities*, 134, 104168.
- [5] andhika, f. P. (2022). *Penanganan terhadap laratnya jangkar kapal mv. Kt 06 di batu ampar saat berlabuh* (doctoral dissertation, politeknik ilmu pelayaran semarang).
- [6] Anita, S. Y., Kustina, K. T., Wiratikusuma, Y., Sudirjo, F., Sari, D., Rupiwardani, I., ... & Sucandrawati, N. L. K. A. S. (2023). *Manajemen Risiko*. Global Eksekutif Teknologi.
- [7] Fathi, M., & Hidayat, W. (2023). Analisis Risiko Curah Hujan Tinggi Terhadap Kelangsungan Kegiatan Belajar dan Mengajar di MTs Hudatul Falah. *AKSI: Jurnal Manajemen Pendidikan Islam*, 1(3), 223-235.
- [8] Khoa, B. T., Hung, B. P., & Hejsalem-Brahmi, M. (2023). Qualitative research in social sciences: data collection, data analysis and report writing. *International Journal of Public Sector Performance Management*, 12(1-2), 187-209.
- [9] Sarie, F., Sutaguna, I. N. T., Par, S. S., Par, M., Suiroaka, I. P., ST, S., ... & Massenga, I. T. W. (2023). *Metodelogi Penelitian*. Cendikia Mulia Mandiri.
- [10] supriyadi, e. (2019). Pemanfaatan satelit altimetri untuk verifikasi tinggi gelombang laut signifikan pada ocean forecast system (ofs) – bmk. *Jurnal meteorologi dan geofisika* vol. 19 no. 2 tahun 2018 : 93 – 102

IDENTIFIKASI SEBARAN ABU VULKANIK DAN ANALISIS PROFIL VERTIKAL STABILITAS ATMOSFER PASCA ERUPSI GUNUNG MARAPI DESEMBER 2023

IDENTIFICATION OF VOLCANIC ASH DISTRIBUTION AND ANALYSIS VERTICAL PROFILE OF ATMOSPHERIC STABILITY POST THE ERUPTION OF MOUNT MARAPI IN DECEMBER 2023

Nindya Sekar Annisa, Irsyad Humaidi*, Najla Ailiya Azzahra

Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jalan Meteorologi No. 5 Tanah Tinggi Tangerang RT 003, RT.003 / RW.013, Tanah Tinggi, Kec. Tangerang, Kota Tangerang, Banten 15119

*E-mail: irsyadhumaidi2001@gmail.com

Naskah masuk: 04-07-2024

Naskah diperbaiki: 03-12-2024

Naskah diterima: 18-12-2024

ABSTRAK

Pada 3 Desember 2023 pukul 14.52 WIB telah terjadi erupsi gunung Marapi di Sumatera Barat. Erupsi ini mengeluarkan berbagai zat vulkanik yang masuk ke atmosfer dan memengaruhi kondisi stabilitas atmosfer. Kondisi atmosfer yang telah dipengaruhi berbagai zat perlu untuk diteliti agar dapat mencegah dampak buruk dari erupsi Gunung Marapi. Penelitian ini dilakukan dengan metode deskriptif analitik dengan menggunakan analisis data sandi TEMP dari Stasiun Meteorologi Minangkabau untuk menghasilkan nilai parameter udara atas, diantaranya nilai CAPE, LI, EL, LCL, CCL, RH, *lapse rate*, ketinggian tropopause, dan *Precipitable Water* serta analisis sebaran abu vulkanik dari data Satelit himawari. Penelitian dilakukan dengan periode $H \pm 15$ hari erupsi terjadi. Berdasarkan hasil analisis, parameter yang paling terpengaruh adalah *lapse rate*, ketinggian tropopause dan ketinggian CCL dan LCL yang ditunjukkan dengan nilai *lapse-rate* udara lingkungan negatif, ketinggian tropopause cenderung meningkat khususnya pada pengamatan pukul 12.00 UTC serta ketinggian CCL yang menjadi lebih tinggi daripada ketinggian LCL. Selain itu, parameter lain seperti *Equilibrium Indeks* masih cenderung fluktuatif serta nilai RH vertikal dan *precipitable water* cenderung menurun di tanggal 3 - 4 Desember yang selanjutnya mengalami fluktuatif. Sedangkan dari nilai parameter udara atas yaitu nilai LI dan CAPE termasuk kedalam kategori *moderate* di periode waktu 3 - 5 Desember 2023 yang meningkatkan kemungkinan terbentuknya awan konvektif di wilayah terdampak.

Kata kunci: erupsi, radiosonde, parameter udara atas, stabilitas atmosfer

ABSTRACT

On December 3, 2023 at 2:52 pm there was an eruption of Mount Marapi in West Sumatra. This eruption releases various volcanic substances that enter the atmosphere and affect the stability of the atmosphere. Atmospheric conditions that have been influenced by various substances need to be studied in order to prevent adverse effects from the eruption of Mount Marapi. This research was conducted with descriptive analytical method using TEMP password data analysis from Minangkabau Meteorological Station to produce upper air parameter values, including CAPE, LI, EL, LCL, CCL, RH, *lapse rate*, tropopause height, and *Precipitable Water* values and analysis of volcanic ash distribution from himawari Satellite data. The research was conducted with a period of 15 days before and 15 days after the eruption occurred. Based on the results of the analysis, the most affected parameters are *lapse rate*, tropopause altitude and CCL and LCL altitudes which are indicated by negative environmental air *lapse-rate* values, tropopause altitude tends to increase especially in observations at 12:00 UTC and CCL altitude which becomes higher than LCL altitude. In addition, other parameters such as the *Equilibrium Index* still tend to fluctuate and the vertical RH and *precipitable water* values tend to decrease on December 3 - 4 which then fluctuate. Meanwhile, the values of upper air parameters, namely the LI and CAPE values, fall into the moderate category in the time period December 3 - 5, 2023, which increases the possibility of convective cloud formation in the affected area.

Keywords: eruption, radiosonde, upper air parameters, atmospheric stability

1. Pendahuluan

Wilayah Indonesia berada di sepanjang jalur *ring of fire* sehingga dilalui deretan gunung api mulai dari Sumatera – Jawa – Bali – Nusa Tenggara – Sulawesi – Banda- Maluku – Papua [1]. Terdapat 129 gunung api aktif di seluruh Indonesia [2]. Hal ini menjadikan Indonesia rawan bahaya geologi seperti erupsi gunung api. Gunung Marapi yang secara administrasi terletak di Kabupaten Tanah Datar dan sebagian Kabupaten Agam, Sumatera Barat, merupakan salah satu dari 129 gunung api tersebut.

Gunung Marapi ini merupakan salah satu gunung api aktif yang memiliki catatan letusan terbanyak daripada gunung api aktif lainnya di Pulau Sumatra dengan jumlah letusan lebih dari 500 kali sejak tahun 1770. Akan tetapi, Gunung Marapi memiliki informasi yang sangat sedikit karena jaranganya penelitian yang dilakukan [3]. Posisi Gunung Marapi hanya sekitar 5 kilometer dari Sesar Sumatera. Sesar atau Patahan Sumatera ini membentang sepanjang 1.900 kilometer dari Banda Aceh hingga Teluk Semangko, di Selatan Lampung. Ketika erupsi terjadi, gunung tersebut sedang berstatus Level II atau waspada. Erupsi Gunung Marapi menghasilkan abu vulkanik yang membumbung tinggi ke atas berwarna kelabu dengan intensitas yang tebal [4]. Meletusnya gunung api berketinggian 2.891 mdpl ini ditandai dengan adanya muntahan kolom abu berisi material vulkanik hingga 3.000 meter dari puncak kawah yang disertai suara gemuruh. Sebelumnya gunung Marapi ini terakhir erupsi pada tanggal 3 Januari 2023 pukul 06.11 WIB [5].

Seluruh aktivitas yang dilakukan Gunung Marapi dipantau langsung Pos Pengamatan Gunung Api (PGA) Gunung Marapi di Kota Bukittinggi. Dalam Pemantauannya, terdapat 8 stasiun seismik yang tersebar di sekitar gunung. Data yang dihasilkan yaitu rekaman data seismogram. Gunung Marapi telah berstatus waspada sejak 3 Agustus 2011 hingga sekarang. Pemantauan aktivitas seismik pada gunung api menjadi sangat penting untuk peringatan dan mitigasi bencana terkait meletusnya gunung api. Gunung api yang akan meletus memiliki aktivitas seismik berupa tremor gempa vulkanik yang disebabkan oleh gaya yang berasal dari dalam bumi akibat terganggunya sistem kesetimbangan magma dan sistem kesetimbangan geologi [6].

Masuknya zat lain ke dalam atmosfer seperti yang terjadi di Kota Padang Pariaman akibat adanya sebaran abu vulkanik Gunung Marapi tentu mengganggu kondisi atmosfer dan dapat menyebabkan gangguan dalam dunia

penerbangan. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk melihat bagaimana kondisi stabilitas vertikal atmosfer ketika sebaran abu vulkanik Gunung Marapi dan adakah pengaruh abu vulkanik Gunung Marapi terhadap kondisi stabilitas vertikal atmosfer.

Stabilitas vertikal udara ke atas merupakan gambaran kondisi fisis suatu parcel atau gugusan udara pada suatu kondisi ketinggian dan waktu yang sedemikian yang dapat berkembang dengan pengembangan teori dan persamaan fisika seperti hukum hidrostatika dan termodinamika [7]. Stabilitas vertikal udara ditentukan dari berbagai macam parameter yang saling berhubungan. Kelembapan relatif dan *precipitable water* berkaitan dengan kandungan udara yang berpotensi untuk terkondensasi di atmosfer. *Precipitable water* merupakan jumlah air di kolom udara apabila semua uap air pada kolom udara tersebut terkondensasi [8].

Terdapat tiga macam penurunan suhu terhadap ketinggian yaitu lapse rate udara sekitar (γ), lapse rate adiabatik kering (γ_d) dan lapse rate adiabatik basah (γ_s) dengan nilai lapse rate adiabatik kering sekitar $9.8^\circ\text{C}/\text{km}$ dan nilai lapse rate adiabatik basah sekitar $4.6^\circ\text{C}/\text{km}$ [9]. Berdasarkan nilai lapse rate dapat ditentukan tiga kondisi stabilitas atmosfer, yaitu stabil mutlak ($\gamma < \gamma_s < \gamma_d$), labil bersyarat ($\gamma_s < \gamma < \gamma_d$), dan labil mutlak ($\gamma_s < \gamma_d < \gamma$).

Secara vertikal terdapat beberapa level (ketinggian) penting, yaitu *Lifting Condensation Level* (LCL), *Convective Condensation Level* (CCL), *Equilibrium Level* (EL), dan ketinggian *tropopause*. Aerosol atmosferik dapat berasal dari sumber alami, misalnya letusan gunung berapi, permukaan darat dan laut [10]. Selain itu, parameter stabilitas yang penting dalam meteorologi adalah CAPE dan *Lifted Index*. Parcel udara memiliki total energi di kolom udara yang diperlukan untuk mengangkat parcel udara bergerak naik secara vertikal. Jumlah energi parcel udara ini disebut dengan *Convective Available Potential Energy* (CAPE) yang merupakan daya apung (*buoyancy force*) bernilai positif [11].

Parameter labilitas udara lainnya yang digunakan dalam penelitian ini ialah *Lifted Index* (LI). *Lifted index* (LI) menunjukkan pengangkatan parcel udara dari level di dekat permukaan hingga 500 mb secara adiabatik yang kemudian diukur selisih suhu parcel tersebut dengan lingkungan [12]. Berikut ini merupakan tabel ambang batas indeks stabilitas atmosfer.

Tabel 1. Kriteria nilai ambang batas indeks stabilitas atmosfer

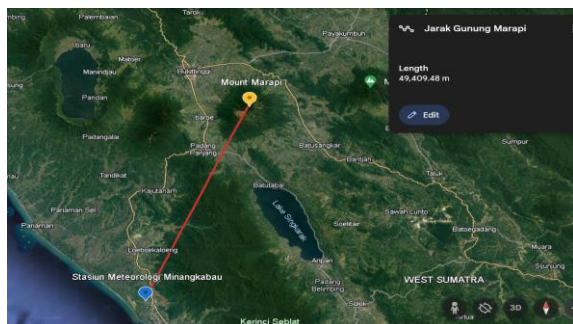
Sumber : [11], [13]

Indeks	Lemah	Moderate	Kuat
TT Indeks	<42	42 - 46	>46
K Indeks	<29	29 - 37	>37
SWEAT	<135	135 - 239	>239
CAPE	<1000	1000 - 2500	>2500
LI Indeks	>-2	-2 s.d. -6	<-6
Showalter Indeks	>4	4 s.d. -4	<-4

2. Metode Penelitian

Lokasi penelitian ini di Gunung Marapi yang terletak pada 0° 22' 48" LS dan 100° 28' 28" BT. Secara geografis, Gunung Marapi terletak di antara wilayah Kabupaten Tanah Datar, Kabupaten Agam dan Kotamadya Padang Panjang, Provinsi Sumatera Barat. Gunung Marapi ini memiliki ketinggian mencapai 2.884 meter diatas permukaan laut (mdpl).

Penelitian ini menggunakan data-data dari Stasiun Meteorologi Minangkabau yang terletak di Kabupaten Padang Pariaman, Provinsi Sumatera Barat. Adapun jarak Stasiun Meteorologi Minangkabau dengan Gunung Marapi jika ditarik garis lurus yaitu sekitar 49,4 km menggunakan aplikasi *Google Earth*.

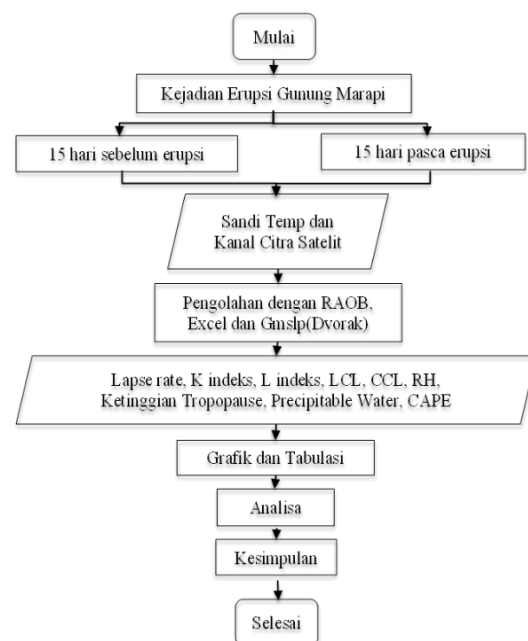


Gambar 1. Lokasi Penelitian
(Sumber Data Diolah dari *Website Google Earth*)

Pemanfaatan citra satelit dapat digunakan untuk melakukan analisis dan pemantauan aktivitas dan sebaran abu vulkanik [14]. Penelitian ini menggunakan citra satelit Himawari-8 dengan metode RGB (Gmslp Dvorak). Kanal yang digunakan adalah kanal IR, I2, I4, dan VS

dengan menggunakan algoritma tertentu untuk menghasilkan citra warna yang diinginkan. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data radiosonde untuk analisis kondisi stabilitas atmosfer dan diolah menggunakan aplikasi *Rawinsonde Observation* (RAOB). Diperlukan juga Microsoft Excel untuk melakukan pengolahan data.

Adapun data-data yang digunakan dalam proses analisis diperoleh dari website <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> untuk data sandi TEMP Stasiun Meteorologi Minangkabau dan Filezilla untuk data Satelit Himawari dengan kanal IR, I2, I4, dan VS.

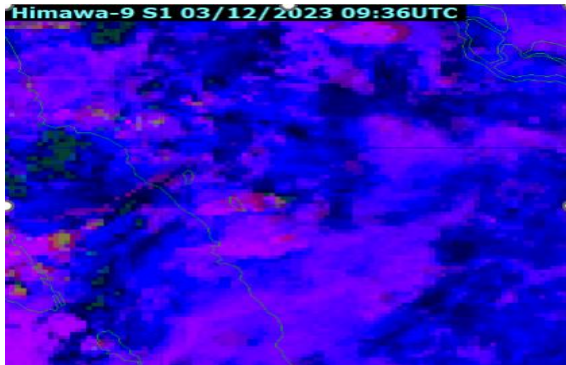


Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Erupsi Gunung Marapi terjadi pada tanggal 3 Desember 2023 pukul 14.54 WIB. Penelitian ini dilakukan dengan periode 15 hari sebelum dan 15 hari setelah erupsi terjadi untuk melihat kondisi atmosfer dan perubahannya yang mungkin terjadi di wilayah terdampak. Penelitian ini juga berfokus pada arah sebaran abu Vulkanik dari Gunung Marapi yang dapat dianalisis saat kejadian dan hari setelahnya menggunakan citra satelit Himawari yaitu arah angin *trajectory* pada tanggal 3 - 5 Desember 2023. Arah angin *trajectory* dalam penelitian ini menggunakan 500 mb karena disesuaikan dengan ketinggian yang mendekati puncak dari Gunung Marapi.

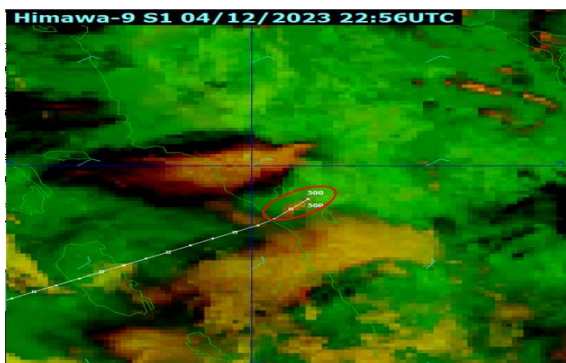
3. Hasil dan Pembahasan

Citra satelit pada beberapa kanal yang telah diperoleh kemudian diolah dengan aplikasi Gmslp(Dvorak) dengan menggunakan metode RGB agar sebaran abunya lebih terlihat dan tidak tercampur dengan awan atau tutupan atmosfer lainnya.

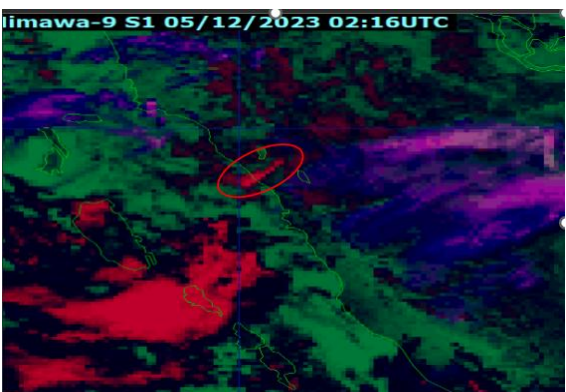


Gambar 3. Citra Satelit Sebaran Abu Vulkanik 3 Desember 2023

Gambar 4. Citra Satelit Sebaran Abu Vulkanik 4



Desember 2023

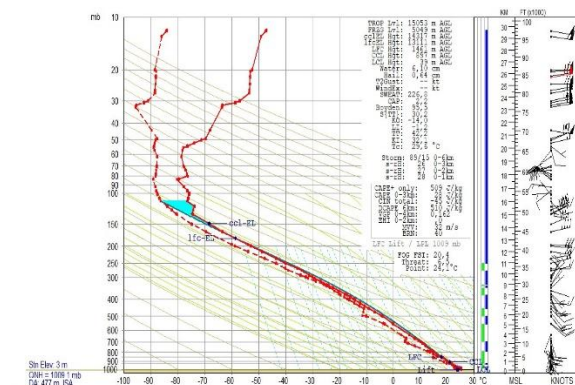


Gambar 5. Citra Satelit Sebaran Abu Vulkanik 5 Desember 2023

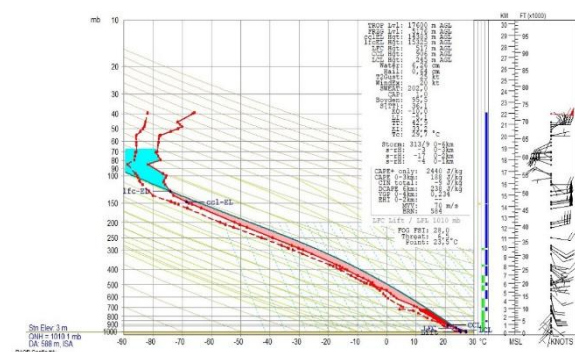
Dari citra RGB diatas, dapat kita amati untuk sebaran erupsi gunung Marapi tidak terlihat di tanggal 3 Desember, dan baru terlihat di tanggal 4 dan 5 Desember (lingkaran merah) yang sebaran abunya mengarah ke Barat Daya yang

mana arah tersebut juga dekat dengan lokasi penelitian di Stasiun Meteorologi Minangkabau, sehingga diperkirakan sebaran abu tersebut memengaruhi dari kestabilan udara atas atmosfer di sekitar stasiun pengamatan meteorologi.

Dalam penelitian ini dilakukan pengolahan data hasil pengamatan radiosonde Stasiun Meteorologi Minangkabau. Sandi TEMP Stasiun Meteorologi Minangkabau yang sudah diunduh, disimpan dalam format .txt berbentuk *notepad* serta dibuka dengan aplikasi RAOB 5.7 sesuai tanggal dan jam pengamatan yang diinginkan. Dalam *listings* dapat muncul beragam data-data olahan sandi TEMP yang dibutuhkan dalam penelitian, seperti suhu udara vertikal dan ketinggian untuk menentukan *lapse rate*, *precipitable water*, LCL, CCL, EL, ketinggian tropopause, K Indeks, L Indeks, CAPE dan RH vertikal. Selain melalui program RAOB, dapat juga dibuat grafik tren parameter-parameter yang akan diamati dari pra kejadian erupsi hingga pasca erupsi dengan cara manual menggunakan Aplikasi Microsoft Excel. Data-data tersebut ditampilkan dalam bentuk tabulasi maupun grafik untuk kemudahan dalam menganalisa.



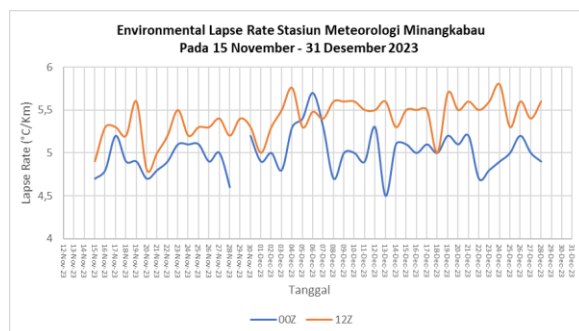
Gambar 6. Hasil pengolahan data radiosonde 3 Desember 2023 pukul 00.00 UTC



Gambar 7. Hasil pengolahan data radiosonde 3 Desember 2023 pukul 12.00 UTC

Berdasarkan data pengamatan udara atas dengan aplikasi RAOB pada jam 00 UTC tanggal 3 Desember 2023 yang ditunjukkan oleh Gambar 6, terdapat *overshoot* CAPE yang ditandai dengan warna biru muda di atas garis *equilibrium level*. *Overshoot* CAPE adalah kondisi di mana nilai CAPE masih positif di atas garis *equilibrium level*. Kondisi ini dapat menyebabkan udara yang terkondensasi di atas garis *equilibrium level* tetap terkondensasi dan tidak jatuh ke bawah. Titik LFC diidentifikasi dari titik singgung dari garis suhu parsel udara dengan parsel lingkungan. *Equilibrium level* diidentifikasi sebagai titik singgung antara suhu udara yang diangkat dengan suhu lingkungan setelah melewati LFC. Sementara itu, CCL diidentifikasi sebagai titik saat garis suhu udara diangkat mencapai 100% kelembapan relatif. Berdasarkan analisis grafik di gambar (6), ketinggian CCL-EL berada di 14317 m pada lapisan 150 mb, sedangkan titik LFC-EL berada di bawahnya yaitu sekitar lapisan 165 mb pada ketinggian 13111 m. Ketinggian tropopause berada di 15053 m.

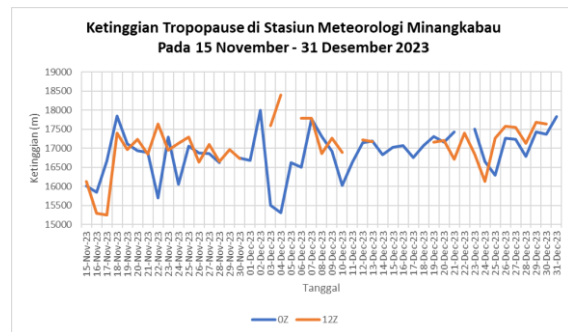
Gambar 7 diatas menunjukkan data stabilitas atmosfer oleh radiosonde pada jam pengamatan 12.00 UTC. Data tersebut menunjukkan bahwa ketinggian CCL-EL berada di 14.383 m pada lapisan sekitar 150 mb, sedangkan titik LFC-EL berada di atasnya yaitu sekitar lapisan 125 mb pada ketinggian 15.325 m. Sementara itu, ketinggian tropopause berada di 17.600 m. Erupsi Gunung Marapi terjadi pada pukul 14.54 WIB atau 08.54 UTC, yaitu sebelum pengamatan dilakukan. Pada data diatas menggambarkan kondisi atmosfer disekitar Stasiun Pengamatan Minangkabau pasca erupsi Marapi.



Gambar 8. Grafik *environmental lapse rate* rentang 15 November – 31 Desember 2023

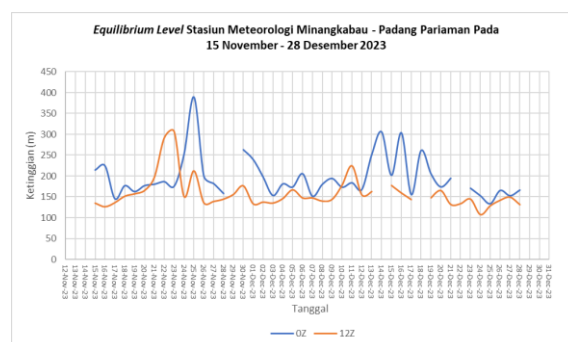
Gambar 8 di atas menunjukkan fluktuasi *environmental lapse rate* hingga ketinggian lapisan 500 mb, yang diukur menggunakan *software* RAOB pada periode penelitian di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman. *Environmental lapse rate*

menunjukkan nilai penurunan suhu terhadap ketinggian. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa nilai *lapse rate* secara umum pada saat dan setelah terjadinya letusan Gunung Marapi pada tanggal 3 Desember semakin meningkat pada grafik. Hal ini menunjukkan bahwa *lapse rate* tersebut semakin negatif.



Gambar 9. Grafik ketinggian tropopause rentang 15 November – 28 Desember 2023

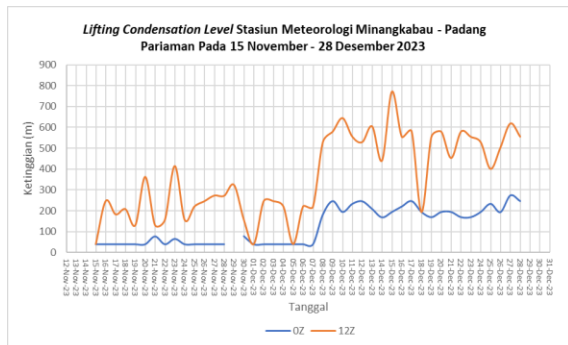
Gambar 9 menunjukkan bahwa ketinggian tropopause secara umum mengalami peningkatan yang konsisten dari tanggal 3 hingga 5 Desember 2023. Pada pukul 00 UTC, ketinggian tropopause pada tanggal 3 Desember adalah 15.503 meter, kemudian meningkat menjadi 15.311 meter pada tanggal 4 Desember 2023, dan menjadi 16.621 meter pada tanggal 5 Desember 2023. Pada data pengamatan radiosonde pukul 12 UTC, ketinggian tropopause pada tanggal 3 Desember adalah 17.600 meter, dan meningkat menjadi 18.407 meter pada tanggal 4 Desember 2023. Kondisi ini terjadi pada rentang waktu yang terdampak dari letusan Gunung Marapi. Setelah itu, ketinggian tropopause pada 15 hari berikutnya cenderung stabil, tidak seperti pada 15 hari sebelumnya yang fluktuatif.



Gambar 10. Grafik *equilibrium level* rentang 15 November – 31 Desember 2023

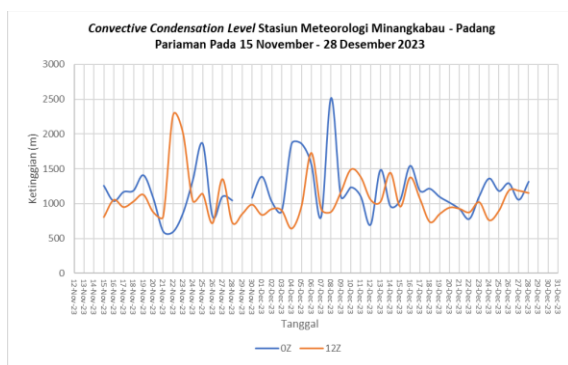
Analisis hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman pada gambar (10) menunjukkan bahwa ketinggian *Equilibrium Level* (EL) pada saat dan setelah terjadinya

letusan Gunung Marapi pada tanggal 3 Desember 2023 cenderung meningkat dihari berikutnya. Pada tanggal tersebut, nilai EL berkurang dari 153,29 meter pada pukul 00 UTC menjadi 135,37 meter pada pukul 12 UTC. Namun secara umum equilibrium level di sekitar stasiun pengamatan cenderung fluktuatif sepanjang hari.



Gambar 11. Grafik *lifting condensation level* rentang 15 November – 31 Desember 2023

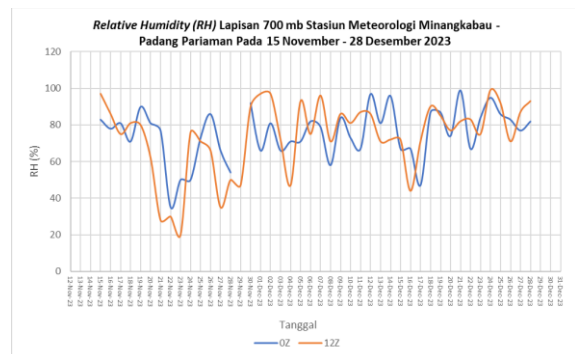
Analisis hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman pada periode letusan Gunung Marapi menunjukkan bahwa ketinggian LCL pada pukul 00 UTC dan 12 UTC secara umum berada dalam keadaan stabil. Pada tanggal 3-5 Desember 2023, ketinggian LCL pada pukul 00 UTC adalah 39 meter, sedangkan pada pukul 12 UTC menurun secara berturut-turut dari 245 meter pada tanggal 3 Desember, 220 meter pada tanggal 4 Desember, dan kembali ke 39 meter pada tanggal 5 Desember. Data tersebut berada dalam kategori normal jika dibandingkan dengan periode waktu penelitian.



Gambar 12. Grafik *convective condensation level* rentang 15 November – 31 Desember 2023

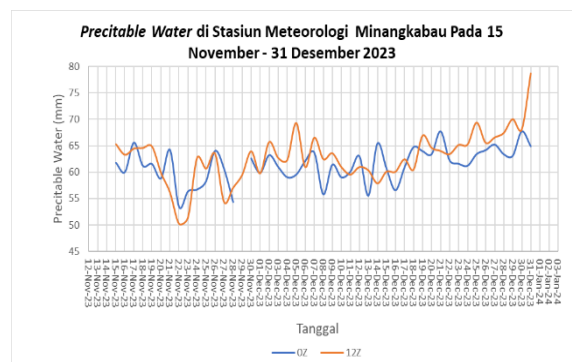
Hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman pada periode letusan Gunung Marapi menunjukkan bahwa ketinggian CCL mengalami fluktuasi yang signifikan. Pada tanggal 3 Desember 2023, ketinggian CCL pada pukul 00 UTC adalah 897 meter, kemudian naik menjadi 906 meter pada pukul 12 UTC. Namun, pada

tanggal 4-5 Desember 2023, terjadi penurunan ketinggian yang signifikan. Pada tanggal 4 Desember 2023, ketinggian CCL pada pukul 00 UTC adalah 1863 meter, kemudian turun menjadi 644 meter pada pukul 12 UTC. Pada tanggal 5 Desember 2023, ketinggian CCL kembali naik menjadi 960 meter pada pukul 12 UTC. CCL cenderung meningkat dalam periode 3-5 Desember 2023, yang kemudian mengalami penurunan signifikan dan dilanjutkan dengan kondisi yang fluktuatif sepanjang hari hingga akhir bulan Desember.



Gambar 13. Grafik *Relative Humidity* rentang 15 November – 31 Desember 2023

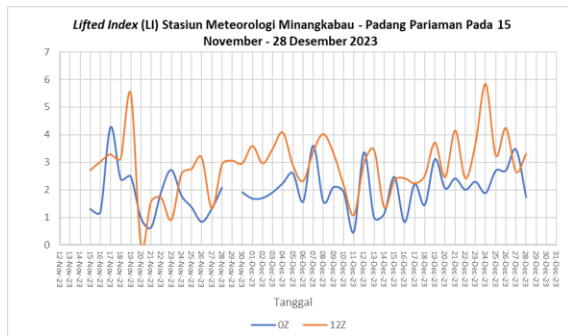
Analisis hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman menunjukkan bahwa nilai RH vertikal pada lapisan 700 mb pada periode 3-5 Desember 2023 secara umum mengalami peningkatan. Pada tanggal 3 Desember 2023, nilai RH pada pukul 00 UTC adalah 66%, kemudian meningkat menjadi 72% pada pukul 12 UTC. Peningkatan ini tetap berada dalam kategori normal jika dibandingkan dengan data normal pada 15 hari sebelum dan 15 hari setelahnya.



Gambar 14. Grafik *precipitable water* rentang 15 November – 28 Desember 2023

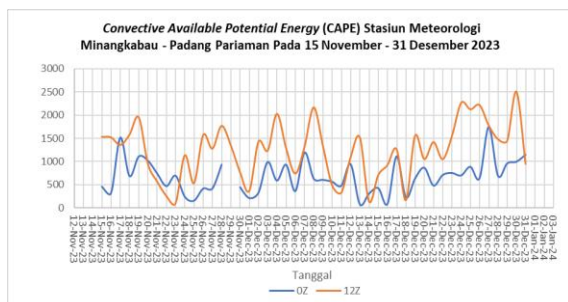
Analisis hasil pengolahan data pengamatan precipitable water di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman menunjukkan bahwa nilai precipitable water pada periode letusan Gunung Marapi secara umum mengalami penurunan. Pada tanggal 3

Desember 2023, nilai precipitable water pada pukul 00 UTC adalah 61,01 mm, kemudian meningkat menjadi 62,69 mm pada pukul 12 UTC. Nilai precipitable water kemudian turun menjadi 57,92 mm pada pukul 00 UTC tanggal 4 Desember 2023. Data pengamatan 15 hari sebelum terjadinya letusan berfluktuasi namun cenderung menurun. Sementara itu, 15 hari setelah terjadinya letusan, grafik menunjukkan nilai precipitable water yang cenderung meningkat.



Gambar 15. Grafik *lifted index* rentang 15 November – 28 Desember 2023

Hasil pengolahan data pengamatan *lifted index* yang memiliki nilai negatif di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman menunjukkan bahwa nilai LI pada periode letusan Gunung Marapi menunjukkan tren yang cenderung meningkat. Pada tanggal 3 Desember 2023, nilai LI pada pukul 00 UTC adalah -1,92, kemudian menurun menjadi -3,49 pada pukul 12 UTC. Nilai LI kemudian kembali menurun menjadi -4,08 pada pukul 00 UTC tanggal 4 Desember 2023.



Gambar 16. Grafik CAPE rentang 15 November – 31 Desember 2023

Berdasarkan grafik pada gambar 16, CAPE di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman menunjukkan bahwa nilai CAPE pada periode tanggal 3-5 Desember 2023 cenderung meningkat dan berada pada nilai yang tinggi. Pada tanggal 3 Desember 2023, nilai CAPE meningkat dari 995,23 pada pukul 00 UTC menjadi 1229,76 pada pukul 12 UTC. Nilai CAPE kemudian menurun menjadi 592,93 pada pukul 00 UTC tanggal 4 Desember 2023. Data CAPE selanjutnya menunjukkan kecenderungan untuk meningkat dan tergolong dalam kategori

yang moderate khususnya saat pengamatan 12.00 UTC.

Berdasarkan olahan data pengamatan udara atas pada Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan data stabilitas atmosfer di wilayah tersebut pada pukul 00 UTC dan 12 UTC. Pada gambar tersebut terlihat adanya beberapa titik dimana dua titik penting yang digunakan untuk mengidentifikasi ketidakstabilan atmosfer dalam adalah titik LFC-EL dan CCL-EL. Titik LFC (*Level of Free Convection*) adalah ketinggian di mana udara yang naik akan mulai mengalami ekspansi adiabatik tanpa pendinginan. Titik EL (*Equilibrium Level*) adalah ketinggian di mana suhu udara yang naik akan sama dengan suhu udara di sekitarnya. Semakin rendah LFC dan semakin tinggi EL, maka semakin besar potensi terjadinya badai petir. Hal ini dikarenakan udara yang naik dari LFC ke EL akan melepaskan energi potensial gravitasinya. Energi ini akan digunakan untuk membentuk awan dan badai petir. CCL (*Cloud Condensation Level*) adalah ketinggian di mana udara yang naik mulai mencapai kondisi jenuh. CCL yang dekat dengan LFC juga dapat meningkatkan potensi terjadinya badai petir yang kuat. Hal ini dikarenakan awan yang terbentuk lebih cepat akan berpotensi mudah menjadi awan cumulonimbus.

Environmental lapse rate merupakan laju penurunan udara terhadap ketinggian dalam arah vertikal maupun horizontal. Nilai lapse rate dapat dibandingkan dengan *dry-adiabatic lapse rate* ($10^{\circ}\text{C}/\text{km}$) dan *moist-adiabatic lapse rate* ($4,5 - 6^{\circ}\text{C}/\text{km}$) untuk menentukan kelabilan atmosfer. Atmosfer yang labil serta lembap di sekitar permukaan berpotensi untuk terjadinya pembentukan dan perkembangan awan hujan [15]. Pada saat dan setelah terjadinya letusan Gunung Marapi, nilai lapse rate semakin negatif. Nilai lapse rate berada di rentang $>4,9^{\circ}\text{C}/\text{km}$, yaitu di atas *moist-adiabatic lapse rate*. Nilai lapse rate juga semakin menurun sejak tanggal 3 Desember 2023. Hal ini menunjukkan bahwa atmosfer menjadi semakin labil [16]. Kondisi ini dapat diakibatkan oleh terhalangnya radiasi sinar matahari oleh abu vulkanik. Abu vulkanik dapat menghalangi radiasi sinar matahari mencapai permukaan bumi. Hal ini menyebabkan suhu udara turun lebih cepat terhadap ketinggian dari permukaan bumi. Namun, apabila dibandingkan dengan data lainnya pada periode waktu penelitian, nilai lapse rate ini masih dalam kategori normal. Artinya, letusan Gunung Marapi tidak menyebabkan atmosfer menjadi terlalu labil khususnya pada wilayah stasiun pengamatan Minangkabau yang jaraknya 49,4 km dari Gunung Marapi.

Letusan Gunung Marapi pada tanggal 3 Desember 2023 menghasilkan abu vulkanik yang mencapai ketinggian 3.000 meter dari puncak kawah. Meskipun abu vulkanik tidak mencapai ketinggian tropopause, namun pengamatan menunjukkan bahwa ketinggian tropopause di sekitar Gunung Marapi mengalami peningkatan. Peningkatan ketinggian tropopause ini dapat disebabkan oleh pelepasan energi panas oleh letusan gunung api. Udara panas yang dihasilkan oleh letusan akan mengembang naik ke atas, menyebabkan tekanan udara di sekitarnya berkurang. Penurunan tekanan udara ini akan menyebabkan udara di sekitarnya mengalir ke atas, sehingga lapisan atmosfer di atasnya akan mengembang dan naik. Dengan demikian, letusan Gunung Marapi kemungkinan dapat menyebabkan peningkatan ketinggian tropopause di sekitarnya [5].

Equilibrium Level (EL) adalah ketinggian udara yang naik berhenti karena suhunya telah mencapai suhu lingkungan. EL yang rendah menunjukkan bahwa kondisi atmosfer bersifat labil dan berpotensi untuk terjadinya pertumbuhan awan konvektif. Pengamatan radiosonde menunjukkan bahwa ketinggian EL pada saat terjadinya letusan yaitu pada tanggal 3 Desember hingga beberapa hari setelahnya menunjukkan penurunan nilai. Nilai EL pada saat erupsi berada pada kisaran 135-180 m, lebih rendah dibandingkan dengan nilai EL sebelum dan sesudah erupsi. Kemungkinan penyebab penurunan ketinggian EL adalah sebaran abu vulkanik yang dapat menyerap panas dari sinar matahari. Hal ini menyebabkan suhu udara di sekitar abu vulkanik menurun, sehingga ketinggian EL pun menurun.

Lifting Condensation Level (LCL) merupakan ketinggian udara yang mulai terangkat dari permukaan jenuh dan berkondensasi menjadi awan. Ketinggian LCL pada periode 3-5 Desember 2023 pukul 00 UTC dan 12 UTC secara umum tidak mengalami perubahan yang signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketinggian LCL yang terbentuk tidak terlalu terpengaruh oleh adanya lapisan abu vulkanik yang berada di atmosfer sejak dari awal meletusnya Gunung Marapi yaitu tanggal 3 Desember 2023 hingga beberapa hari selanjutnya, yaitu hingga tanggal 5 Desember 2023. Namun dihari-hari berikutnya hingga akhir Desember menunjukkan peningkatan rata-rata harian yang cukup signifikan baik di pengamatan 00.00 dan 12.00 UTC.

Level kondensasi konveksi (CCL) merupakan ketinggian pada saat paket udara yang dapat

terangkat berkondensasi dan awan mulai terbentuk [17]. Ketinggian CCL pada tanggal 3 Desember relatif stabil. Namun, ketinggian CCL menurun pada tanggal 4-5 Desember 2023. Peningkatan ketinggian CCL pada tanggal 3 Desember 2023 kemungkinan disebabkan oleh kandungan abu vulkanik di atmosfer yang reflektif. Abu vulkanik dapat memantulkan kembali radiasi sinar matahari, sehingga menyebabkan suhu udara permukaan dan atmosfer menjadi lebih dingin. Suhu udara yang lebih dingin menyebabkan paket udara lebih mudah terkondensasi, sehingga ketinggian CCL pun naik. Penurunan ketinggian CCL pada 4-5 Desember 2023 kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain abu vulkanik yang menumpuk di atmosfer dapat menghambat proses kondensasi uap air serta faktor-faktor lain seperti peningkatan suhu udara serta pergerakan massa udara di atmosfer.

Parameter kelembapan udara relatif berkaitan dengan uap air yang terkandung di atmosfer. Abu vulkanik pada atmosfer memiliki sifat yang higroskopis yaitu menarik dan mengikat molekul air dari lingkungan. Sehingga, adanya kandungan abu vulkanik di atmosfer seharusnya menurunkan kelembapan udara relatif di lapisan 700 mb. Namun, pada saat terjadinya letusan yaitu tanggal 3 Desember 2023 justru terjadi peningkatan kelembapan, sementara penurunan kelembapan terjadi di tanggal 4 Desember 2023. Hal ini kemungkinan terjadi karena pada saat meletus, abu vulkanik yang disebarkan oleh gunung masih berada dalam jumlah yang sedikit sehingga cenderung tidak menghambat proses kondensasi uap air. Hal ini juga ditunjukkan bahwa terbentuk awan konvektif di citra satelit. Namun, pada saat tanggal 4 Desember 2023 sudah terjadi penumpukan abu vulkanik di atmosfer. Hal ini juga dapat ditunjukkan di citra satelit bahwa citra abu vulkanik lebih terlihat dibandingkan pada hari letusan karena tidak terbentuk awan konvektif.

Sama seperti kelembapan relatif, nilai *precipitable water* berhubungan dengan kandungan uap air di atmosfer. Fluktuasi *precipitable water* juga sejalan dengan fluktuasi kelembapan relative. Pada saat terjadinya letusan, belum terdapat perubahan signifikan karena kandungan abu vulkanik kemungkinan masih sedikit dan tidak mempengaruhi proses kondensasi. Hal ini juga dibuktikan oleh adanya awan konvektif pada citra satelit pada periode waktu 3 Desember 2023. Kemudian, *precipitable water* menurun pada 4 Desember 2023 akibat kandungan abu vulkanik yang semakin meningkat serta sifatnya yang higroskopis. Hal ini dapat mempengaruhi terhambatnya uap air

yang berpotensi menjadi hujan yang dibuktikan bahwa tidak terdapat awan konvektif pada waktu pengamatan 4 Desember 2023.

CAPE merupakan jumlah energi dari gaya apung pada suatu kolom udara yang dibutuhkan untuk mengangkat paket udara [13]. Pada saat terjadinya erupsi pada 3 Desember 2023, nilai CAPE naik dan tergolong dalam kategori tinggi apabila dibandingkan dengan data 15 hari sebelum dan 15 hari setelahnya. Nilai CAPE yang tinggi menunjukkan besarnya energi suatu parcel udara untuk naik ke atmosfer dan berpotensi untuk membentuk awan konvektif, hujan lebat, maupun badai petir. Faktor yang kemungkinan besar menjadi penyebab dari kondisi ini ialah peningkatan suhu udara akibat pelepasan energi panas dari erupsi vulkanik ke atmosfer. Peningkatan suhu udara menyebabkan parcel udara menjadi ringan dan mengembang sehingga lebih mudah untuk bergerak naik secara vertikal. Hal ini juga dibuktikan dari terbentuknya awan konvektif yang menutupi Gunung Marapi saat terjadinya letusan yang diidentifikasi dari citra satelit. Namun, awan konvektif ini tidak menghasilkan hujan. Hal ini dikarenakan terbentuknya hujan merupakan suatu proses yang kompleks sehingga harus mempertimbangkan parameter stabilitas atmosfer yang lainnya pula karena saling berhubungan.

Parameter *Lifted Index* (LI) dinyatakan dalam nilai negatif dan menyatakan pengangkatan parcel udara di level permukaan. Menurut tabel stabilitas atmosfer, nilai indeks LI yang lebih besar dari -2 menunjukkan kondisi udara yang semakin tidak stabil. Pada data tanggal 3-4 Desember 2023 menunjukkan bahwa nilai LI berada pada tingkat moderat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa atmosfer yang semakin tidak stabil memiliki lebih banyak energi untuk naik ke atmosfer dan berpotensi untuk pertumbuhan awan konvektif yang berkembang menjadi hujan lebat maupun badai petir

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data dan pembahasan sebaran abu vulkanik serta kestabilan atmosfer selama periode terjadinya yaitu dari 15 hari sebelum kejadian hingga 15 hari pasca kejadian, maka dapat disimpulkan bahwa kondisi stabilitas vertikal atmosfer yang terjadi adalah nilai *lapse rate* udara semakin negatif dan ketinggian tropopause cenderung meningkat pasca erupsi khususnya pada pengamatan 12.00 UTC. Ketinggian CCL lebih tinggi daripada ketinggian LCL berkisar pada ketinggian 1000-1500 meter

sedangkan pada LCL dibawah 1000 meter. EL cenderung meningkat periode 3-5 desember pada jam pengamatan 12.00 UTC. Nilai RH vertikal menurun drastis pada tanggal 4 khususnya pengamatan 12.00 UTC yang kemudian ditanggal 5 kembali meningkat, begitu juga *precipitable water* yang juga cenderung menurun namun tidak signifikan yang mana hal tersebut diakibatkan oleh sifat higroskopis dari abu vulkanik Gunung Marapi. Nilai LI ditanggal 3 - 4 dan CAPE dari tanggal 3 - 5 desember termasuk kategori *moderate* yang meningkatkan kemungkinan terbentuknya awan konvektif. Variabilitas nilai parameter selama periode sebelum dan setelah terjadinya erupsi menunjukkan bahwa parameter yang paling terpengaruh oleh abu vulkanik adalah ketinggian tropopause, *lapse rate* yang semakin negatif, dan ketinggian LCL yang semakin tinggi, yang cukup dapat terlihat perbedaan sebelum dan pasca letusan pada grafik, sedangkan untuk parameter lainnya cenderung fluktuatif sepanjang hari (tidak terlihat tren peningkatan/penurunan yang signifikan).

Daftar Pustaka

- [1] B. P. Statistik, "Neraca Satelit Pariwisata Nasional (NESPARNAS)," Badan Pusat Statistik, Jakarta, 2017.
- [2] Kemenparekraf, "Rangking Devisa Pariwisata terhadap Komoditas Ekspor Lainnya," Kemenparekraf, 2020.
- [3] Kemenparekraf, "Infografik: 5 Destinasi Super Prioritas," Kemenparekraf, 2021.
- [4] K. P. d. E. K. B. P. d. E. K. R. Indonesia, "Peraturan Menteri Pariwisata dan Ekonomi Kreatif/Kepala Badan Pariwisata dan Ekonomi Kreatif Republik Indonesia Nomor 9 Tahun 2021 tentang Pedoman Destinasi Pariwisata Berkelanjutan," Kementerian Pariwisata dan Ekonomi Kreatif/ Badan Pariwisata dan Ekonomi Kreatif Republik Indonesia, 2021.
- [5] G. Y. R. & F. J. Roshan, "Long-term trends in tourism climate index scores for 40 stations across Iran: the role of climate change and influence on tourism sustainability," *International journal of biometeorology*, pp. 33-52, 2016.
- [6] F. J. R. J. & S.-G. M. Priego, "The impact of climate change on domestic tourism: a gravity model for Spain," *Regional environmental change*, pp. 291-300, 2015.
- [7] M. & S. D. Rutty, "Comparison of climate preferences for domestic and international beach holidays: A case study of Canadian travelers," *Atmosphere*, p. 30, 2016.
- [8] R. R. Arifin, "Analisis Dampak Perubahan Iklim Lokal Terhadap Permintaan Pariwisata Kawasan Pantai Anyer, Banten (Kasus Pantai Bandulu Anyer)," 2011.
- [9] S. S. M. H.-P. D. De Urioste-Stone, "Exploring visitor perceptions of the influence of climate change on tourism at Acadia National Park, Maine," *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* 11, pp. 34-43, 2015.
- [10] D. M. G. & S. M. Scott, "Climate change and the distribution of climatic resources for tourism in North America," *Climate research*, pp. 105-117, 2004.

- [11] A. N. Y. Z. E. & T. M. (. Chen, "Dictionary of geotourism," Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [12] S. Nieuwolt, "An introduction to the climates of the low latitudes," *Tropical climatology*, no. John Wiley and Sons, 1977.
- [13] M. Tang, "Comparing the 'tourism climate index' and 'holiday climate index' in major European urban destinations (Master's thesis, University of Waterloo)," 2013.
- [14] J. M. & R. F. A. Masterton, "Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity.," no. Environment Canada, Atmospheric Environment, 1979.
- [15] R. K. B. J. R. W. J. & H. W. Rana, "Feasibility analysis of using humidex as an indoor thermal comfort predictor," *Energy and Buildings*, pp. 17-25, 2013.

ANALISIS THRESHOLDS CURAH HUJAN PEMICU LONGSOR DI KULON PROGO DIY BERDASARKAN DATA KOMPOSIT GSMAP PADA PERIODE OND TAHUN 2020 - 2022

ANALYSIS OF RAINFALL TRIGGERING THRESHOLDS IN KULON PROGO DIY BASED ON GSMAP COMPOSITE DATA IN THE OND PERIOD OF 2020 - 2022

Lu'lu Nabila Khansa^{1*}, Denisa Ajeng Sabrina¹, Bela Sela Cleodora Yostya¹, Yogi Pratama Hidayat¹, Andung Bayu Sekaranom¹, Andriyas Aryo Prabowo²

¹Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Bulaksumur, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

²Stasiun Klimatologi, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Duwet, Sendangadi, Mlati, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

*Email: lulu.nabila.khansa@mail.ugm.ac.id

Naskah masuk: 22-05-2024

Naskah diperbaiki: 22-11-2024

Naskah diterima: 11-12-2024

ABSTRAK

Intensitas curah hujan yang bervariasi setiap periode waktu menjadi salah satu faktor yang dapat memicu kejadian bencana longsor. Urgensi penanggulangan bencana longsor menjadi hal yang penting dilakukan karena bencana longsor menyebabkan kerugian material, kerusakan ekologis, bahkan korban jiwa. Salah satu kabupaten yang rawan terhadap bencana tanah longsor adalah Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Ambang batas curah hujan pemicu longsor di Kulon Progo yang diperoleh adalah 34,26 mm pada Hari H, 85,61 mm pada H-3, dan 188,54 mm pada H-10. Penerapan ambang batas terhadap data curah hujan satelit, pembobotan kelas, dan overlay Peta Potensi Rawan Longsor Balai Sabo menghasilkan hasil penelitian berupa Peta Kerawanan Longsor di Kabupaten Kulon Progo, DIY Periode Bulan OND Tahun 2020-2022. Peta tersebut menunjukkan bahwa dominasi tingkat kerawanan longsor ada pada klasifikasi rawan hingga sangat rawan terutama pada Kecamatan Samigaluh, Girimulyo, dan Kokap. Kecamatan Samigaluh menjadi kecamatan dengan potensi longsor tertinggi berdasarkan distribusi utama klasifikasi kerawanan pada tingkat sangat rentan.

Kata kunci: Ambang batas, Curah hujan, GSMaP, Kulon Progo, Longsor

ABSTRACT

The varying intensity of rainfall over different time periods is one of the factors that can trigger landslide disasters. The urgency of landslide disaster management is critical, as landslides can cause material losses, ecological damage, and even loss of life. One of the regions prone to landslides is Kulon Progo Regency, Special Region of Yogyakarta. The rainfall threshold triggering landslides in Kulon Progo was determined to be 34.26 mm on the event day (D-day), 85.61 mm three days before the event (D-3), and 188.54 mm ten days before the event (D-10). Applying the threshold to satellite rainfall data, class weighting, and overlaying the Landslide Hazard Potential Map from the Sabo Center yielded a research result in the form of a Landslide Hazard Map for Kulon Progo Regency, DIY, during the OND Period of 2020–2022. The map indicates that the dominant level of landslide hazard falls into the "prone" to "highly prone" classifications, particularly in the Samigaluh, Girimulyo, and Kokap sub-districts. Samigaluh Sub-district is identified as the area with the highest landslide potential based on the main distribution of the "highly vulnerable" classification.

Keywords: Threshold, Rainfall, GSMaP, Kulon Progo, Landslide

1. Pendahuluan

Kondisi negara Indonesia yang memiliki iklim tropis dan terletak diantara tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Pasifik, Eurasia, dan Indo-Australia menyebabkan Indonesia menjadi negara yang berpotensi tinggi dalam terjadinya bencana [1]. Bencana tersebut dapat terjadi hampir di seluruh daerah di Indonesia, salah satunya adalah Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Bencana alam seperti tanah longsor dapat terjadi secara mendadak, sehingga perlu dilakukan adaptasi dan mitigasi agar dampak negatif dapat diminimalkan. Potensi klimatologis seperti curah hujan dengan intensitas yang bervariasi setiap periode waktu di D.I Yogyakarta menjadi salah satu faktor yang dapat memicu kejadian bencana longsor [2]. Tingginya intensitas curah hujan serta panjangnya durasi hujan dapat mempengaruhi kelembaban tanah yang dapat menyebabkan tanah longsor dikarenakan adanya penumpukan tekanan air ke dalam tanah [3]. Kemudian, tatanan geologis yang meliputi pola patahan batuan, perlapisan batuan, kandungan air, karakteristik tanah serta kemiringan juga mempengaruhi pergerakan tanah yang terjadi [4]. Kedua acuan data baik olahan data hujan serta plot titik lokasi sesuai karakteristik geologisnya menjadikan integrasi yang baik dalam monitoring kerawanan longsor.

Bencana tanah longsor terus meningkat seperti 351 kejadian pada 2021, dan melonjak 707 kejadian pada 2022 [5]. Secara akumulatif dalam kurun 2018-2022, dimana bencana longsor telah terjadi sebanyak 2.186 kali di DIY dengan jumlah kejadian terbanyak di Kabupaten Kulon Progo yang mencapai 1.068, diikuti Bantul 488, Gunungkidul 389, Sleman 149, dan Kota Yogyakarta 116 kejadian. Kulon Progo termasuk kabupaten yang rawan terhadap bencana tanah longsor [6]. Penelitian yang intens mengenai kerawanan bencana longsor menjadi hal yang penting dilakukan karena bencana longsor menyebabkan kerugian material, kerusakan ekologis, bahkan korban jiwa [7]. Kabupaten Kulon Progo menjadi wilayah kabupaten yang memiliki tempat wisata yang bervariasi dan menarik dikunjungi [8]. Berdasarkan kondisi di atas, analisis kerawanan longsor diperlukan untuk sektor pariwisata di Kabupaten Kulon Progo. Urgensi penanggulangan bencana tanah longsor perlu dilakukan segera dan salah satu cara yang dapat dilakukan dengan memperhitungkan dan mengkombinasikan faktor - faktor pemicu lainnya seperti curah hujan.

Longsor yang terjadi menjadi bencana alam yang dapat diramalkan, karena kedatangannya berhubungan erat dengan besarnya curah hujan yang terjadi di suatu wilayah [9]. Salah satu metode penerapan identifikasi longsor yang dapat dilakukan yaitu dengan penerapan ambang batas hujan [10]. Penentuan ambang batas hujan dapat dilakukan dengan data observasi dari stasiun hujan. Namun, hal ini tidak representatif apabila titik kejadian longsor berada di luar jangkauan atau jauh dari stasiun hujan. Oleh karena itu, penting halnya menggunakan alternatif lain berupa data satelit contohnya menggunakan data GSMaP. Hal ini dikarenakan GSMaP dapat mencakup titik longsor sesuai dengan koordinat. Penelitian ini menggunakan kombinasi data GSMaP dan curah hujan observasi untuk menentukan ambang batas curah hujan pemicu longsor. Ambang batas curah hujan yang memicu longsor tersebut dapat menjadi acuan dalam proses adaptasi dan mitigasi kerawanan bencana tanah longsor di Kabupaten Kulon Progo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

Periode bulan yang diteliti dalam penelitian ini adalah bulan Oktober, November, dan Desember (OND) dengan 498 titik. Pemilihan periode OND (Oktober, November, dan Desember) tersebut dilakukan karena berdasarkan data 1083 titik yang telah diolah, diketahui bahwa pada ketiga bulan tersebut terjadi banyak bencana longsor dalam rentang tahun 2020-2022 terutama di tahun 2022. Pemilihan spesifikasi bulan hujan dapat digunakan untuk meminimalisir nilai error serta untuk mendapatkan hasil koreksi curah hujan yang baik [11]. Banyaknya longsor yang terjadi pada ketiga bulan tersebut menjadi penting untuk dilakukan penelitian agar dapat dilakukan mitigasi bencana yang dapat dipersiapkan ketika memasuki bulan-bulan yang terjadi banyak longsor.

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari intensitas curah hujan terhadap kerawanan longsor di Kabupaten Kulon Progo, mengetahui nilai ambang batas curah hujan pada CH harian, CH 3 harian, serta CH 10 harian pemicu longsor di Kabupaten Kulon Progo, serta mengetahui persebaran spasial dari kerawanan bencana longsor di Kabupaten Kulon Progo, DIY.

2. Metode Penelitian

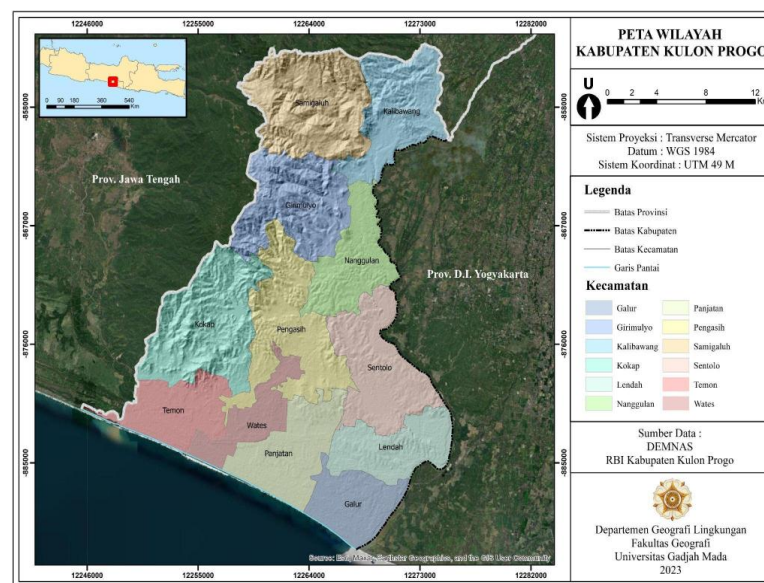
Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian yang dipilih pada analisis kerawanan longsor, mengacu pada cakupan unit kabupaten. Tinjauan lokasi yang dipilih berada di Kabupaten Kulon Progo, DIY dengan titik koordinat $7^{\circ}38'42''$ - $7^{\circ}59'3''$ Lintang Selatan dan $110^{\circ}1'37''$ - $110^{\circ}16'26''$ Bujur Timur. Cakupan luasan lokasi penelitian sebesar 58.627,5 Ha meliputi 12 Kecamatan serta 88 Desa [12]. Kabupaten Kulon Progo berbatasan dengan Kabupaten Sleman dan Kabupaten Bantul di bagian timur, kemudian di sebelah selatan berbatasan dengan Samudra Hindia. Pada bagian barat terdapat Kabupaten Purworejo dan

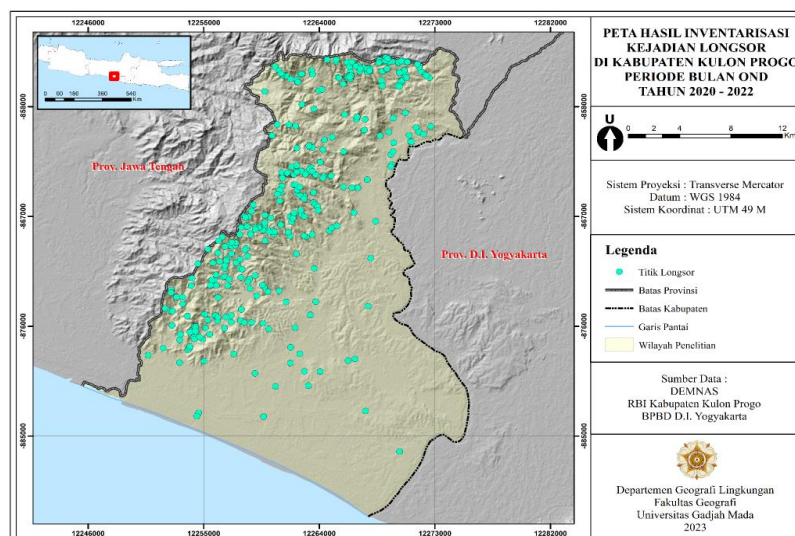
di sebelah utara terdapat Kabupaten Magelang. Adapun peta lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 1.

Pemilihan Titik Longsor.

Titik longsor dalam penelitian ini didasarkan oleh data dari Badan Penanggulangan. Bencana Daerah di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Spesifikasi titik mengarah pada lokasi kajian, yaitu di Kabupaten Kulon Progo, DIY. Sebanyak 387 titik longsor dengan koordinat tertentu di periode tahun 2020 - 2022 didapatkan setelah dilakukan seleksi data longsor. Peta titik longsor di Kulon Progo periode tahun 2020-2022 ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Peta Wilayah Penelitian
Sumber: Olahan Kelompok 2 UGM Magang BMKG, 2023



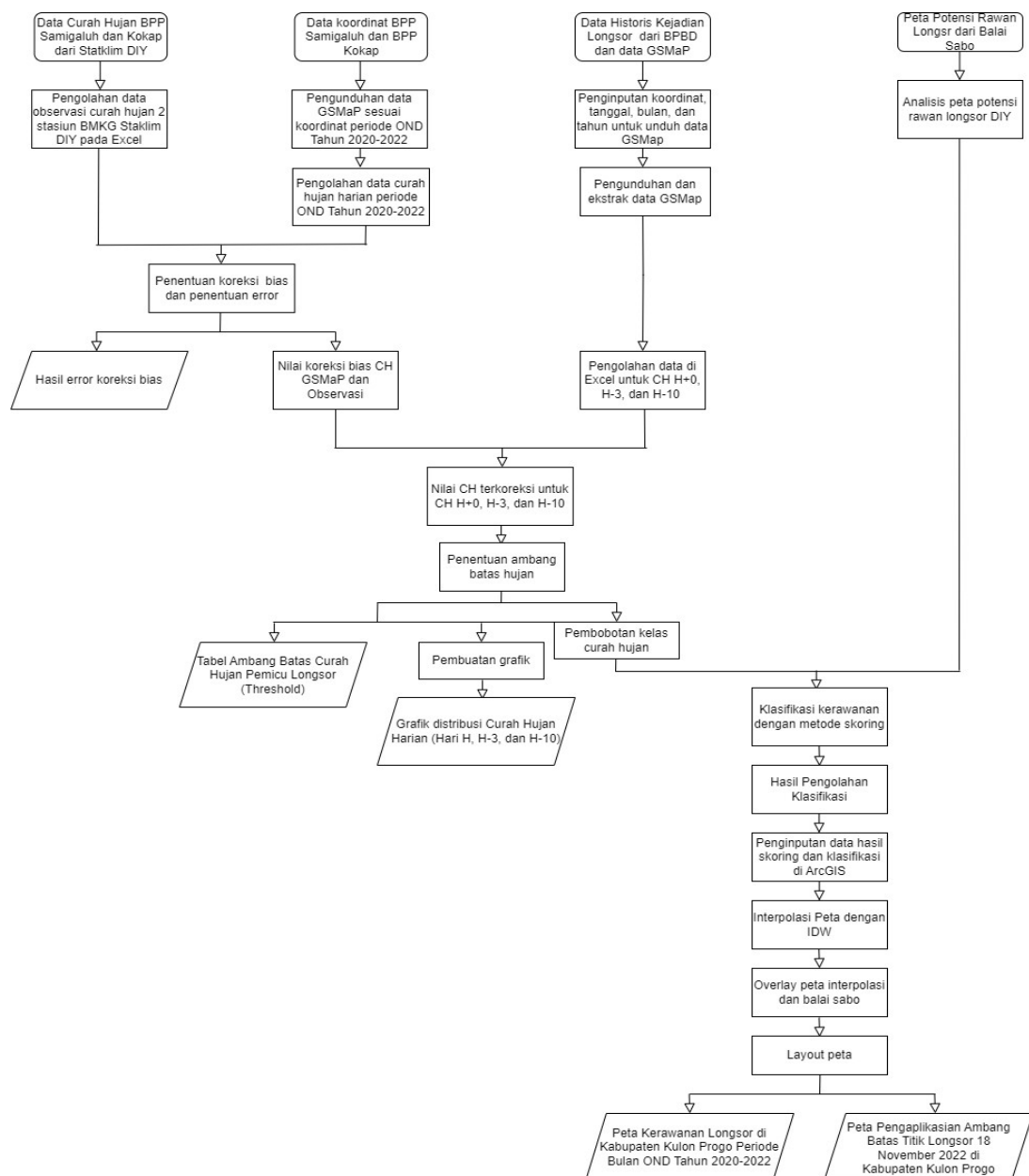
Gambar 2. Peta Titik Longsor di Kabupaten Kulon Progo Periode Bulan OND Tahun 2020-2022
Sumber: Olahan Kelompok 2 UGM Magang BMKG, 2023

Data Penelitian

1. Data curah hujan dari komposit GSMaP tahun 2020 - 2022.
2. Data kejadian longsor di Kabupaten Kulon Progo periode tahun 2020 - 2022 bersumber dari BPBD Daerah Istimewa Yogyakarta didapat pada tahun 2023.
3. Data curah hujan hasil observasi stasiun hujan tahun 2020 - 2022 bersumber dari BMKG dengan rincian BPP Samigaluh dan BPP Kokap yang didapat pada tahun 2023.
4. Data peta klasifikasi longsor Daerah Istimewa Yogyakarta yang bersumber dari Balai SABO DIY

Kerangka Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode kuantitatif dengan menggunakan data sekunder. Metode kuantitatif digunakan untuk penelitian yang menggunakan data dalam bentuk numerik, sehingga terdapat hasil analisis berupa tabel, grafik, maupun tabel yang dianalisis secara sistematis dan statistik [13]. Hal ini sesuai dengan output akhir penelitian yang berupa tabel, grafik, serta peta kerawanan bencana longsor. Adapun diagram alir yang digunakan dalam analisis penelitian ini dengan mencakup input, proses, dan juga output, ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir

Sumber: Olahan Kelompok 2 UGM Magang BMKG, 2023

Metode Analisis Data

Penghapusan data outlier.

Data yang signifikansinya lebih kecil dan sama dengan 0,001 dianggap sebagai data outlier [14]. Data yang diidentifikasi sebagai outlier apabila dinilai tidak merepresentasikan populasi, sehingga perlu dibuang [15]. Berdasarkan dasar inilah, dapat dijadikan acuan pada pengolahan penghapusan data 0 di hari H longsor karena pada hari-H kejadian longsor ada kepastian terjadinya hujan.

Koreksi Data

Tahap awal sebelum mengolah ambang batas hujan diperlukan olah data koreksi antara data curah hujan observasi dengan data curah hujan dari GSMaP. Acuan data curah hujan observasi yang digunakan untuk proses koreksi yaitu data curah hujan harian (mm/hari) dari BPP Samigaluh dan BPP Kokap, Kulon Progo, DIY. Pemilihan stasiun pengamatan hujan di BPP Samigaluh dan BPP Kokap dipilih dikarenakan stasiun pengamatan tersebut yang representatif karena berlokasi di lokasi penelitian dan memiliki kejadian longsor yang cukup banyak terjadi dalam periode 2020 - 2022. Koreksi bias dengan data terestrial berupa stasiun hujan observasi diperlukan untuk memvalidasi curah hujan di GSMaP menjadi curah hujan yang akurat dan aktual sesuai dengan nilai curah hujan yang sebenarnya terjadi. Adapun koreksi bias yang digunakan mengacu pada [16];

$$\text{Bias Correction Factor (BF)} = \frac{\text{Gauge Precipitation (Gi)}}{\text{GSMaP Precipitation (Si)}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{GSMaP}_{\text{corrected}} (\text{Si}_{\text{corr}}) = \text{Bias Correction Factor (BF)} \times \text{GSMaP Precipitation (Si)} \dots\dots\dots(2)$$

Langkah selanjutnya setelah memperoleh data curah hujan observasi dan curah hujan GSMaP tahun 2022 yang diunduh sesuai waktu dan koordinat di website JAXA Global Rainfall Watch dilakukan penyesuaian pencatatan curah hujan antara stasiun pengamatan dan GSMaP, perhitungan rata - rata curah hujan observasi dan GSMaP satu tahun untuk menghasilkan koreksi bias sebagai faktor koreksi(1), dan perhitungan koreksi bias(2) menggunakan rumus yang tertera di atas sehingga menghasilkan nilai koreksi bias per hari. Koreksi bias dilakukan dengan menggunakan faktor perbaikan bias untuk koreksi setiap jam data curah hujan yang kemudian diubah menjadi harian data curah hujan [17]. Penggunaan rumus koreksi bias tersebut melalui bias perkalian sederhana faktor koreksi karena adanya kelangkaan data dari sistem stasiun pengukur hujan [18]. Hasil akhir koreksi bias adalah nilai curah hujan hasil koreksi yang

overestimate atau underestimate dalam periode waktu harian.

Penentuan nilai Error dengan Sampel.

Nilai error menggunakan sampel data sebanyak 75 titik CH GSMaP terkoreksi titik longsor dengan CH Observasi untuk wilayah BPP Samigaluh dan BPP Kokap. Pemilihan sampel didasarkan pada wilayah dan waktu dan kemudian diolah menggunakan RMSE yang mengacu pada [19];

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - Q_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

Fi = Nilai Prediksi

Qi = Nilai Observasi

n = Banyaknya Data

Kompilasi dan Konversi Data

Pada proses analisis data, dilakukan perolehan data terlebih dahulu dengan mengunduh data curah hujan dari 387 titik koordinat longsor di GSMaP melalui website JAXA Global Rainfall Watch (<https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>) dengan menu negara Indonesia. Kemudian dilanjutkan dengan subset data untuk input latitude dan longitude serta acuan waktu yang dibutuhkan dengan format *.csv. Data awal yang didapatkan dari hasil pengunduhan GSMaP merupakan data curah hujan dalam bentuk per jam. Selanjutnya, data yang dibutuhkan dalam pengolahan ambang batas hujan memerlukan skala temporal berupa data harian.

Penyesuaian Zona Waktu

Produk data hujan GSMaP yang digunakan dalam analisis merupakan data Near Real Time, sehingga membutuhkan penyesuaian zona waktu setempat berdasarkan zona waktu UTC. Kabupaten Kulon Progo termasuk dalam zona waktu WIB (Waktu Indonesia Barat) yang memiliki selisih waktu sebanyak +7 jam dengan zona waktu UTC. Perbedaan waktu tersebut menyebabkan perlunya penambahan 7 jam dalam susunan waktu yang telah di unduh di GSMaP.

Update Nilai Curah Hujan Hasil Koreksi

Data curah hujan harian GSMaP sebanyak 387 titik longsor selanjutnya dilakukan proses penambahan dengan nilai curah hujan hasil koreksi sehingga menghasilkan nilai curah hujan yang akurat sesuai dengan keadaan sebenarnya.

Klasifikasi Nilai Curah Hujan

BMKG [20], mengklasifikasikan curah hujan kedalam lima kategori, yakni: 1) Curah hujan sebesar 0,5 - 20 mm/hari masuk dalam kategori

hujan ringan, 2) Curah hujan sebesar 20 - 50 mm/hari masuk dalam kategori hujan sedang, 3) Curah hujan sebesar 50 - 100 mm/hari masuk dalam kategori hujan lebat, 4) Curah hujan sebesar 100 - 150 mm/hari masuk dalam kategori hujan sangat lebat, dan 5) Curah hujan sebesar >150 mm/hari masuk dalam kategori hujan ekstrem.

Perhitungan Nilai Ambang Batas Curah Hujan Pemicu Longsor

Nilai ambang batas pemicu longsor dibagi menjadi 3 yaitu ambang batas curah hujan harian, curah hujan 3 harian, dan curah hujan 10 harian (dasarian). Penentuan klasifikasi ambang batas pemicu longsor didasarkan pada beberapa pertimbangan. Curah hujan harian yang mewakili curah hujan yang berdampak langsung saat kejadian longsor. Data kumulatif 3 hari dipilih berdasarkan tanah longsor banyak yang dipicu oleh intensitas curah hujan dari 72 jam atau kurang [21]. Data kumulatif 10 hari digunakan karena menghasilkan nilai ambang batas relatif rendah terikat inisiasi tanah longsor [22]. Nilai ambang batas dapat diperoleh melalui kalkulasi nilai tengah pada curah hujan harian, 3 harian, dan dasarian dari nilai curah hujan hasil koreksi pemicu longsor [23]. Pengelompokan nilai hujan dibagi menjadi tiga, seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengelompokan Nilai Hujan

Acuan	Keterangan	Rumus
CH (H)	Jumlah nilai curah hujan pada saat longsor terjadi	Σ [Hari H]
CH (H-3)	Jumlah nilai curah hujan akumulasi dari tiga hari sebelum longsor terjadi	Σ [Nilai 3 hari sebelum hari H]
CH (H-10)	Jumlah nilai curah hujan akumulasi sepuluh hari (dasarian) sebelum longsor terjadi	Σ [Nilai 10 hari sebelum hari H]

Sumber: USACE, 1997

Pembobotan Kelas Curah Hujan

Nilai curah hujan di hari H, H-3, dan H-10 yang telah diolah dengan menggunakan metode median dilakukan pembobotan untuk menemukan klasifikasi dari tingkat kerawanan curah hujan yang dapat menyebabkan longsor dengan kalkulasi tabel 2.

Tabel 2. Skoring Pembobotan Curah Hujan

Pembobotan Curah Hujan	Keterangan	Skor
Tidak Ada Peringatan	Jika Curah Hujan Hari H < 34,26 mm	0
Rendah	Jika Curah Hujan Hari H > 34,26 mm	1
Sedang	Jika Curah Hujan Hari H > 34,26 mm dan Curah Hujan H-3 > 85,61 mm	2
Tinggi	Jika Curah Hujan Hari H > 34,26 mm dan Curah Hujan H-3 > 85,61 mm, dan Curah Hujan H-10 > 188,54 mm	3

Sumber: Olahan Kelompok 2 UGM Magang BMKG, 2023

Pengolahan Klasifikasi

Proses pengolahan klasifikasi didasarkan oleh dua acuan, yang pertama yaitu klasifikasi dari hasil olah data curah hujan berupa skor ambang batas dan yang kedua adalah skor kriteria longsor SABO. Kalkulasi nilai skoring (0,1,2, dan 3) dari dua acuan digunakan untuk menentukan tingkat klasifikasi kerawanan bencana longsor. Adapun tabel klasifikasi yang digunakan dalam pengolahan penelitian, yaitu sebagai berikut:

Skor Ambang Batas CH		<34.26	>34.26	>85.61	>188.54
Skor Kriteria Longsor SABO		0	1	2	3
Sangat Rendah	0	0	1	2	3
Rendah	1	1	2	3	4
Menengah	2	2	3	4	5
Tinggi	3	3	4	5	6

Keterangan Klasifikasi:	
	: Tidak Rawan
	: Agak Rawan
	: Rawan
	: Sangat Rawan

Gambar 4. Klasifikasi Kerawanan Bencana Longsor Kabupaten Kulon Progo

Sumber: Olahan Kelompok 2 UGM Magang BMKG, 2023

Interpolasi

Metode interpolasi yang digunakan dalam pengolahan yaitu berupa metode IDW (*Inverse Distance Weighted*). Teknik interpolasi dengan metode IDW menjadi cara deterministik sederhana dengan mempertimbangkan titik di sekitarnya [24]. Interpolasi spasial dengan menggunakan IDW sesuai dilakukan dalam pemetaan terkait dengan nilai ambang batas curah hujan dalam pemetaan kerawanan longsor yang sudah diolah dan diklasifikasikan.

Hal ini disebabkan oleh relevansi spasial dari metode *Inverse Distance Weighted* yang sesuai dalam menciptakan representasi distribusi curah hujan terhadap longsor dengan pertimbangan jarak titik antar data [25]. Kemudian dengan IDW, dapat memberikan sensitivitas terhadap lingkungan lokal karena memberikan bobot yang lebih besar pada titik data yang berdekatan dan bobot yang kecil pada titik yang lebih jauh, dimana hal ini menjadi penerapan dalam konsep inversi jarak yang sesuai. *Inverse Distance Weighted* cenderung memberikan hasil yang baik dengan penggunaan data titik sampel yang cukup rapat, dan dalam pemodelan data dalam pemetaan kerawanan longsor ini memiliki titik longsor yang dapat meningkatkan akurasi pemetaan.

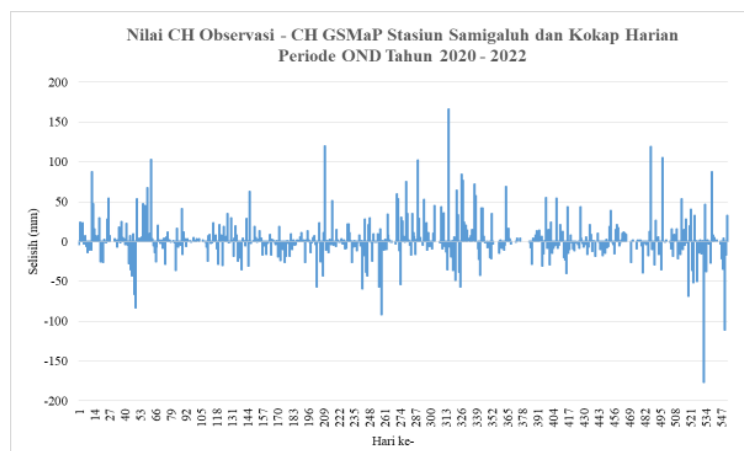
Pengolahan Integrasi Spasial Dalam Pemetaan Kerawanan Bencana

Kajian ini diintegrasikan dengan sistem informasi geografis memanfaatkan beberapa *geoprocessing tools* yang ada di dalam aplikasi sistem informasi geografis berupa *software* QGIS. *Geoprocessing* di dalam sistem informasi geografis merupakan sebuah alat untuk melakukan analisis spasial yang mengkaji lokasi objek secara kualitatif beserta sifat-sifat dan data mengenai objek tersebut [26]. Dominasi pengolahan menggunakan tools *geoprocessing* berupa *overlay* yaitu tools yang dapat menggabungkan geometri dan tabel atribut dari beberapa layer data untuk menghasilkan sebuah peta komposit baru [27]. Peta baru yang dihasilkan dari proses *overlay* tersebut merupakan peta kerawanan bencana longsor terhadap ambang batas curah hujan dengan korelasi data observasi dan komposit GSMaP yang merupakan luaran dari proses penelitian ini.

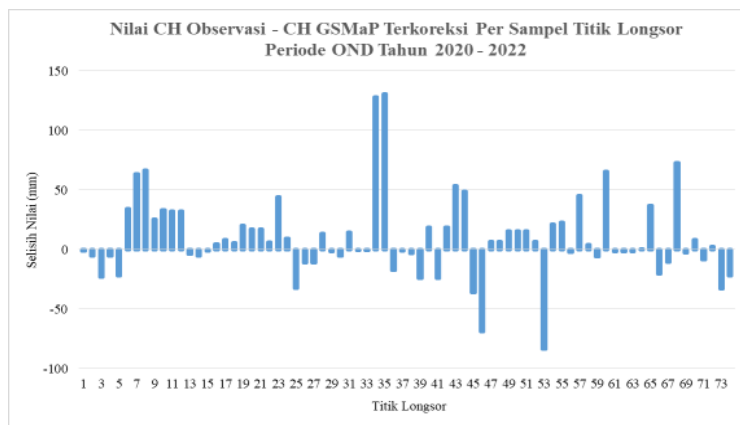
3. Hasil dan Pembahasan

Perbandingan curah hujan observasi dengan curah hujan hasil ekstrak GSMaP divisualisasikan dalam grafik untuk mengetahui distribusi pada kedua data tersebut. Berdasarkan Gambar 5, distribusi nilai curah hujan periode OND tahun 2020 - 2021 cenderung lebih tinggi curah hujan observasi dibandingkan dengan curah hujan GSMaP. Hal tersebut dapat dilihat dominasi nilai selisih curah hujan memiliki nilai positif. Perbandingan kedua data tersebut kemudian menghasilkan nilai faktor koreksi bias senilai 1,16 yang digunakan sebagai faktor yang akan dikalikan dengan curah hujan harian dari curah hujan H+0 - H-10. Nilai curah hujan tersebut kemudian menghasilkan nilai curah hujan terkoreksi yang lebih representatif sehingga dapat digunakan dalam analisis ambang batas curah hujan.

Berdasarkan Gambar 5, distribusi nilai curah hujan periode OND tahun 2020 - 2021 cenderung lebih tinggi curah hujan observasi dibandingkan dengan curah hujan GSMaP. Hal tersebut dapat dilihat dominasi nilai selisih curah hujan memiliki nilai positif. Perbandingan kedua data tersebut kemudian menghasilkan nilai faktor koreksi bias senilai 1,16 yang digunakan sebagai faktor yang akan dikalikan dengan curah hujan harian dari curah hujan H+0 - H-10. Nilai curah hujan tersebut kemudian menghasilkan nilai curah hujan terkoreksi yang lebih representatif sehingga dapat digunakan dalam analisis ambang batas curah hujan.



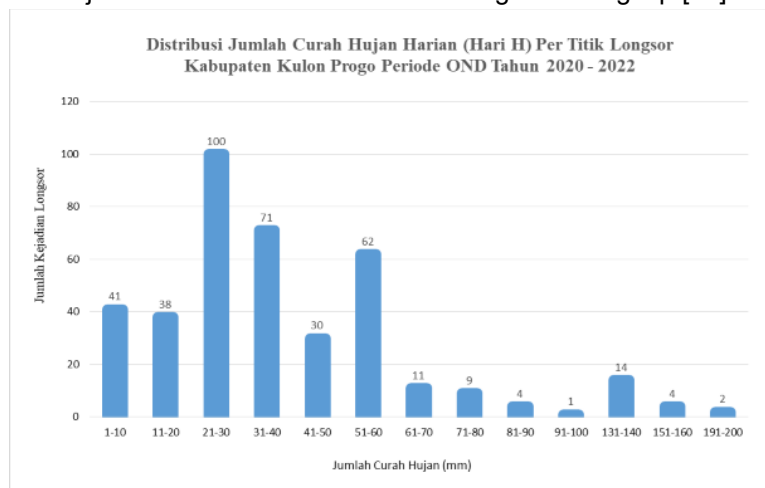
Gambar 5. Nilai Curah Hujan Observasi - Curah Hujan GSMaP Stasiun Samigaluh dan Kokap Harian Periode OND Tahun 2020 - 2022.



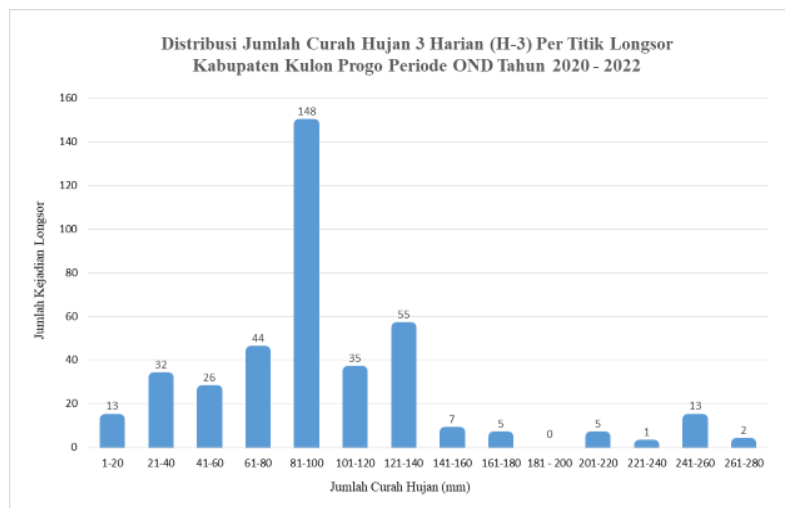
Gambar 6. Nilai Curah Hujan Observasi - Curah Hujan GSMaP Terkoreksi Per Sampel Titik Longsor Periode OND Tahun 2020 - 2022.

Update nilai curah hujan GSMaP yang terkoreksi juga dilakukan visualisasi yang disajikan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar grafik 6, diketahui nilai curah hujan GSMaP setelah dikoreksi juga memiliki dominasi selisih nilai curah hujan positif yang berarti nilai GSMaP lebih rendah dibawah nilai curah hujan observasi. Nilai curah hujan yang *underestimate* dibandingkan curah hujan observasi sesuai dengan penelitian sebelumnya. Curah hujan GSMaP juga cenderung *underestimate* dalam menggambarkan intensitas curah hujan yang sebenarnya sesuai hasil observasi permukaan dan belum mampu mendeteksi curah hujan ekstrem dikarenakan data GSMaP memiliki variasi spasial curah hujan kategori ringan hingga sangat lebat yang dilihat dari sebaran atau polanya [28]. Curah hujan GSMaP selalu

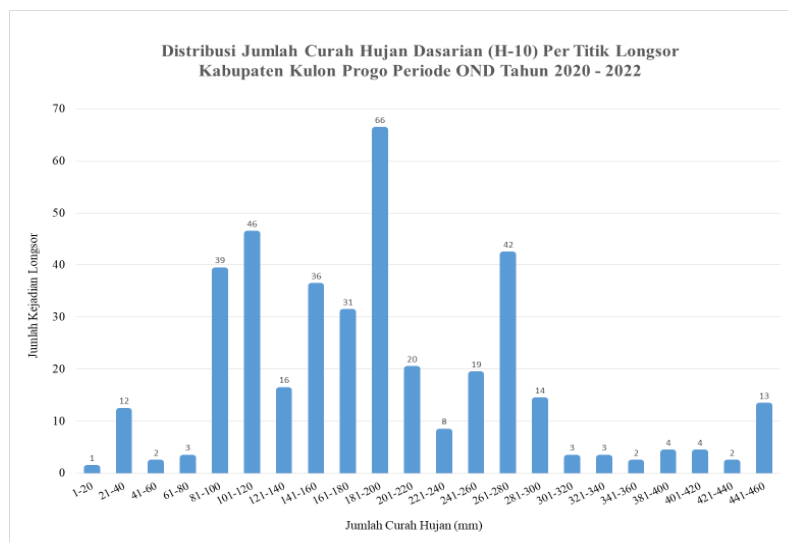
lebih rendah dari intensitas curah hujan permukaan yang disebabkan karena adanya variabilitas nilai emisi permukaan [29]. Data yang sudah dikoreksi juga perlu diketahui nilai RMSE-nya agar mengetahui nilai eror antara curah hujan yang dikoreksi dengan curah hujan observasi. Nilai rata - rata RSME yang didapatkan dari 75 sampel curah hujan hari kejadian longsor adalah 22,78 mm. Nilai tersebut dapat diartikan bahwa perbedaan antara nilai curah hujan GSMaP terkoreksi dengan curah hujan observasi adalah 22,78 mm/hari. Walaupun masih memiliki nilai error namun penggunaan curah hujan penggunaan data GSMaP cukup representatif karena dapat disesuaikan sesuai koordinat dan dapat memenuhi data curah hujan observasi yang cenderung tidak lengkap [30].



Gambar 7. Distribusi Jumlah Curah Hujan Harian (Hari H) Per Titik Kejadian Longsor di Kulon Progo, DIY Periode OND Tahun 2020-2022.



Gambar 8. Distribusi Jumlah Curah Hujan Harian (Hari H-3) Per Titik Kejadian Longsor di Kulon Progo, DIY Tahun 2022.



Gambar 9. Distribusi Jumlah Curah Hujan Dasarian Per Titik Kejadian Longsor di Kulon Progo, DIY Tahun 2022.

Berdasarkan Gambar 7. diketahui bahwa terjadi jumlah longsor yang lebih sedikit pada jumlah curah hujan sebesar 91-100 mm, yaitu hanya 1 kejadian saja sedangkan pada curah hujan 21-30 mm terjadi jumlah longsor paling banyak sejumlah 100 kejadian. Kemudian, pada Gambar 8. jumlah curah hujan dengan rentang sebesar 181-200 mm tidak memiliki kejadian longsor sedangkan pada rentang jumlah curah hujan sebesar 81-100 mm memiliki kejadian longsor terbanyak sebanyak 148 kejadian. Pada Gambar 9. diketahui bahwa jumlah curah hujan paling kecil sebesar 1-20 mm memiliki jumlah kejadian longsor paling sedikit, yakni 1 kejadian saja sedangkan kejadian longsor paling banyak berada pada rentang jumlah curah hujan sebesar 181-200 mm sebanyak 66.

Berdasarkan ketiga grafik tersebut, pada hari H diketahui terjadi longsor terbanyak pada curah hujan sedang sedangkan pada H-3 kejadian longsor terbanyak terjadi saat hujan dalam kondisi lebat dan pada H-10 kejadian longsor terbanyak terjadi pada saat hujan ekstrem. Namun, tidak semua hujan ekstrem menyebabkan kejadian longsor karena pada Gambar 8. diketahui bahwa terdapat 0 kejadian longsor saat terjadi hujan ekstrem.

Jumlah longsor terbanyak pada hari H berada dalam rentang jumlah curah hujan sebesar 21-30 mm disusul dengan jumlah longsor terbanyak ke 2 berada pada rentang jumlah curah hujan 31-40 mm. Lalu, pada curah hujan pada H-3 kejadian longsor yang paling banyak berada di

rentang jumlah curah hujan sebesar 81-100 mm. Sedangkan kejadian longsor terbanyak pada curah hujan pada H-10 terdapat pada rentang 181-200 mm. Berdasarkan data tersebut maka dapat diketahui bahwa semakin tinggi curah hujan yang melebihi ambang batas maka jumlah kejadian longsornya semakin banyak.

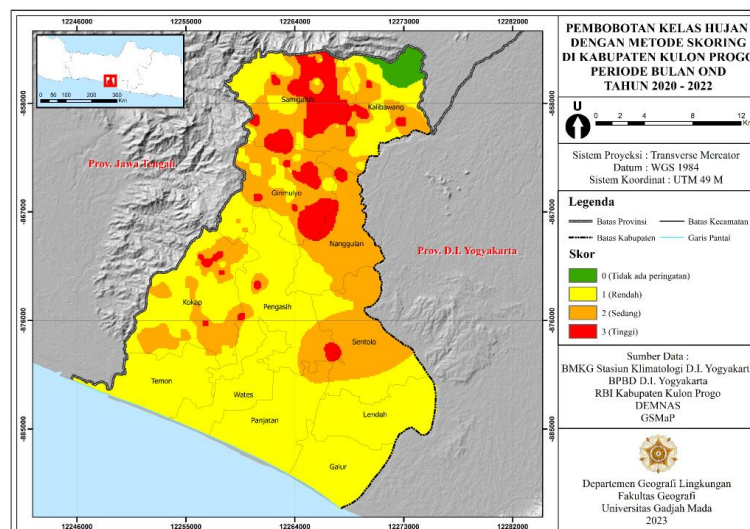
Penentuan ambang batas harian serta hujan kumulatif tiga harian dan sepuluh harian didasarkan oleh data kejadian longsor serta curah hujan pemicu longsor dari komposit GSMaP yang sudah dikoreksi. Klasifikasi tiga acuan ambang batas curah hujan pemicu longsor ini didasarkan pada besarnya intensitas hujan dalam suatu kurun waktu yang memengaruhi sistematisa tanah terkait longsor yang terjadi. Longsor lereng pada musim hujan disebabkan oleh infiltrasi air hujan ke dalam tanah yang menyebabkan tanah menjadi jenuh, sehingga terjadi perubahan atas berkurangnya suction sampai mencapai nol oleh infiltrasi [31]. Kejadian longsor atas hubungan curah hujan mengarah pada proses infiltrasi hujan yang membutuhkan skala waktu tertentu [32] Berdasarkan hal tersebut menjadikan analisis data yang dilakukan tidak hanya berada pada acuan hari-H saat kejadian longsor, namun tiga hari (H-3) dan juga sepuluh hari sebelum terjadi longsor (H-10). Berikut hasil nilai ambang batas curah hujan pemicu longsor di Kabupaten Kulon Progo.

Tabel 3. Ambang Batas Curah Hujan Pemicu Longsor (mm).

Curah Hujan Harian	Nilai Ambang Batas
H+0	34,26
H-3	85,61
H-10	188,54

Sumber: Olahan Kelompok 2 UGM Magang BMKG, 2023

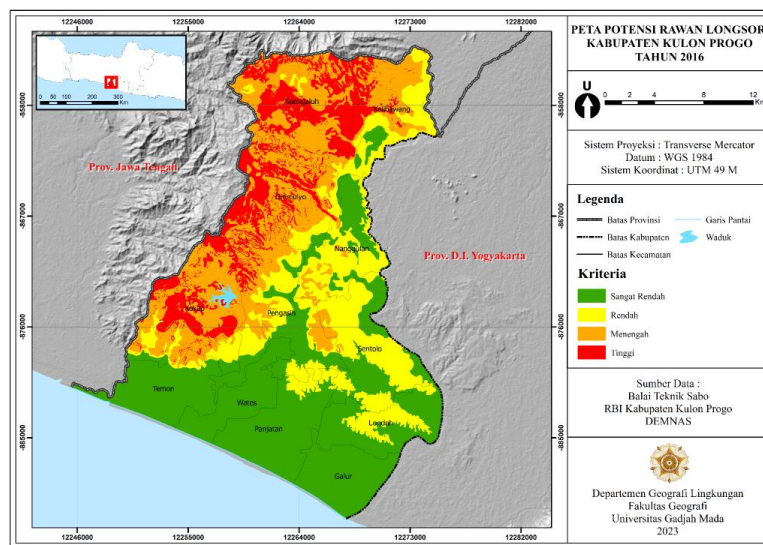
Berdasarkan Tabel 3, terdapat tiga kuantitas ambang batas curah hujan pemicu longsor dalam satuan milimeter (mm). Adapun hasil yang diperoleh, yaitu pada curah hujan harian saat kejadian memiliki ambang batas sebesar 34,26 mm. Kemudian, kalkulasi ambang batas curah hujan dalam tiga hari sebelum terjadi longsor sebesar 85,61 mm, dan ambang batas curah hujan pemicu longsor dari sepuluh hari sebelum kejadian sebesar 188,54 mm. Ambang batas curah hujan dapat diartikan sebagai batas bawah dari titik longsor yang disebabkan oleh curah hujan [33]. Berdasarkan hal tersebut, dapat dikaitkan dengan hasil penelitian bahwa apabila terdapat intensitas hujan yang kurang dari 34,26 mm dalam satu hari kejadian, maka tidak terjadi bencana longsor di suatu titik Kulon Progo. Sedangkan, apabila di suatu titik terdapat intensitas hujan yang lebih dari 34,26 mm, maka akan berpotensi terjadi longsor. Namun, kejadian longsor juga perlu meninjau acuan ambang batas sebelum hari terjadinya bencana longsor. Apabila curah hujan H-3 melebihi 85,61 mm dan curah hujan H-10 melebihi 188,54 mm maka terdapat potensi longsor.



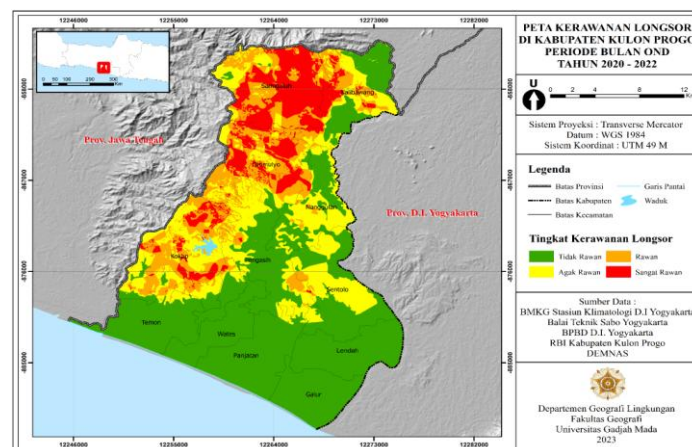
Gambar 10. Peta Pembobotan Kelas Hujan Dengan Metode Skoring di Kabupaten Kulon Progo, DIY Periode Bulan OND Tahun 2020-2022.

Gambar 10. merupakan peta yang merepresentasikan kondisi curah hujan baik itu tinggi maupun rendah pada periode Bulan Oktober, November, dan Desember Tahun 2020-2022. Peta Pembobotan kelas hujan diatas merupakan hasil interpolasi dengan metode IDW (*Inverse Distance Weighted*) dari data curah hujan GSMaP seluruh titik longsor yang telah dikoreksi dengan data curah hujan observasi. Curah hujan terkoreksi tersebut kemudian dilakukan dengan metode median sehingga menghasilkan skor. Berdasarkan Gambar 10. dapat terlihat bahwa Kabupaten Kulon Progo didominasi oleh pembobotan

dengan skor nilai 1 atau sedang. Skor terendah berada di Kecamatan Kalibawang bagian utara dengan skor 0 atau tidak ada peringatan. Kecamatan yang mendominasi oleh pembobotan kelas hujan tinggi dengan skor 3 adalah Kecamatan Samigaluh dan Girimulyo. Hal tersebut dapat disimpulkan bahwa curah hujan tertinggi pada periode bulan Oktober, November, Desember tahun 2020 - 2022 terdapat di Kecamatan Samigaluh dan Girimulyo. Kecamatan yang memiliki berbagai variasi kelas hujan adalah Kecamatan Kalibawang dengan nilai skor 0, 2, dan 3.



Gambar 11. Peta Potensi Rawan Longsor di Kabupaten Kulon Progo, DIY Tahun 2016.



Gambar 12. Peta Kerawanan Longsor di Kabupaten Kulon Progo, DIY periode bulan OND Tahun 2020-2022.

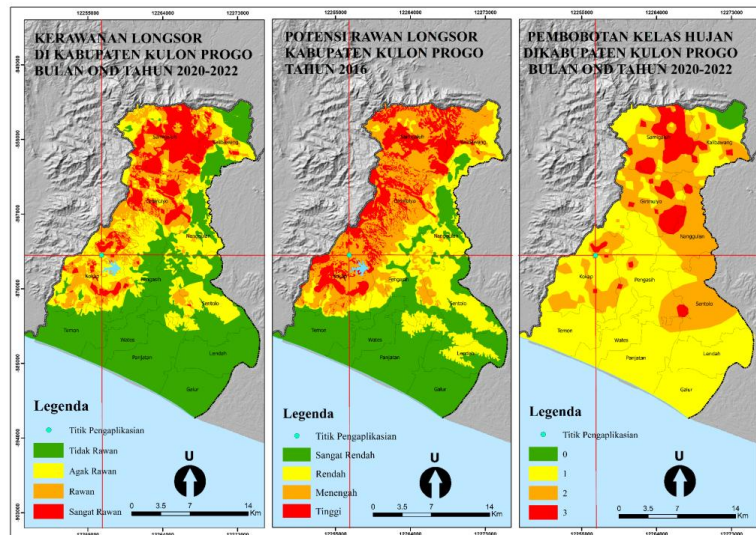
Berdasarkan Gambar 11. terdapat variasi sebaran klasifikasi tingkatan potensi rawan longsor yang beragam di wilayah Kulon Progo, DIY. Wilayah Kecamatan Samigaluh, Girimulyo, dan Kokap menjadi wilayah yang memiliki dominasi klasifikasi potensi rawan longsor tinggi dan menengah serta sedikit klasifikasi rendah. Ketiga kecamatan tersebut menjadi wilayah dengan potensi kejadian longsor yang paling tinggi. Kecamatan Kalibawang didominasi

Peta Kerawanan Longsor dihasilkan dari overlay antara interpolasi hasil skoring pembobotan data curah hujan satelit GSMAP pada setiap titik longsor (Gambar 10) dan data klasifikasi potensi longsor Balai Teknik Sabo DIY (Gambar 11). Data curah hujan diambil pada setiap titik longsor pada bulan Oktober, November, Desember tahun 2020-2022 yang kemudian di koreksi dan validasi dengan data observasi BMKG Stasiun Klimatologi D.I. Yogyakarta. Berdasarkan Gambar 12, diketahui bahwa mayoritas wilayah Kabupaten Kulon Progo bagian sisi timur tidak rawan terjadi bencana longsor. Namun, pada bagian barat wilayah Kulon Progo terdapat wilayah dengan hasil klasifikasi sangat rawan, rawan, dan agak rawan dan sedikit di bagian wilayah timur. Di wilayah barat Kulon Progo, yang termasuk ke dalam klasifikasi agak rawan lebih banyak dibandingkan dengan ketiga klasifikasi lainnya. Kabupaten yang memiliki tingkat kerawanan bencana tanah longsor sangat rawan terbanyak adalah Kecamatan Samigaluh. Tanah longsor di Kecamatan Samigaluh disebabkan oleh faktor kelerengan sebesar 33,3%, curah hujan 22,8%, litologi 17%, tata guna lahan 11,8%, kerapatan vegetasi 8,8% dan jenis tanah 5,8% [34]. Kecamatan Girimulyo menjadi kecamatan yang memiliki potensi tinggi terhadap terjadinya bencana tanah longsor [35]. Namun, setelah dilakukan komposit terhadap data GSMaP yang dilakukan dalam penelitian ini, Kecamatan Samigaluh menjadi kecamatan yang paling rawan terhadap terjadinya bencana longsor.

potensi rawan menengah dan rendah, namun masih terdapat klasifikasi potensi rawan tinggi di Kalibawang bagian barat. Kecamatan Lendah, Sentolo, Pengasih, dan Nanggulan didominasi klasifikasi potensi rawan sangat rendah - menengah. Bagian selatan Kabupaten Kulon Progo seperti wilayah Kecamatan Temon, Wates, Panjatan, dan Galur didominasi potensi rawan longsor yang sangat rendah.

Kondisi Wilayah Kulon Progo bagian barat didominasi oleh banyaknya morfologi Pegunungan Menoreh. Kompleks Pegunungan Menoreh menjadi salah satu penyebab tingginya curah hujan akibat terjadinya pembentukan hujan orografis [36]. Hubungan antara curah hujan dengan kondisi topografinya dipengaruhi oleh tiga proses antara lain adanya proses adiabatik, proses konvergensi horizontal, dan proses konvektif [37]. Curah hujan yang terus meningkat akibat dari terjadinya hujan orografis dapat disebabkan oleh sistematisa elevasi menoreh yang lebih tinggi, sehingga mendukung tingginya bencana longsor di kecamatan yang wilayahnya dekat dengan Pegunungan Menoreh sehingga termasuk ke dalam klasifikasi sangat rawan. Selain itu, hujan orografis tersebut juga menyebabkan wilayah yang berada di balik pegunungan atau wilayah timur Pegunungan Menoreh menjadi daerah yang rawan bencana tanah longsor.

Tingkat elevasi area dapat diperkuat dengan korelasi acuan nilai ambang curah hujan. Hasil integrasi peta pembobotan threshold hujan dengan potensi rawan longsor pada bagian sisi timur Kulon Progo yang meliputi Kecamatan Samigaluh, Kecamatan Girimulyo, dan sebagian Kecamatan Kokap memiliki klasifikasi rawan hingga sangat rawan. Hal ini disebabkan oleh dominasi curah hujan hasil koreksi yang melebihi acuan ambang batas hujan di hari H senilai 34.26 mm/hari serta pengaruh intensitas tiga atau sepuluh hari sebelum kejadian berlangsung. Oleh karena itu, representasi spasial dalam peta memiliki kesesuaian dengan data kerawanan longsor yang telah diolah.



Gambar 13. Integrasi Tiga Peta Pengaplikasian Ambang Batas Curah Hujan terkait Kerawanan Longsor, di Kulon Progo, DIY.

Pengaplikasian ambang batas curah hujan dapat dilakukan dengan penyesuaian kejadian longsor besar di Kabupaten Kulon Progo. Hal tersebut menjadi bukti kesesuaian kejadian longsor dengan threshold yang sudah ditentukan. Berdasarkan data *Pusat Data Emergency Operation* BPBD DIY diambil satu data longsor di Dusun Menguri, Kelurahan Hargotirto, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) dengan titik koordinat 7°48'30,636" LS dan 110°6'12.494 BT sebagai sampel titik longsor. Kejadian longsor terjadi pada hari Jum'at, tanggal 18 November 2022 setelah hujan mengguyur wilayah Kokap. Longsor ini memiliki dimensi longsor dengan panjang 20 meter, tinggi 10 meter, dan lebar 7 meter. Kejadian longsor ini menyebabkan kerugian materil berupa rusaknya bangunan rumah warga karena tertimbun material longsor. Berdasarkan unduh data GSMaP diketahui nilai curah hujan sebanyak 69,36 mm dan menjadi 80,50 mm setelah dikoreksi. Nilai curah hujan tersebut apabila dibandingkan dengan curah hujan observasi yang memiliki curah hujan 87 mm menunjukkan bahwa CH GSMaP *underestimate* dengan nilai *error* RMSE yaitu 6,5. Curah hujan tanggal 18 November 2022 saat terjadi longsor yang bernilai 80,50 sudah melebihi ambang batas curah hujan Hari H penelitian dengan nilai 34,26 mm. Berdasarkan peta potensi rawan longsor dari Balai Sabo menunjukkan klasifikasi potensi rawan yang menengah. Kedua peta tersebut yang

digabungkan menjadi peta kerawanan longsor Kabupaten Kulon Progo Periode Oktober - Desember Tahun 2020 - 2022 kemudian menghasilkan klasifikasi kerawanan longsor kategori rawan. Pengaplikasian satu titik longsor dengan ketiga peta tersebut sudah representatif menggambarkan pengaruh ambang batas curah hujan pemicu longsor dengan kerawanan longsor yang terjadi.

Apabila dikaitkan dengan penelitian terdahulu, dapat berkorelasi pada analisis penentuan nilai ambang batas curah hujan penyebab longsor di Kapanewon Girimulyo, Kulon Progo [38]. Pada penelitian ini menggunakan data dan pengolahan yang sama yaitu dengan JAXA GSMaP, serta meliputi proses interpolasi spasial. Secara intensif, pada Kapanewon Girimulyo memiliki ambang batas curah hujan sebesar 32,08 mm selama acuan 3 hari, sedangkan keseluruhan Kulon Progo mendapatkan ambang batas curah hujan keseluruhan sebesar 34,26 pada curah hujan tepat pada kejadian longsor. Hasil yang dibandingkan tidak sepenuhnya sama karena adanya perbedaan skala, namun dapat dikorelasikan dengan curah hujan aktual. Apabila ditinjau pada penelitian ini dapat berhubungan, di mana hasil interpolasi hujan pada wilayah Kapanewon Girimulyo menunjukkan variasi skoring rendah, sedang, dan tinggi dengan tingkat kerawanan didominasi tinggi. Oleh karena itu, terdapat pendugaan atas pengaruh curah hujan yang melampaui ambang

batas serta potensi rawan longsor yang saling memengaruhi pada setiap titik inventarisasi.

Semakin tinggi nilai ambang batas curah hujan maka semakin tinggi kerawanan longsor yang terjadi di suatu wilayah [39]. Hal ini berkorelasi dengan hasil interpretasi dari 3 peta yang dibandingkan. Apabila suatu titik inventarisasi longsor memiliki skoring pembobotan kelas curah hujan menunjukkan kelas tinggi dari interpolasi ambang batas hari H sebesar 34,26 mm, lalu H-3 sebesar 85,61 mm, dan H-10 sebesar 188,54 mm. Kemudian pada potensi rawan longsor yang meliputi kemiringan lereng, jenis tanah, struktur batuan, dan lain sebagainya menunjukkan kriteria tinggi juga, maka pada peta kerawanan longsor di Kabupaten Kulon Progo juga tinggi pula.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengacu pada 387 titik longsor di Kabupaten Kulon Progo yang dikoreksi biasanya untuk mengidentifikasi overestimate atau underestimate dalam skala harian. Setelah koreksi, nilai error dihitung dan zona waktu disesuaikan guna memastikan akurasi data. Nilai curah hujan (CH) yang telah disesuaikan diklasifikasikan berdasarkan intensitasnya, lalu digunakan dalam perhitungan threshold pemicu longsor. Setiap kelas CH diberi bobot sesuai pengaruhnya terhadap longsor, diikuti pengolahan klasifikasi dan interpolasi untuk memperhalus distribusi spasial. Selanjutnya, dilakukan integrasi spasial dengan data Balai Sabo DIY guna menghasilkan peta kerawanan bencana untuk analisis dan mitigasi risiko longsor.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa intensitas curah hujan sangat mempengaruhi terjadinya bencana tanah longsor yang ditunjukkan dengan distribusi nilai jumlah curah hujan historis ketika melebihi ambang batas maka akan menyebabkan tanah longsor yang lebih banyak. Nilai curah hujan GSMaP di setiap titik longsor di Kabupaten Kulon Progo selama periode Oktober hingga Desember 2020–2022 dilakukan berdasarkan klasifikasi H+0, H-3, dan H-10 sebelum kejadian longsor. Langkah selanjutnya, dilakukan analisis median untuk menentukan ambang batas curah hujan sebagai pemicu longsor dengan hasil sebesar 34,26 mm pada Hari H, 85,61 mm pada H-3, dan 188,54 mm pada H-10. Daerah rawan longsor di Kabupaten Kulon Progo berada di Kecamatan Samigaluh, Girimulyo, dan Kokap.

Apabila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Hamdi, 2023), Kapanewon Girimulyo memiliki ambang batas curah hujan yang tercatat sebesar 32,08 mm dalam periode tiga hari, sedangkan di seluruh Kulon Progo memiliki ambang batas mencapai 34,26 mm saat kejadian longsor. Meskipun terdapat perbedaan skala, hasil ini tetap dapat dikorelasikan dengan curah hujan aktual. Interpolasi hujan di Kapanewon Girimulyo menunjukkan variasi skor rendah, sedang, dan tinggi, dengan dominasi tingkat kerawanan tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa curah hujan yang melebihi ambang batas berkontribusi terhadap potensi longsor pada titik-titik inventarisasi. Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian terdahulu, yakni Kapanewon Girimulyo tetap memiliki tingkat kerawanan yang tinggi meskipun skala yang digunakan dalam penelitian ini lebih besar.

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pemilihan satelit yang digunakan dalam acuan data untuk ambang batas curah hujan kurang detail namun dapat mencakup wilayah kajian yang lebih luas jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Hamdi, 2023). Penyempurnaan penelitian ini agar dapat dalam merepresentasikan data sebenarnya diperlukan parameter tambahan berupa alat lapangan (Misol) serta kalkulasi data hujan dari satelit lainnya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami ucapkan pada seluruh pihak yang telah membantu dalam terselenggaranya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami berikan secara khusus kepada Stasiun Klimatologi, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Daerah Istimewa Yogyakarta serta Badan Penanggulangan Bencana (BPBD) Daerah Istimewa Yogyakarta. Ucapan terima kasih kami ucapkan pula pada seluruh pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu. Semoga dengan dilakukannya riset ini, dapat berkontribusi untuk ilmu pengetahuan klimatologis terkait serta penanganan bencana di Indonesia.

Daftar Pustaka

- [1] Rahman, A. Z. (2015). Kajian mitigasi bencana tanah longsor di Kabupaten Banjarnegara. *Gema Publica: Jurnal Manajemen dan Kebijakan Publik*, 1(1), 1-14.
- [2] Hidayat, R., & Zahro, A. A. (2018). Identifikasi Curah Hujan Pemicu Longsor di Daerah Aliran Sungai (DAS) Serayu Hulu-Banjarnegara. *Prosiding Seminar Nasional Geografi UMS IX 2018*.
- [3] Agustina, L., Syawreta, A., & Irawan, A. M. (2020). Analisis Ambang Batas Hujan untuk Pengembangan Sistem Peringatan Dini Tanah Longsor: Studi Kasus

- Kecamatan Pejawaran, Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, 11(1), 75-81.
- [4] Frananda, F. (2021). Geologi dan Kestabilan Lereng dalam Pemetaan Zonasi Longsor di Desa Seberang dan Sumur Gedang, Kecamatan Pesisir Bukit, Kota Sungai Penuh, Jambi (*Doctoral dissertation, Teknik Geologi*).
- [5] Badan Penanggulangan Bencana Daerah DIY. (2023). Bencana Tanah Longsor di Yogyakarta Terus Meningkat Setiap Tahun. BPBD DIY. Yogyakarta: Republika. Retrieved November 24, 2023, from <https://news.republika.co.id/berita/rpptdv463/bencana-tanah-longsor-di-yogyakarta-terus-meningkat-setiap-tahun>.
- [6] Ruslanjari, D., Permana, R. S., & Wardhana, F. (2020). Kondisi kerentanan dan ketahanan masyarakat terhadap bencana tanah longsor di Desa Pagerharjo, Kecamatan Samigaluh, Kabupaten Kulonprogo, Yogyakarta. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 26(1), 23-39.
- [7] Priyono, I., & MM, S. S. (2022). *Kumpulan Informasi Terutama Tentang Bencana Tanah Longsor dan Banjir Serta Upaya Mitigasinya*. Unisri Press.
- [8] Tidar, Y. H., Muryani, C., & Ahmad, A. (2022). Strategi Pengembangan Ekowisata Berkelanjutan di Kawasan Objek Wisata Pantai Kebumen Kulon Progo Tahun 2021. *Indonesian Journal of Environment and Disaster*, 1(1), 83-106.
- [9] Kementerian Lingkungan Hidup. (2007). Analisis Potensi Bencana Alam KLH. Kementerian Negara Lingkungan Hidup. Laporan Akhir Geospasial Menlh.
- [10] Muntohar, A.S. (2009). Proposal Ambang Hujan untuk Peringatan Dini Tanah Longsor. *Application Research for Disaster and Humanitarian*. University Club UGM.
- [11] Crow, W. T., van Den Berg, M. J., Huffman, G. J., & Pellarin, T. (2011). Correcting rainfall using satellite-based surface soil moisture retrievals: The Soil Moisture Analysis Rainfall Tool (SMART). *Water Resources Research*, 47(8).
- [12] Pemkab Kulon Progo. (2020). Kondisi Umum Kabupaten Kulon Progo. Daerah Istimewa Yogyakarta: Pemerintah Kabupaten Kulon Progo.
- [13] Sugiyono. (2011). *Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: ALFABETA.
- [14] Hair, J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; and Black, W. C., 1998. *Multivariate Data Analysis, Fifth edition, Prentice Hall International, Inc.*, Upper Saddle River, New Jersey.
- [15] Junaeni, I., Yuliani, D., Ayahbi, R., & Hardjana, T. (2010). Pengelompokan Wilayah Curah Hujan Kalimantan Barat Berbasis Metode Ward dan Fuzzy Clustering. *Jurnal Sains Dirgantara*, 7(2).
- [16] Abdullah, Rehman, U.H., & Mirza, A. M. (2020). Statistical Analysis and Bias Correction of GSMaP Satellite Rainfall Data for Flash Floods Modelling over the Basin of Ravi River, Pakistan. *International Journal on Emerging Technologies*, 11(5), 545-557.
- [17] Saber, M., & Yilmaz, K. K. (2018). Evaluation and bias correction of satellite-based rainfall estimates for modelling flash floods over the Mediterranean region: application to Karpuz River Basin, Turkey. *Water*, 10(5), 657.
- [18] Tesfagiorgis, K., Mahani, S. E., Krakauer, N. Y., & Khanbilvardi, R. (2011). Bias correction of satellite rainfall estimation using a radar-gauge product.
- [19] Kristanti, E., Nopiyantri, A. D., & Tjiptanto, G. (2022). Perbandingan Pengukuran Curah Hujan Ph Obs Standar WMO Terhadap Ph Obs Berbeda Ketinggian dan Modifikasi di Stasiun Klimatologi Kalimantan Selatan. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 2(5), 12-20.
- [20] BMKG. (2023). Probabilistik Curah Hujan 20 mm 24 jam dalam Informasi Cuaca. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- [21] USACE: U.S. Army Corps of Engineers, 1997. *Reliability Analysis of Miter Gates Lock and Dam Z2*, Rock Island District, Rock Island, IL.
- [22] Chleborad, A. F., 2000. Preliminary Method for Anticipating the Occurrence of Precipitation induced Landslide in Seattle, Washington, Science for a changing word (USGS).
- [23] Hidayat, R., & Zahro, A. A. (2020). Penentuan ambang curah hujan untuk memprediksi kejadian longsor. *Jurnal Sumber Daya Air*, 16(1), 1-10.
- [24] NCGIA. (2007). Interpolation: Inverse Distance Weighting. Retrieved November 25, 2023, from <http://www.ncgia.ucsb.edu/pubs/spherekit/inverse.html>
- [25] Canli, E., Loigge, B., & Glade, T. (2018). Spatially distributed rainfall information and its potential for regional landslide early warning systems. *Natural hazards*, 91, 103-127.
- [26] Bolstad, P., (2016). *GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems*. Edisi ke-5. XanEdu. Massachusetts. USA.
- [27] Ma, M., Wu, Y., Chen, L., Li, J., dan Jing, N. 2019. Interactive and Online Buffer-Overlay Analytics of Large-Scale Spatial Data. *International Journal of Geo-Information*. 8(21): 1-14
- [28] Ruslana, Z. N., Tresnawati, R., Rosyidah, R., Harmoko, I. W., & Siswanto, S. (2021). Reliabilitas Prediksi Curah Hujan Dasarian Pada Kejadian Curah Hujan Ekstrem Pemicu Banjir 26 Oktober 2020 di Kebumen: Model Statistik (HyBMG) versus Model Dinamik (ECMWF). *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 4(2), 83-100.
- [29] Wibowo, Y. A. (2010). Evaluasi Curah Hujan GSMAP dan TRMM TMPA dengan Curah Hujan Permukaan Wilayah Jakarta-Bogor.[Skripsi]. *Institut Pertanian Bogor, FMIPA. Bogor*.
- [30] Dasanto, B. D., Boer, R., Pramudya, B., & Suhamoto, Y. (2014). Evaluasi curah hujan TRMM menggunakan pendekatan koreksi bias statistik. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 38(1), 15-24.
- [31] Cheng, Q., Chen, X., Chen, X., Zhang, Z., & Ling, M. (2011). Water infiltration underneath single-ring permeameters and hydraulic conductivity determination. *Journal of Hydrology*, 398(1-2), 135-143.
- [32] Hidayat, R. (2020). Analisis Numerik Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng Di Pangkalan, Sumatera Barat. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 11(1), 25-36.
- [33] Satya, G., Andriawan, A. H., Ridho'i, A., & Seputro, H. (2014). Intensitas curah hujan memicu tanah longsor dangkal di Desa Wonodadi Kulon. *JPM17: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 1(01), 65-71.
- [34] Apriani, A., Putra, B. P., Alfariji, M., Al Habib, J., & Trisnaning, P. T. (2022). Analytic Hierarchy Process pada Evaluasi Kejadian Longsor di Kecamatan Samigaluh Kulon Progo, DI Yogyakarta. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 13(2).
- [35] Suroso, I. (2018). Analisis Pemetaan Daerah Rawan Banjir Dan Longsor Dengan Drone Type Multicopter Di Girimulyo, Kabupaten Kulonprogo. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 5(1), 34-43.
- [36] Adji, T. N., Afifudin, A., Haris, A. N., Indrastuti, A. N., Purwanto, D., Kintoro, F. S., ... & Astabella, R. D. (2022). Kajian Kerentanan Airtanah di Cekungan Airtanah (CAT) Wates Kabupaten Kulon Progo. *Media Komunikasi Geografi*, 23(1), 25-43.
- [37] Prayuda, D. D. (2015). Analisis Karakteristik Intensitas Hujan di Wilayah Lereng Gunung Merapi. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 1(1), 14-19.
- [38] Hamdi, R. R. (2023). *Penentuan Nilai Ambang Batas (Threshold) Curah Hujan Penyebab Longsor di Kapanewon Girimulyo, Kulon Progo* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- [39] Ma'ruf, J. (2017). Model Spasial Deteksi Dini Tanah Longsor dengan Metode Exponential Smoothing Memanfaatkan Google API: Studi Kasus Provinsi Jawa Tengah (Doctoral dissertation, Program Studi Teknik Informatika FTI-UKSW).

ANALISIS DINAMIKA ATMOSFER KEJADIAN ANGIN PUTING BELIUNG TANJUNG BALAI KARIMUN (STUDI KASUS: 14 MEI 2024)

ANALYSIS OF ATMOSPHERIC DYNAMICS OF THE TORNADO EVENT IN TANJUNG BALAI KARIMUN (CASE STUDY: MAY 14, 2024)

Muhamad Sawal*, Dea Andita Siregar, Younggy H.M Hutabarat

Stasiun Meteorologi Kelas IV Raja Haji Abdullah 1, Bandara Raja Haji Abdullah Jl. Mayjen Sutoyo
Karimun

Km.12, Tanjung Balai,

*E-mail: muhamad.sawal@stmkg.ac.id

Naskah masuk:08-06-2024

Naskah diperbaiki: 16-11-2024

Naskah diterima: 29-12-2024

ABSTRAK

Pada tanggal 14 Mei 2024, angin puting beliung melanda Tanjung Balai Karimun, Kepulauan Riau, mengakibatkan kerusakan pada 77 rumah warga. Peristiwa ini berlangsung selama sekitar 10 menit, menyebabkan kerugian material yang signifikan. Untuk memahami fenomena ini, berdasarkan kejadian tersebut penelitian dilakukan guna mengidentifikasi kondisi atmosfer yang memengaruhi kejadian tersebut. Metode penelitian mencakup analisis parameter global seperti Madden Julian Oscillation (MJO), Outgoing Longwave Radiation (OLR), Indeks Nino 3.4 SST, dan Indian Ocean Dipole (IOD). Selain itu, data dari citra satelit Himawari-8 dan reanalisis ERA5 ECMWF digunakan untuk mengevaluasi parameter lokal seperti Convective Available Potential Energy (CAPE), Convective Inhibition (CIN), kelembapan relatif, vortisitas, divergensi, kecepatan vertikal, dan suhu permukaan laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor global memiliki pengaruh terbatas, sementara kondisi lokal seperti konvergensi udara dan aktivitas konveksi yang intens memainkan peran dominan dalam pembentukan awan Cumulonimbus yang menyebabkan angin puting beliung. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung mitigasi risiko bencana serupa di masa depan.

Kata kunci: Cumulonimbus, Himawari-8, ECMWF, ERA 5

ABSTRACT

On May 14, 2024, a tornado struck Tanjung Balai Karimun, Riau Islands, causing damage to 77 houses. The event lasted approximately 10 minutes and resulted in significant material losses. To understand this phenomenon, based on the incident, a study was conducted to identify the atmospheric conditions influencing the event. The research methodology includes analyzing global parameters such as the Madden Julian Oscillation (MJO), Outgoing Longwave Radiation (OLR), Nino 3.4 SST Index, and Indian Ocean Dipole (IOD). Additionally, data from Himawari-8 satellite imagery and ERA5 ECMWF reanalysis were utilized to evaluate local parameters such as Convective Available Potential Energy (CAPE), Convective Inhibition (CIN), relative humidity, vorticity, divergence, vertical velocity, and sea surface temperature. The results indicate that global factors had limited influence, while local conditions such as air convergence and intense convective activity played a dominant role in the formation of Cumulonimbus clouds that caused the tornado. This study is expected to support future disaster risk mitigation efforts.

Keywords: Cumulonimbus, Himawari-8, ECMWF, ERA 5

1. Pendahuluan

Angin puting beliung adalah kolom udara yang berputar dengan kuat dan bersentuhan dengan permukaan bumi serta awan cumulonimbus, atau dalam beberapa kasus jarang bisa pada dasar awan cumulus [1]. Angin puting beliung yang umumnya berputar dengan kecepatan melebihi 60-90 km/jam, berlangsung sekitar 5-10 menit, disebabkan oleh perbedaan tekanan yang signifikan di area kecil di sekitar awan Cumulonimbus (Cb) atau dalam istilah sederhananya angin puting beliung terjadi akibat kombinasi beberapa kondisi atmosfer yang tidak stabil [2].

Mekanisme terjadinya angin puting beliung melibatkan interaksi antara udara panas yang naik dengan udara dingin yang turun. Pertemuan ini menciptakan kondisi tidak stabil yang kemudian berkembang menjadi pusaran udara. Indonesia sering mengalami angin puting beliung karena kondisi geografis dan iklim tropis yang lembap, yang mendorong terbentuknya awan cumulonimbus (Cb). Hal ini terutama terjadi pada musim peralihan antara musim hujan dan kemarau [3].

Melihat kondisi Indonesia yang rawan terjadi angin puting beliung tidak lepas dari rawannya Tanjung Balai Karimun terkena fenomena tersebut. Tanjung Balai Karimun, sebuah ibu kota kabupaten di Kepulauan Riau, memiliki profil geografis yang mendukung terjadinya fenomena ini. Terletak di sepanjang Selat Malaka, wilayah ini sering mengalami cuaca ekstrem akibat interaksi antara udara laut yang lembap dan udara daratan yang panas.

Dalam beberapa tahun terakhir, Tanjung Balai Karimun telah mengalami beberapa kejadian angin puting beliung yang merusak, dengan peristiwa terbaru terjadi pada 14 Mei 2024 pada rentang puku 11.45 – 12.00 WIB. Kejadian ini mengakibatkan kerusakan signifikan pada rumah-rumah warga di daerah Batu Lipai dan Baran Timur, serta menimbulkan dampak sosial yang besar [4-7]. Kejadian angin puting beliung lainnya yang tercatat meliputi insiden pada 10 November 2020 yang merusak 77 rumah [6], serta angin kencang yang menyapu enam rumah pada awal tahun 2023 [7].

Sejarah kejadian angin puting beliung di Tanjung Balai Karimun menunjukkan pola kejadian yang meningkat dalam beberapa dekade terakhir. Peristiwa terbaru menggarisbawahi perlunya analisis mendalam tentang kondisi atmosfer lokal dan global pada saat kejadian. Analisis ini

bertujuan untuk memahami dinamika atmosfer yang menyebabkan terjadinya puting beliung pada tanggal tersebut, dengan fokus pada parameter seperti suhu, kelembapan, dan kecepatan angin [8].

Penelitian ini akan mengacu pada studi sebelumnya yang telah melakukan analisis serupa terhadap kondisi atmosfer saat kejadian angin puting beliung. Seperti, studi oleh Su, Smith, & Villarini menunjukkan hubungan antara parameter atmosfer global dengan kejadian puting beliung [9]. Kajian lain dari Utama et al. [10] dan Saragih [11] juga memberikan gambaran tentang pentingnya analisis data cuaca dan citra satelit dalam memahami dinamika atmosfer pada saat kejadian puting beliung. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diidentifikasi faktor-faktor kunci yang mempengaruhi terjadinya puting beliung di Tanjung Balai Karimun.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola atmosfer pada kejadian angin puting beliung yang terjadi tanggal 14 Mei 2024 di Tanjung Balai Karimun. Untuk memahami kondisi atmosfer yang memicu terjadinya angin puting beliung, penelitian ini akan melakukan kajian atmosfer dengan menggunakan berbagai skala data, mulai dari global hingga lokal. Analisis akan mencakup data *Outgoing Longwave Radiation* (OLR) dan *Madden-Julian Oscillation* (MJO), Indeks Nino 3.4, *Sea Surface Temperature* (SST), dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). Selain itu, pengamatan citra satelit Himawari-8 RGB, analisis skala lokal menggunakan data ERA5 ECMWF akan digunakan untuk menilai parameter udara atas seperti *Convective Available Potential Energy* (CAPE), *Convective Inhibition* (CIN).

Data tambahan yang akan dianalisis meliputi streamline, kelembapan relatif, vortisitas, kelembapan spesifik, divergensi, kecepatan vertikal, evaporasi, dan suhu permukaan laut. Analisis ini akan membantu mengidentifikasi hubungan antara berbagai parameter atmosfer dan kejadian angin puting beliung, sehingga dapat ditemukan strategi yang lebih efektif untuk mengurangi kerusakan dan meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap bencana ini di masa mendatang. Studi ini juga akan memberikan wawasan mengenai dinamika atmosfer lokal yang berkontribusi pada pembentukan angin puting beliung, yang bisa digunakan sebagai acuan dalam merumuskan kebijakan mitigasi bencana yang lebih baik.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah Tanjung Balai Karimun, yang terletak di Provinsi Kepulauan Riau, Indonesia. Wilayah ini terletak pada koordinat antara $0^{\circ}44'34''$ - $0^{\circ}51'36''$ Lintang Utara dan $103^{\circ}21'13''$ - $103^{\circ}27'28''$ Bujur Timur



Gambar 1. Kota Tanjung Balai Karimun
(Sumber : *Google.maps*)

Pemilihan lokasi ini didasarkan pada frekuensi kejadian angin puting beliung yang cukup tinggi dalam beberapa tahun terakhir, sehingga memungkinkan untuk menganalisis dinamika atmosfer yang berperan dalam pembentukan angin puting beliung di daerah tersebut. Data dan metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu.

Data Global Atmosfer Data global atmosfer yang digunakan mencakup.

Madden Julian Oscillation (MJO)

Madden Julian Oscillation Merupakan fenomena iklim tropis utama yang menggambarkan pergerakan gelombang konvektif dari barat ke timur di sekitar ekuator. Ini merupakan osilasi terbesar dalam sistem iklim global yang mempengaruhi sirkulasi atmosfer dan pola curah hujan di wilayah tropis. MJO ditandai dengan pergerakan zona konveksi aktif melintasi Samudra Hindia dan Pasifik dengan siklus 30-60 hari [13].

Outgoing Longwave Radiation (OLR)

Outgoing Longwave Radiation adalah radiasi gelombang panjang yang dipantulkan ke angkasa luar, dimana OLR mengindikasikan tutupan awan yang ada, jika nilai OLR rendah maka dapat diindikasikan banyak terbentuk awan, karena radiasi tersebut terserap oleh awan. Parameter ini mengukur jumlah radiasi

panas yang meninggalkan sistem bumi-atmosfer, yang sangat penting untuk memahami keseimbangan energi dan proses iklim. Nilai OLR berbanding terbalik dengan intensitas awan konvektif - semakin rendah nilainya, semakin tebal lapisan awan [11-12].

Indeks Nino 3.4 SST

Indeks Nino 3.4 adalah ukuran anomali suhu permukaan laut di wilayah sentral Pasifik tropis. Ini merupakan indikator utama untuk menentukan kondisi El Niño dan La Niña. Indeks ini dihitung dengan merata-ratakan anomali suhu permukaan laut [14].

Indian Ocean Dipole (IOD)

Indian Ocean Dipole adalah fenomena iklim yang ditandai dengan perbedaan suhu permukaan laut antara wilayah barat dan timur Samudra Hindia. Hal ini mempengaruhi pola cuaca regional, termasuk kekuatan monsun dan distribusi curah hujan. IOD memiliki tiga fase: positif, negatif, dan netral [16].

Sea Surface Temperature (SST)

SST adalah suhu permukaan laut, dimana variabel Ini adalah variabel penting dalam studi iklim dan pola cuaca, termasuk pembentukan dan intensitas badai, monsun, dan fenomena El Niño/La Niña. Suhu permukaan laut berfungsi sebagai pemasok uap air yang mengakibatkan terbentuknya aktivitas konvektif di atmosfer. [15]

Data – data global tersebut diakses dari <http://www.bom.gov.au/climate/mjo> dan www.noaa.gov untuk periode 14 Mei 2024.

Data ECMWF (ERA5) Data reanalisis dari European Centre for *Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) periode 14 Mei 2024 dengan resolusi $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, dalam format *Network Common Data Form* (netCDF), diunduh dari cds.climate.copernicus.eu. Variabel yang dianalisis meliputi.

Convective Available Potential Energy (CAPE)

CAPE merupakan energi potensial yang tersedia untuk konveksi vertikal di atmosfer. Ini menggambarkan potensi pengembangan awan konvektif dan badai. Nilai CAPE yang tinggi menunjukkan kondisi atmosfer yang tidak stabil dan berpotensi menghasilkan hujan atau badai [15].

Convective Inhibition (CIN)

CIN adalah energi yang menghambat pergerakan vertikal massa udara. Nilai CIN yang tinggi menunjukkan stabilitas atmosfer yang besar dan menghambat pembentukan awan konvektif.

Ketika CIN rendah, massa udara lebih mudah bergerak ke atas [18].

Streamline

Streamline adalah garis semu arah aliran udara di atmosfer. Dalam meteorologi, *streamline* membantu memvisualisasikan pola angin dan sirkulasi atmosfer, memberikan informasi tentang pergerakan massa udara [19].

Relative Humidity (RH)

Kelembaban relatif adalah rasio antara kandungan uap air aktual di udara dengan jumlah maksimum uap air yang dapat ditampung udara pada suhu tertentu. RH mempengaruhi pembentukan awan, presipitasi, dan kondisi cuaca [20].

Vortisitas

Vortisitas adalah rotasi udara di atmosfer. Dalam konteks meteorologi, vortisitas positif atau negatif dapat menunjukkan potensi pembentukan sirkulasi atmosfer seperti siklon atau antisiklon [21].

Specific Humidity (SH)

Kelembaban spesifik adalah rasio massa uap air terhadap total massa udara. Parameter ini mengukur kandungan uap air aktual di udara dan penting dalam memahami transportasi kelembaban atmosfer. Ketika tekanan udara tinggi, maka kelembaban spesifik juga akan tinggi dan begitu pula sebaliknya [22].

Vertical Velocity (VV)

Kecepatan vertikal merupakan nilai pengukuran laju gerakan naik atau turun massa udara. Nilai positif menunjukkan gerakan ke atas (updraft), sementara nilai negatif menunjukkan gerakan ke bawah (downdraft) [24].

Divergence

Divergensi mengacu pada laju penyebaran udara dari suatu titik. Divergensi positif menunjukkan udara menyebar, sementara divergensi negatif (konvergensi) mengindikasikan potensi pembentukan awan [23].

Evaporasi

Evaporasi mengukur jumlah air yang menguap dari permukaan bumi, termasuk dari lautan dan transpirasi tumbuhan. Parameter ini penting dalam siklus air atmosfer [26].

Data – data ERA 5 tersebut kemudian diolah menggunakan software *Grid Analysis and Display System* (GrADS).

Data Satelit Himawari-8 Data satelit Himawari-8 kanal IR, I2, dan WV untuk tanggal 14 Mei 2024, diambil dari basis data BMKG dan diolah menggunakan software SATAID dan GrADS untuk menghasilkan beberapa indikator yaitu.

Citra RGB (Red-Green-Blue Satellite Imagery)

Citra RGB (Red-Green-Blue Satellite Imagery) adalah teknik penafsiran citra satelit yang menggabungkan informasi dari saluran merah, hijau, dan biru untuk menghasilkan gambaran visual yang memungkinkan identifikasi karakteristik awan. Dalam meteorologi, metode ini membantu menganalisis struktur, ketinggian, dan sifat awan dengan memadukan informasi dari berbagai panjang gelombang spektrum elektromagnetik [27].

Time Series (Deret Waktu)

Analisis *time series* suhu puncak awan adalah metode untuk memonitor perubahan suhu puncak awan seiring waktu. Hal ini memungkinkan peneliti untuk melacak perkembangan awan konvektif, menentukan fase pertumbuhan awan (pembentukan, matang, atau melemah), dan mengidentifikasi karakteristik termal awan selama periode waktu tertentu [28].

Contour Awan

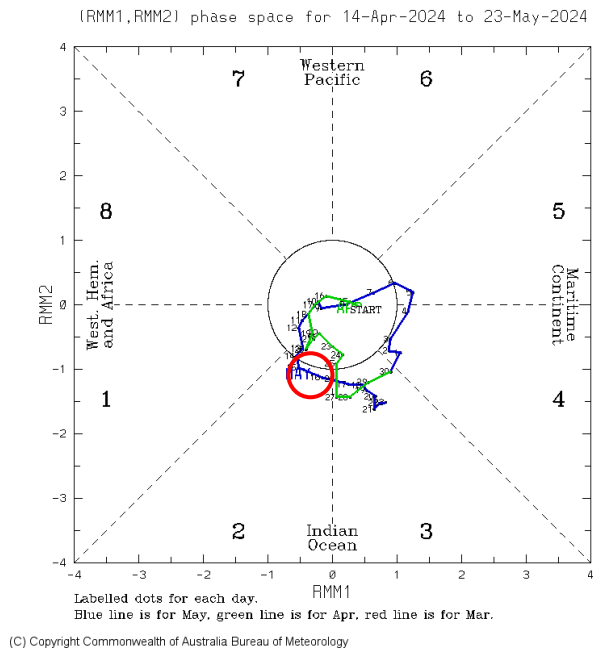
Contour suhu awan adalah representasi grafis yang menunjukkan distribusi suhu pada permukaan atau di sekitar awan. Metode ini menggunakan garis-garis yang menghubungkan titik-titik dengan suhu yang sama, membantu visualisasi struktur termal awan, mengidentifikasi pusat dingin (*cold core*) pada awan konvektif, dan menganalisis perkembangan vertikal awan [29].

Untuk melakukan analisis diatas, data citra satelit di unduh dalam format SATAID (.z), yang diperoleh dari ftp://202.90.199.64, kemudian data ini dianalisis menggunakan software SATAID.

3. Hasil dan Pembahasan

MJO (*Madden Julian Oscillation*)

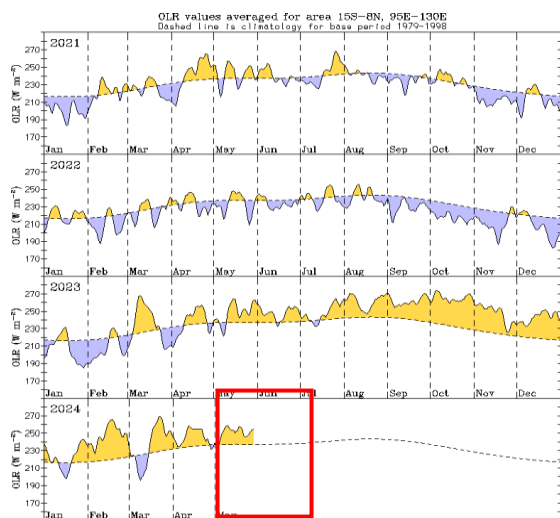
Hasil pemantauan aktivitas MJO dari Gambar 4 ditemukan hasil bahwa tanggal 14 Mei 2024 MJO sedang aktif memberi pengaruh ditandai dengan garis tanggal 14 Mei diluar lingkaran, namun dampak MJO tersebut tidak mempengaruhi daerah kejadian Kota Tanjung Balai Karimun karena diagram diatas menunjukan periode tersebut tidak sedang berada pada fase 5 dan 4 di Benua Maritim Indonesia (BMI).



Gambar 2. Fase MJO 14 April – 23 Mei 2024
(sumber: <http://www.bom.gov.au/>)

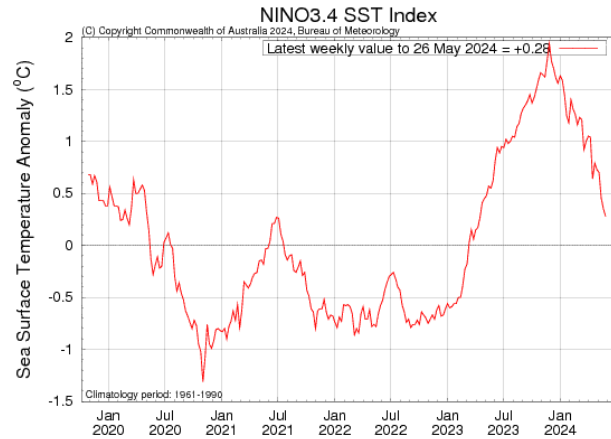
OLR (Outgoing Longwave Radiation)

Nilai OLR ditentukan dengan menghitung radiasi gelombang panjang yang diterima oleh sensor satelit meteorologi. Berdasarkan grafik OLR Gambar 3 diketahui bahwa awal bulan Mei 2024 wilayah Indonesia Barat nilai OLR di bawah normal menunjukkan kondisi yang lebih merujuk pada pembentukan awan konvektif yang kurang intensif dari di area tersebut, hal tersebut ditunjukkan dengan bayangan kuning pada grafik yang artinya angin puting beliung di wilayah Kota Tanjung Balai Karimun pada periode kejadian 14 Mei 2024 tidak dipengaruhi oleh nilai OLR.



Gambar 3. Grafik OLR Indonesia Barat (sumber: <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>)

Indeks Nino 3.4 SST



Gambar 4. Grafik NINO 3.4 Index
(sumber: <http://www.bom.gov.au/>)

Tabel 1. Data index nino 3.4
(sumber: <http://www.bom.gov.au/>)

Periode	Index
13/05/2024	0.35

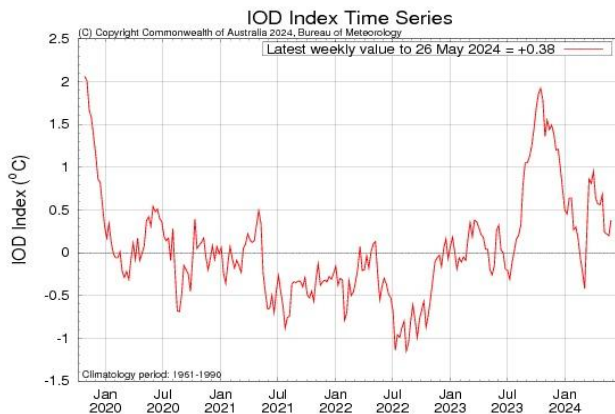
Berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 1 nilai indeks Nino 3.4 pada 14 Mei 2024 didapatkan bahwa nilai index nino 3.4 sebesar 0.35. Hal tersebut menandakan bahwa pada bulan Mei 2024 aktivitas ENSO berada pada fase El Nino yang netral dalam artian angin puting beliung di Kota Tanjung Balai Karimun sangat sedikit dipengaruhi oleh fenomena tersebut.

IOD (Indian Ocean Dipole)

Berdasarkan Gambar 5 dan Tabel 2 nilai indeks IOD 14 Mei 2024 didapatkan bahwa nilai index IOD sebesar 0.20. Hal tersebut menandakan bahwa pada bulan Mei 2024 IOD fase netral yang mengindikasikan bahwa IOD tidak terlalu mempengaruhi aktivitas konveksi di Kota Tanjung Balai Karimun.

Tabel 2. Data index IOD (Indian Ocean Dipole)
(sumber: <http://www.bom.gov.au/>)

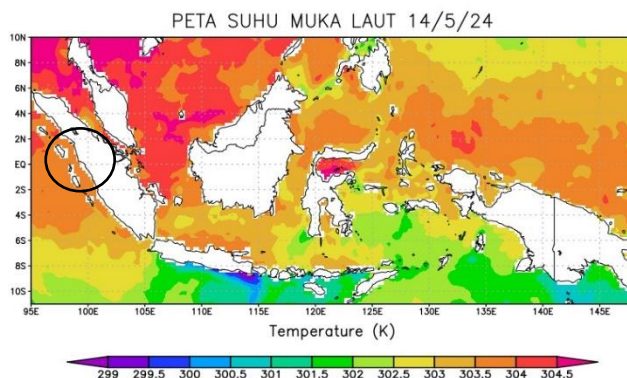
Periode	Index
13/05/2024	0.20



Gambar 5. Grafik IOD (Indian Ocean Dipole)
(sumber: <http://www.bom.gov.au/>)

Sea Surface Temperature (SST)

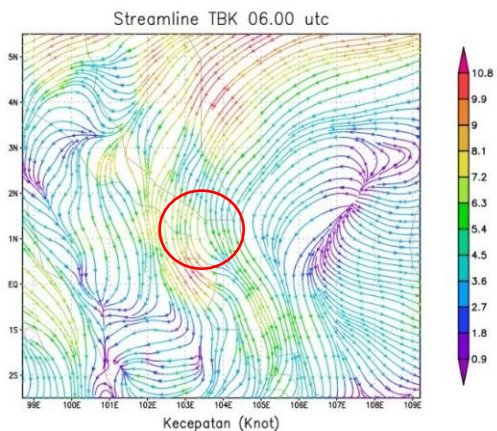
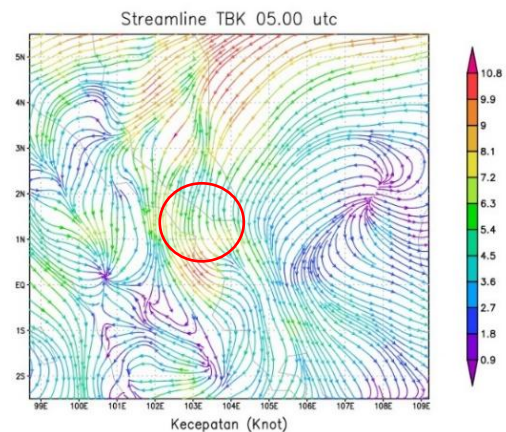
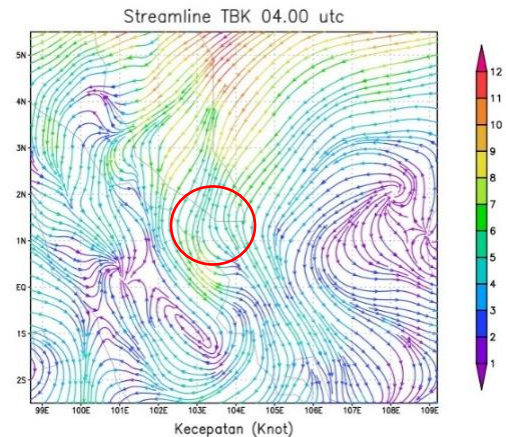
Melihat sebaran suhu permukaan laut sekitar wilayah Sulawesi Gambar 6 diatas wilayah perairan Kota Tanjung Balai Karimun berkisar diantara suhu 303.6 K/30.45 derajat celcius yang cenderung lebih tinggi dari daerah sekitarnya, hal tersebut membentuk aktivitas evaporasi yang kuat hingga mampu menghasilkan awan-awan konvektif yang dapat menyebabkan angin puting beliung pada tanggal 14 Mei 2024.



Gambar 6. Sea Surface Temperature (SST) 14 Mei 2024

Streamline

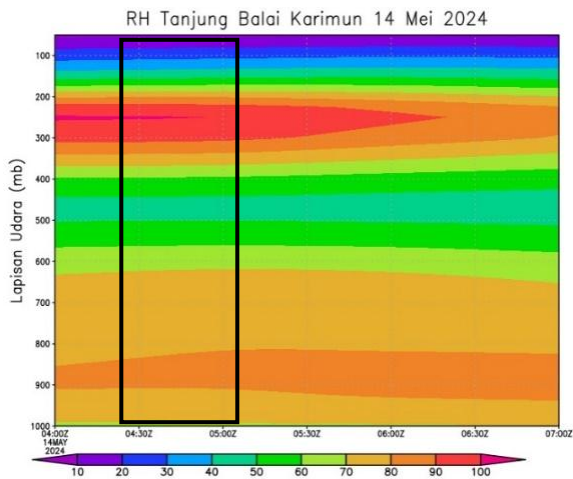
Memperhatikan Gambar 7 dapat diketahui bahwa pada rentang pukul 04.00 utc, 05.00 utc, 06.00 utc keadaan angin 1000 mb Kota Tanjung Balai Karimun cenderung lebih rendah dari daerah sekitarnya dengan rentang 2-4 Knot, hal tersebut mengindikasikan adanya pertemuan angin atau pola konvergensi, kemudian pada rentang kejadian putting beliung pada pukul 04.40 – 05.00 utc terlihat sebuah sharline atau garis geser dari angin artinya kondisi udara menjadi tidak stabil akibat terjadinya pertemuan massa udara yang mendorong pertumbuhan awan-awan penyebab putting beliung, khususnya perawanan konvektif.



Gambar 7. Streamline Kepulauan Riau 14 Mei 2024

Relative Humidity (RH)

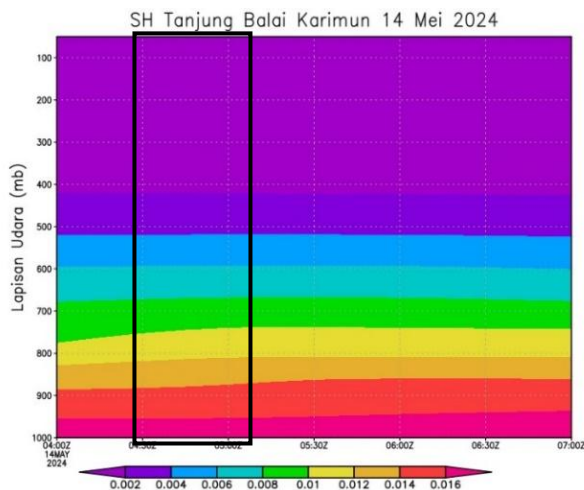
Kondisi *Relative Humidity* pada kejadian terlihat pada kotak hitam Gambar 8, dimana kondisi RH Kota Tanjung Balai Karimun pada pukul rentang 04.00 – 05.30 utc pada saat terjadi angin puting beliung, kondisi RH berkisar 90 - 60% di lapisan 1000 - 500 mb. Kemudian tingkat kelembapan terus meningkat hingga lapisan ke 200 mb dengan nilai RH menyentuh 100%. Keadaan tersebut menandakan bahwa kondisi udara sekitar dalam keadaan basah dan terdapat pertumbuhan awan-awan konvektif yang memicu cuaca buruk



Gambar 8. RH Tanjung Balai Karimun 14 Mei 2024

Specific Humidity (SH)

Pada grafik gambar SH di Gambar 9, pada kejadian angin puting beliung ditemukan bahwa pada lapisan 1000 – 600 mb hingga keatas SH secara berangsur-angsur turun terhadap ketinggian (tekanan rendah) dimana pada lapisan tengah dan atas mulai minim uap air yang disebabkan oleh banyaknya uap air yang mengembun dalam bentuk awan dan jatuh dalam bentuk hujan (presipitasi), dimana hal tersebut memperlihatkan aktivitas konvektif yang kuat mendukung kejadian pada kasus ini.

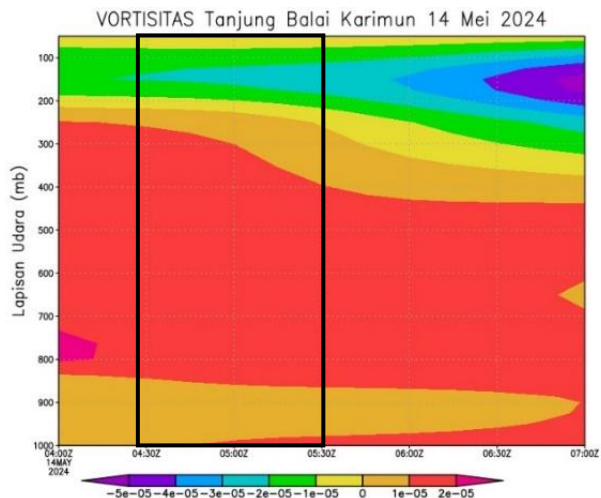


Gambar 9. Kelembaban Spesifik Tanjung Balai Karimun 14 Mei 2024

Vortisitas

Berdasarkan Gambar 10 Pada pukul 04.00 – 05.30 utc di kotak hitam terlihat pada lapisan 950 mb hingga 600 mb nilai vortisitas bernilai negatif pada kejadian angin puting beliung. Nilai yang negatif pada gambar diatas memperlihatkan bahwa adanya indikasi massa udara yang membentuk sebuah sirkulasi siklonik, hal tersebut memicu terjadi pertemuan atau konvergensi di atmosfer wilayah Kota Tanjung

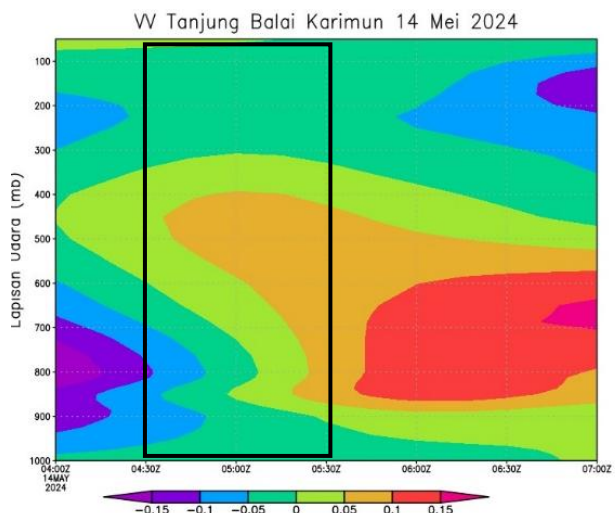
Balai Karimun yang membentuk awan-awan konvektif pembawa angin puting beliung.



Gambar 10. Vortisitas Tanjung Balai Karimun 14 Mei 2024

Vertical Velocity

Berdasarkan hasil olah data ditemukan bahwa kecepatan vertikal 14 Mei 2024 Kota Tanjung Balai Karimun saat kejadian angin puting beliung bernilai negatif pada jam 04.00 – 05.30 utc di lapisan 950 mb hingga 600 mb. Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang jam tersebut terdapat gerakan ke atas (*updraft*) dari massa udara sehingga mulai terbentuk awan-awan konvektif yang memicu terciptanya angin puting beliung.

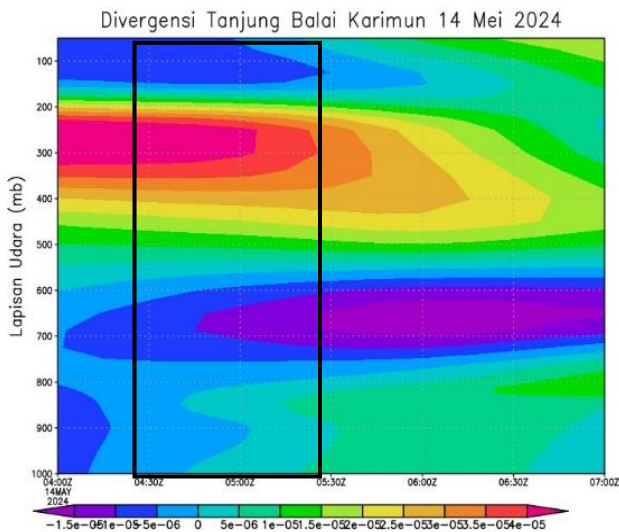


Gambar 11. Vertical Velocity Tanjung Balai Karimun 14 Mei 2024

Divergence

Pada Gambar 11 terlihat hasil dari kondisi *Divergence* sekitar pukul 04.45 – 05.30 saat terjadi angin puting beliung, divergensi di wilayah Tanjung Balai Karimun (kotak berwarna hitam) bernilai negatif sebesar 0 sampai dengan -0.1

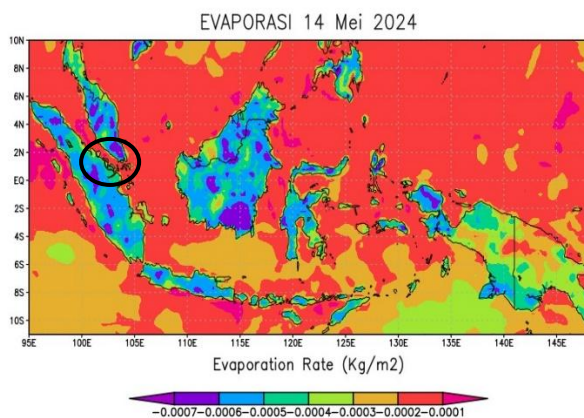
pada lapisan 1000-500 mb. Nilai divergensi yang negatif menandakan kebalikan dari divergensi yaitu konvergensi. Konvergensi menyebabkan potensi pembentukan awan lebih tinggi pada lapisan ini.



Gambar 12. Divergence Tanjung Balai Karimun 14 Mei 2024

Evaporasi

Berdasarkan peta hasil data model kejadian penguapan (evaporasi) pada Gambar 13, di wilayah kejadian Tanjung Balai Karimun, menunjukkan tingkat evaporasinya cukup tinggi berkisar $0.0002 - 0.0001 \text{ m of water equivalent}$. Dimana nilai tersebut mendukung pembentukan awan di atmosfer pada kejadian angin puting beliung di wilayah Tanjung Balai Karimun.

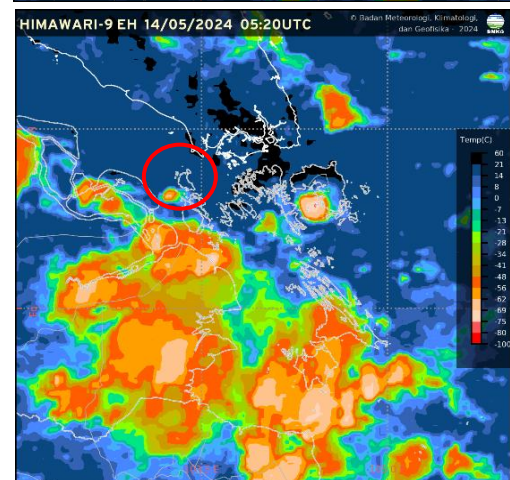
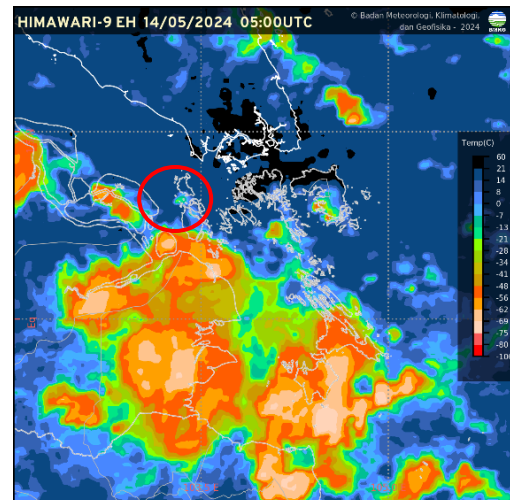
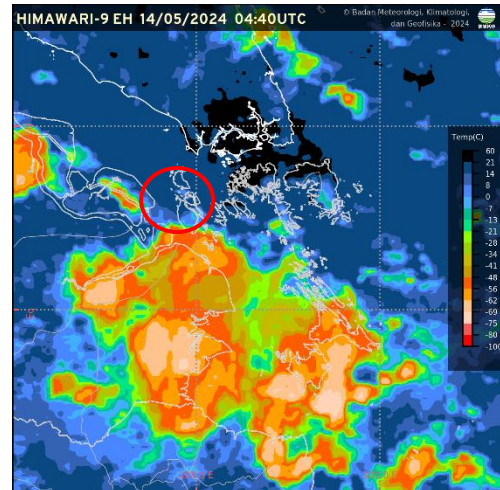


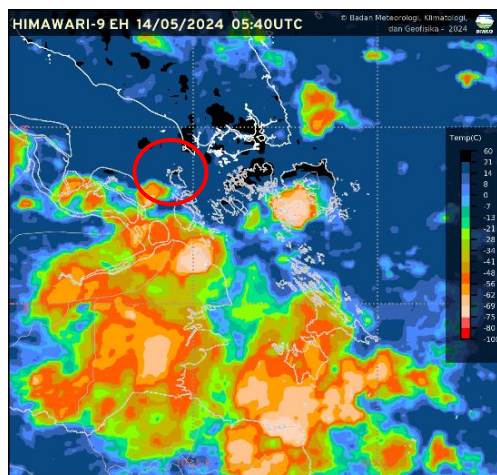
Gambar 13. Evaporasi 14 Mei 2024

Citra RGB Satelit Himawari-8

Gambar 14 di bawah adalah gambar atau citra pertumbuhan awan dari tangkapan Satelit Himawari-8 kanal *infrared*. Hasil menunjukkan bahwa terdapat pertumbuhan awan konvektif yang sangat cepat menuju fase matang, pada jangka waktu 05.00 – 05.40 utc terlihat awan

konvektif di Kota Tanjung Balai karimun pertumbuhan awan terlihat bertahan hidup dengan rentang suhu -62°C sampai dengan -100°C . Hal tersebut membuktikan awan-awan tersebut merupakan awan konvektif yang menyebabkan hujan disertai angin puting beliung pada rentang pukul 04.40 – 05.30 utc utc.

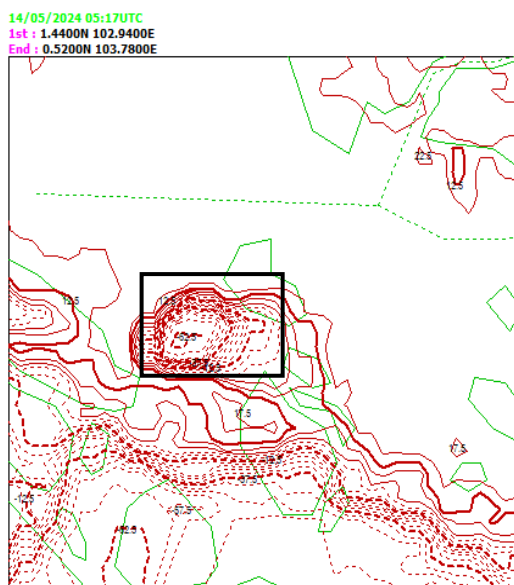




Gambar 14. Citra RGB Himawari-8

Analisis Kontur Suhu Puncak Awan

Peta Kontur puncak awan Cb terlihat luasan bentangan awan Cb, hal ini karena pengaruh shear yang kuat sehingga terjadi perlambatan yang kemudian terjadinya pengangkatan massa udara ke atas sehingga berkembang menjadi awan-awan hujan di wilayah Tanjung Balai Karimun.

Gambar 15. Kontur suhu puncak awan
(Sumber : data diolah)

Di tunjukan dalam kotak hitam adanya awan dengan suhu puncak dari -62.5°C , dimana pada kontur terdapat beberapa sel awan Cb dengan suhu puncak sekitar -37.5°C . di sekitarnya juga terdapat sel awan Cb yang mana sel sel ini dapat bergabung menjadi satu sehingga menjadi awan konvektif yang cukup besar.

Analisis Time Series Suhu Puncak Awan

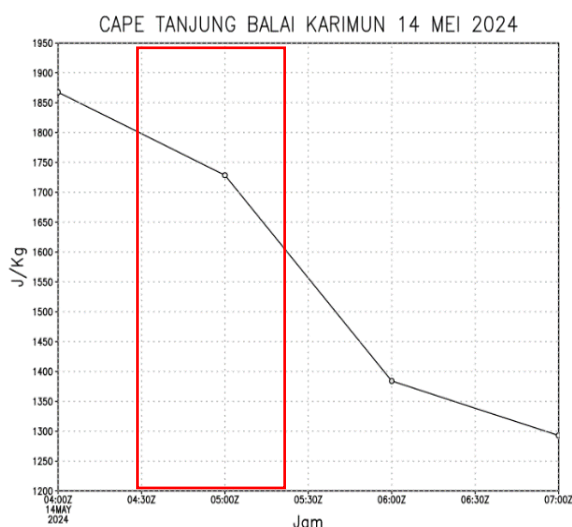
Time series suhu ini memberikan nilai suhu puncak awan untuk mengetahui fase – fase awan baik saat awan mulai terbentuk, matang maupun saat awan mulai meluruh atau fase punah yang menutupi wilayah Kota Tanjung Balai Karimun. Dari data yang didapatkan menunjukkan bahwa suhu puncak awan -62°C menjelang pukul 05.00 utc dimana saat itu terjadi cuaca ekstrem di wilayah Tanjung Balai Karimun.



Gambar 16. Grafik Time Series suhu puncak awan

Analisis Data Model Udara Atas

Pada Gambar 15 pertama grafik CAPE (*Convective Available Potential Energy*) 14 Mei 2024 Kota Tanjung Balai karimun, terlihat pada rentang pukul 04.30 – 05.00 utc di kotak merah mencapai maksimum 1800 J/kg, hal tersebut menunjukkan kondisi badai sedang yang secara kuat menunjukkan aktivitas konvektif awan hujan yang turut menghasilkan angin putting beliung.





Gambar 17. Grafik CAPE dan CIN

Kemudian grafik CIN (*Convective Inhibition*) berbanding terbalik terhadap CAPE dari nilainya dan dimana terlihat bahwa pada jam 04.30 – 05.00 utc nilai CIN cukup rendah dengan rentang nilai 32 - 35 J/Kg, hal tersebut sejalan menggambarkan keadaan atmosfer diatas Kota Tanjung Balai karimun dimana Jika nilai CIN ini terlalu tinggi, maka konveksi lembab yang dalam tidak mungkin terjadi meskipun energi potensial tersedia konvektif atau energi potensial tersedia konvektif besar.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis kejadian angin puting beliong di Tanjung Balai Karimun pada 14 Mei 2022, menunjukkan bahwa faktor global seperti *Madden-Julian Oscillation* (MJO), *Outgoing Longwave Radiation* (OLR), Indeks Nino 3.4, dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kejadian ini. Sebaliknya, kondisi lokal seperti kelembaban relatif pada rentang 60 - 90%, vortisitas dan kecepatan vertikal yang berada pada nilai negatif dimana hal tersebut semakin mendukung aktivitas konveksi pada saat kejadian angina puting beliong. Adapun analisis skala lokal lainnya seperti divergensi yang bernilai negatif, kelembaban spesifik yang berangsur-angsur turun pada tiap lapisan hingga tingkat evaporasi yang mendukung pembentukan awan cumulonimbus dengan cepat pada kasus ini.

Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, hasil ini sejalan dengan temuan oleh Utama et al. [09] dan Saragih [10], yang menekankan

pentingnya analisis citra satelit dan kondisi lokal dalam memahami dinamika atmosfer saat kejadian angin puting beliong. Penelitian ini memperkuat argumen bahwa meskipun kondisi global dapat mempengaruhi cuaca, faktor-faktor lokal seperti kelembaban relatif tinggi, vortisitas negatif, dan divergensi memiliki peran dominan dalam memicu fenomena tersebut. Implikasi dari penelitian ini bahwa pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi antara faktor global dan lokal sangat penting untuk merumuskan strategi mitigasi bencana yang lebih efektif.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, kepada kedua orang tua serta terima kasih kepada penulis 2 dan penulis 3 karena telah memberikan kontribusi dalam mengolah dan menganalisa data, serta tidak lupa ucapan terima kasih kepada kepala stasiun meteorologi kelas IV Raja Haji Abdullah – Karimun berserta jajarannya atas dukungan moral, doa dan motivasinya sehingga penulisan jurnal ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Gobato, R., Mitra, A., & Figueroa Valverde, L. (2022). Tornadoes analysis Concordia, Santa Catarina, Southern Brazil, 2022 season. *Aeronautics and Aerospace Open Access Journal*, 6(4), 184–188. <https://doi.org/10.15406/aoaj.2022.06.00160>.
- [2] Sudibyakto, H. A. (2018). Manajemen bencana di Indonesia ke mana? UGM PRESS. Google Scholar.
- [3] Paul, B. K., & Stimers, M. (2014). Tornado Warning, Preparedness, and Impacts. *Weather, Climate, and Society*, 6(2), 355–368. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00022.1>.
- [4] Menenteramkan Hati Warga Korban Angin Puting Beliong. (2020). Retrieved from <https://www.tzuchi.or.id>.
- [5] Puting Beliong Sapu Enam Rumah di Karimun. (2023). Retrieved from <https://jurnalterkini.id>.
- [6] Walters, J. E., Schmidlin, T. W., & Chaney, P. L. (2020). Staying Safe in a Tornado: A Qualitative Inquiry into Public Knowledge, Access, and Response to Tornado Warnings. *Weather and Forecasting*, 35(1), 12–25. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0127.1>.
- [7] Su, Y., Smith, J. A., & Villarini, G. (2019). Historical Analysis of U.S. Tornado Fatalities (1808–2017): Population, Science, and Technology. *Weather, Climate, and Society*, 11(2), 355–368. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0078.1>.
- [8] Analisis Peristiwa Angin Kencang dengan Citra Satelit Himawari-8 (Studi Kasus: Bangkalan, 17 Oktober 2021). *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*. <https://doi.org/10.15294/jg.v10i2.26927>.
- [9] Utama, I. N. W. W., Palguna, D., Mahubessy, R., Aditya, P., & Winarso, P. A. (2018). Kajian Kondisi Atmosfer Saat Kejadian Puting Beliong di Yogyakarta (Studi Kasus 24 April 2018). *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya)*. Retrieved from <https://jurnal.uns.ac.id>.
- [10] Saragih, R. W. (2020). Analisis Kondisi Atmosfir, Indeks Labilitas, dan Citra Satelit Saat Kejadian Puting Beliong di Pontianak Kalimantan Barat (Studi Kasus 17 Juli 2020). *Jurnal Fisika*. <https://doi.org/10.15294/jf.v10i2.26927>.

- [11] Dewitte, S., & Clerbaux, N. (2018). Decadal changes of Earth's outgoing longwave radiation. *Remote Sensing*, 10(10), 1539. <https://doi.org/10.3390/rs10101539>.
- [12] Tang, C., Liu, D., Tian, X., Zhao, F., & Dai, C. (2023). The variations of outgoing longwave radiation in East Asia and its influencing factors. *Atmosphere*, 14(3), 576. <https://doi.org/10.3390/atmos14030576>.
- [13] Zhang, C. (2005). Madden-Julian Oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(RG2003), 1-36. <https://doi.org/10.1029/2004RG000158>.
- [14] Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771>2.0.CO;2).
- [15] Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes D. C., & Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15(13), 1609-1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609>2.0.CO;2).
- [16] Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., & Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751), 360-363. <https://doi.org/10.1038/43854>.
- [17] Moncrieff, M. W., & Miller, M. J. (1976). The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102(432), 373-394. <https://doi.org/10.1002/qj.49710243208>.
- [18] Doswell, C. A., & Schultz, D. M. (2006). On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 1(3), 1-22. Retrieved from <https://ejssm.org/ojs/index.php/ejssm/article/view/11>.
- [19] Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- [20] Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225-234. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>.
- [21] Holton, J. R. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Elsevier Academic Press.
- [22] Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). *Physics of Climate*. American Institute of Physics.
- [23] Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- [24] Emanuel, K. A. (1994). *Atmospheric Convection*. Oxford University Press.
- [25] Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. D. Reidel Publishing Company.
- [26] Eka Mey Jesiani, Apriansyah Apriansyah, & Riza Adriat. (2019). Model Pendugaan Evaporasi dari Suhu Udara dan Kelembaban Udara Menggunakan Metode Regresi Linier Berganda di Kota Pontianak. *PRISMA FISIKA*, 7(1), 46-46. <https://doi.org/10.26418/pf.v7i1.32515>.
- [27] Diniyati, E., Syofyan, D. Q., & Mulya, A. (2021). Pemanfaatan Satelit Himawari-8 dengan Metode NWP dan RGB untuk Menganalisis Kondisi Atmosfer Saat Banjir di Sidoarjo Tanggal 28 Mei 2020. *JPIG (Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Geografi)*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.21067/jpig.v6i1.5252>.
- [28] Eka Pumama. (2022). Aplikasi Metode Singular Spectrum Analysis (Ssa) Pada Peramalan Curah Hujan Di Provinsi Gorontalo. *Jambura Journal Of Probability And Statistics*, 3(2), 161-170. <https://doi.org/10.34312/Jjps.V3i2.16537>.
- [29] Dadi Fadjar Sidik, Bagus Primohadi Syahputra, Akbar, H., & Aditya Mulya. (2021). Pemanfaatan Citra Satellite Himawari-8 Dalam Kejadian Hujan Lebat Di Kabupaten Cianjur (Studi Kasus Cianjur 11, April 2021). *Prosiding : Konferensi Nasional Matematika Dan Ipa Universitas PGRI Banyuwangi*, 2(1), 275-283. <https://ejournal.unibabwi.ac.id/index.php/knmipa/article/view/1753>.

