

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

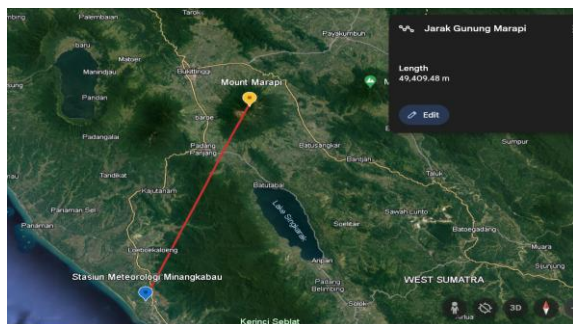
Sumber : [11], [13]

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 $0^{\circ} 22' 48''$ LS dan $100^{\circ} 28' 28''$ 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*.

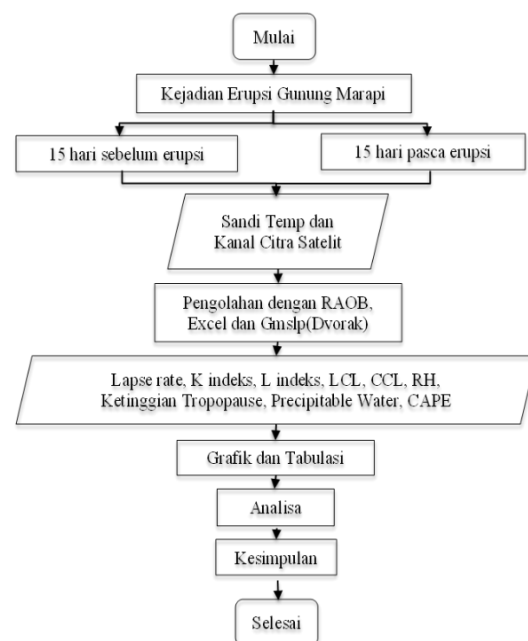


Gambar 1. Lokasi Penelitian
(Sumber Data Diolah dari Website *Google Earth*)

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.

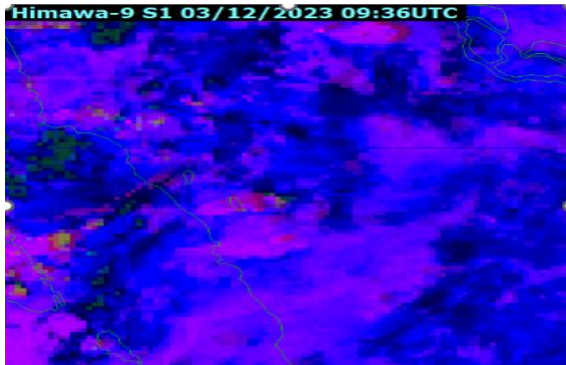


Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

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.

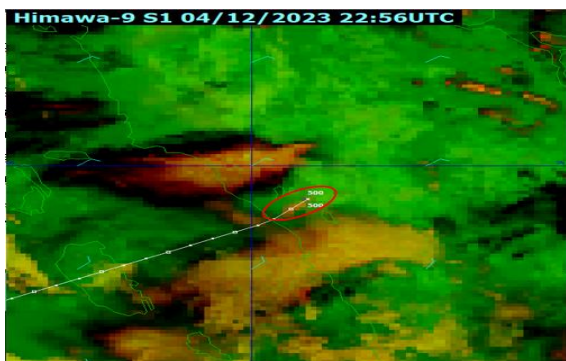
3. Hasil dan Pembahasan

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.

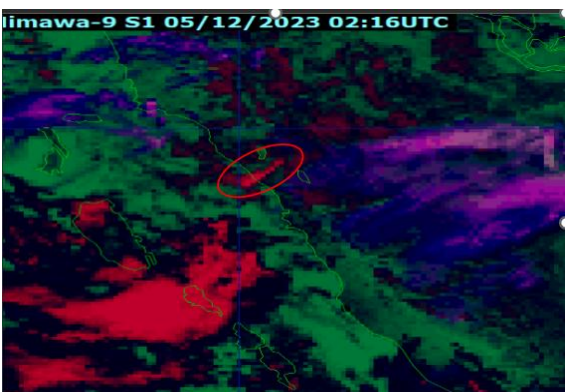


Gambar 3. Citra Satelit Sebaran Abu Vulkanik 3 Desember 2023

Gambar 4. Citra Satelit Sebaran Abu Vulkanik 4



Desember 2023

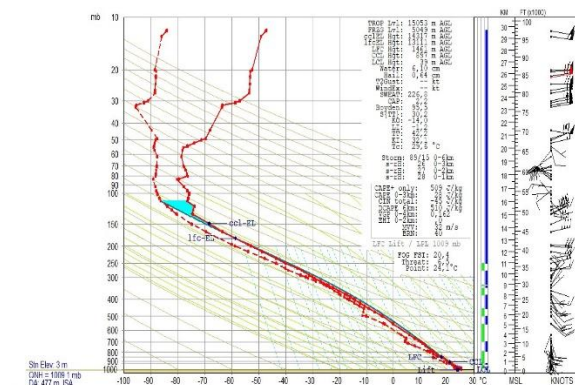


Gambar 5. Citra Satelit Sebaran Abu Vulkanik 5 Desember 2023

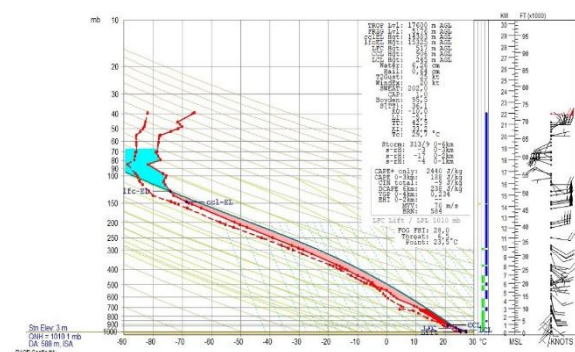
Dari citra RGB diatas, dapat kita amati untuk sebaran erupsi gunung Marapi tidak terlihat di tanggal 3 Desember, dan baru terlihat di tanggal 4 dan 5 Desember (lingkaran merah) yang sebaran abunya mengarah ke Barat Daya yang

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.



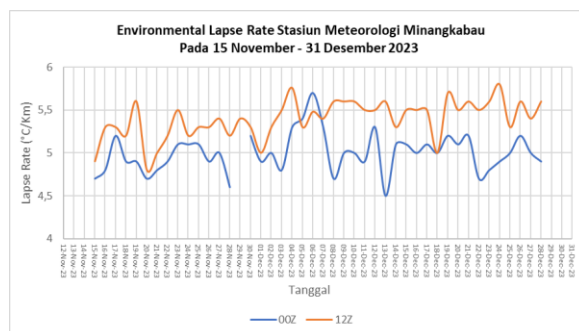
Gambar 6. Hasil pengolahan data radiosonde 3 Desember 2023 pukul 00.00 UTC



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 parcel udara dengan parcel 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.

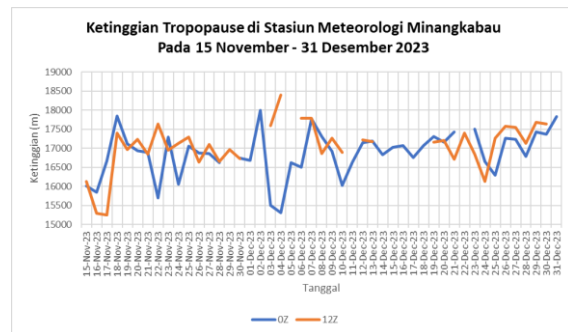
Gambar 7 diatas menunjukkan data stabilitas atmosfer oleh radiosonde pada jam pengamatan 12.00 UTC. Data tersebut menunjukkan bahwa ketinggian CCL-EL berada di 14.383 m pada lapisan sekitar 150 mb, sedangkan titik LFC-EL berada di atasnya yaitu sekitar lapisan 125 mb pada ketinggian 15.325 m. Sementara 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

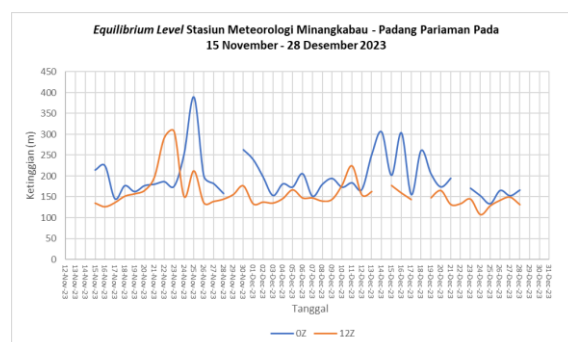
Gambar 8 di atas menunjukkan fluktuasi *environmental lapse rate* hingga ketinggian lapisan 500 mb, yang diukur menggunakan *software* RAOB pada periode penelitian di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman. *Environmental lapse rate*

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

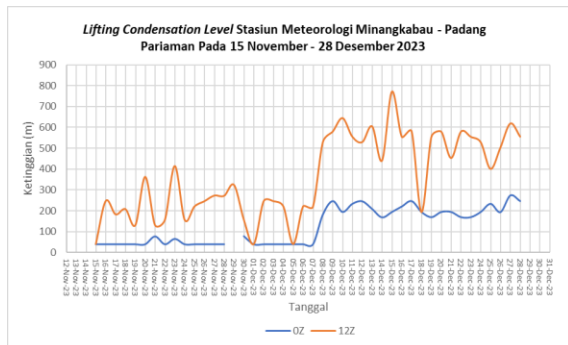
Gambar 9 menunjukkan bahwa ketinggian tropopause secara umum mengalami peningkatan yang konsisten dari tanggal 3 hingga 5 Desember 2023. Pada pukul 00 UTC, ketinggian tropopause pada tanggal 3 Desember adalah 15.503 meter, kemudian meningkat menjadi 15.311 meter pada tanggal 4 Desember 2023, dan menjadi 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

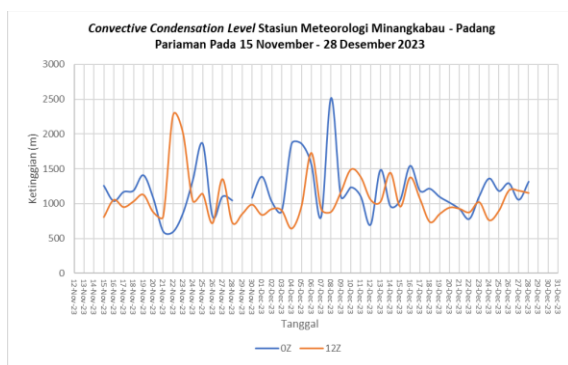
Analisis hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman pada gambar (10) menunjukkan bahwa ketinggian *Equilibrium Level* (EL) pada saat dan setelah terjadinya

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

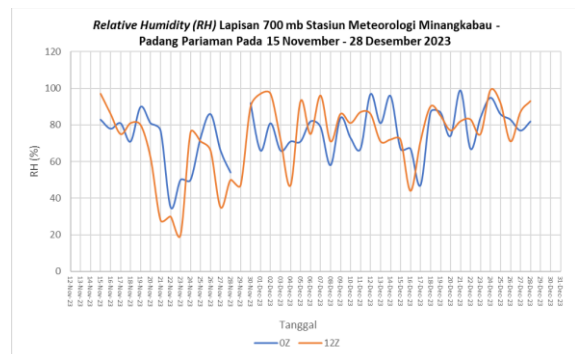
Analisis hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman pada periode letusan Gunung Marapi menunjukkan bahwa ketinggian LCL pada pukul 00 UTC dan 12 UTC secara umum berada dalam keadaan stabil. Pada tanggal 3-5 Desember 2023, ketinggian LCL pada pukul 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

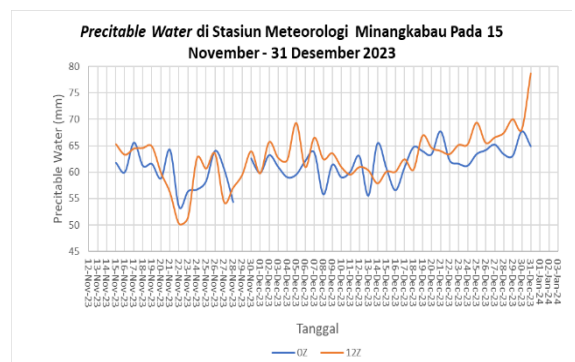
Hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman pada periode letusan Gunung Marapi menunjukkan bahwa ketinggian CCL mengalami fluktuasi yang signifikan. Pada tanggal 3 Desember 2023, ketinggian CCL pada pukul 00 UTC adalah 897 meter, kemudian naik menjadi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

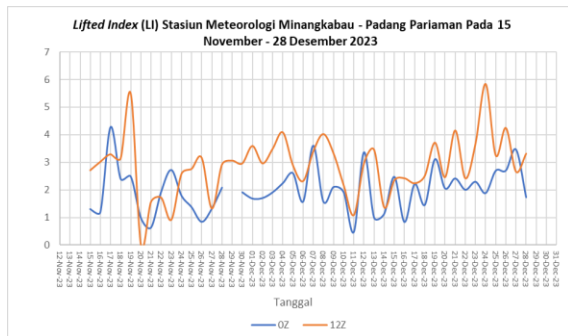
Analisis hasil pengolahan data pengamatan radiosonde di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman menunjukkan bahwa nilai RH vertikal pada lapisan 700 mb pada periode 3-5 Desember 2023 secara umum mengalami peningkatan. Pada tanggal 3 Desember 2023, nilai RH pada pukul 00 UTC adalah 66%, kemudian 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

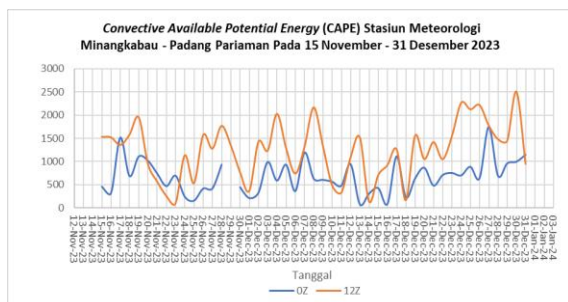
Analisis hasil pengolahan data pengamatan precipitable water di Stasiun Meteorologi Minangkabau – Padang Pariaman menunjukkan bahwa nilai precipitable water pada periode letusan Gunung Marapi secara umum mengalami penurunan. Pada tanggal 3

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. Ruty, "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.