

VOL 14 | NO.2 | NOVEMBER 2023

PENGARUH GELOMBANG ULTRA LOW FREQUENCY (ULF) DALAM PERILAKU CACING TANAH DI SOLO DAN KLATEN
I PUTU PUDJA

ANALISIS KUALITAS UDARA PARAMETER PM2.5 DI WILAYAH KOTA SORONG BERBASIS ISPU
AYU DIAH SYAFAATI, SITI NAJMA NINDYA UTAMI, SUSILO ARIFIN

EVALUASI LUARAN MODEL S2S (SUBSEASONAL TO SEASONAL) ECMWF DALAM MENANGKAP VARIABILITAS HUJAN EKSTREM DI SUMATERA BARAT
CHARISMA IVANA ALMIRA REYHAN, RIZKY ARMEI SYAPUTRA

PENERAPAN IMPUTASI LOCF DAN CROSS MEAN DALAM PENGISIAN DATA KOSONG PADA CURAH HUJAN HARIAN ARG
SITI RISNAYAH, LA ODE HASNUDDIN S. SAGALA

PREDIKSI KEJADIAN PETIR MENGGUNAKAN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METODE PERCEPTRON DENGAN INDEKS RADIOSONDE DI WILAYAH KABUPATEN KEPULAUAN TANIMBAR
INDRA

IDENTIFIKASI KONSENTRASI CO, CO₂, NO₂, SO₂, DAN PM₁₀ YANG TERUKUR DI STASIUN GAW BUKIT KOTOTABANG SELAMA MUDI LEBARAN TAHUN 2019-2023
IMAN AHMADI HARDIYAN, KIAGUS ARDI ZULISTYAWAN

MEGASAINS

VOLUME 14

NOMOR 2

HALAMAN
1 - 47

BKT
NOVEMBER 2023

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





Vol. 14, No.2 – November 2023

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 Faqiq
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
Fajri Zulgino, S.T
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 14 No. 2 tahun 2023 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 14 No.2 tahun 2023 ini.

Sekian, wassalamu'alaikum Wr. Wb

Bukit Kototabang, November 2023

Daftar KTI

PENGARUH GELOMBANG ULTRA LOW FREQUENCY (ULF) DALAM PERILAKU CACING TANAH DI SOLO DAN KLATEN I Putu Pudja	1-5
ANALISIS KUALITAS UDARA PARAMETER PM2.5 DI WILAYAH KOTA SORONG BERBASIS ISPU Ayu Diah Syafaati, Siti Najma Nindya Utami, Susilo Arifin	6-13
EVALUASI LUARAN MODEL S2S (SUBSEASONAL TO SEASONAL) ECMWF DALAM MENANGKAP VARIABILITAS HUJAN EKSTREM DI SUMATERA BARAT Charisma Ivana Almira Reyhan, Rizky Armei Syaputra	14-22
PENERAPAN IMPUTASI LOCF DAN CROSS MEAN DALAM PENGISIAN DATA KOSONG PADA CURAH HUJAN HARIAN ARG Siti Risnayah, La Ode Hasnuddin S. Sagala	23-31
PREDIKSI KEJADIAN PETIR MENGGUNAKAN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METODE PERCEPTRON DENGAN INDEKS RADIOSONDE DI WILAYAH KABUPATEN KEPULAUAN TANIMBAR Indra	32-38
IDENTIFIKASI KONSENTRASI CO, CO ₂ , NO ₂ , SO ₂ , DAN PM ₁₀ YANG TERUKUR DI STASIUN GAW BUKIT KOTOTABANG SELAMA MUDIK LEBARAN TAHUN 2019-2023 Iman Ahmadi Hardiyan, Kiagus Ardi Zulistyawan	39-47

PENGARUH GELOMBANG *ULTRA LOW FREQUENCY* (ULF) DALAM PERILAKU CACING TANAH DI SOLO DAN KLATEN

THE EFFECT OF ULTRA LOW FREQUENCY (ULF) WAVES ON EARTHWORM'S BEHAVIOR IN SOLO AND KLATEN

I Putu Pudja

Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
E-mail: ipt_pudja@yahoo.com

Naskah masuk: 1 Juni 2021 Naskah diperbaiki: 12 Januari 2022 Naskah diterima: 10 Oktober 2023

ABSTRAK

Batuan yang terdeformasi memancarkan gelombang *Ultra Low Frequency* (ULF) dan mempengaruhi medan magnet bumi. Sehingga, ULF memberikan anomali pada sekitarnya. Emisi ULF mempengaruhi perilaku binatang. Perubahan perilaku cacing tanah di Solo dan Klaten pada tanggal 18 April 2020 terjadi secara bersamaan dengan periode *lead time* puncak deformasi yang dihitung dengan anomali ULF pada magnetograf BMKG di Yogyakarta. Lokasi daerah keluarnya cacing tanah ada pada cakupan daerah deformasi sesuai dengan *azimuth* datangnya gangguan pada hasil analisis catatan magnetograf. Penelitian anomali ULF di Indonesia sedang dikembangkan untuk memprediksi gempa, demikian juga fenomena perilaku binatang banyak diteliti untuk prediksi gempa. Kolaborasi penelitian perilaku binatang, khususnya cacing tanah dan penelitian ULF memberikan harapan pengembangan upaya prediksi gempa di Indonesia.

Kata kunci: *Ultra Low Frequency* (ULF), Gelombang Elektromagnetik, Medan Magnet Bumi, Deformasi, Perilaku Binatang, Cacing Tanah, Prediksi Gempa

ABSTRACT

Deformed rocks emit Ultra Low Frequency (ULF) waves and affect the earth's magnetic field. So that ULF gives anomalies to the surroundings. ULF emissions also influence animal behavior. Changes in earthworm behavior in Solo and Klaten on 18 April 2020 coincided with the peak lead time period of deformation calculated by the ULF anomaly on the BMKG magnetograph in Yogyakarta. The location of the discharge area of earthworms is in the deformation coverage area in accordance with the purpose of the interference in the results of the analysis of the magnetograph records. The ULF anomaly in Indonesia is being developed for earthquake prediction, as well as the phenomenon of animal behavior being widely studied for earthquake prediction. Collaboration on animal behavior research, including earthworms and ULF research, provides hope for the development of earthquake predictions in Indonesia.

Keywords: *Ultra Low Frequency (ULF), Electromagnetic Waves, Earth's Magnetic Field, Deformation, Animal Behavior, Earthworms, Earthquake Prediction*

1. Pendahuluan

Media cetak, media elektronik, serta media sosial ramai menginformasikan keluarnya cacing tanah di Solo dan Klaten. Tribun Jateng, Detik, dan Serambinews (Serambinews, 19/04/2020) memberitakan adanya fenomena ribuan cacing tanah (*lumbricina*) keluar di Solo dan Klaten pada 18 April 2020. Fenomena keluarnya ribuan cacing tanah yang dilaporkan Kompas (Kompas,

30/04/2020), terjadi di Bali. Tepatnya di Desa Cau, Marga, Tabanan pada tanggal 29 April 2020. Banyak masyarakat mempertanyakan keterkaitan fenomena ini dengan peristiwa kebumihan seperti gunung meletus, gempa, tanah longsor, dan sebagainya yang memang sering terjadi di Indonesia. Gambar cacing tanah yang keluar ke permukaan tanah di Solo seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Cacing Tanah di Solo
(sumber: detiknews.com, 2020)

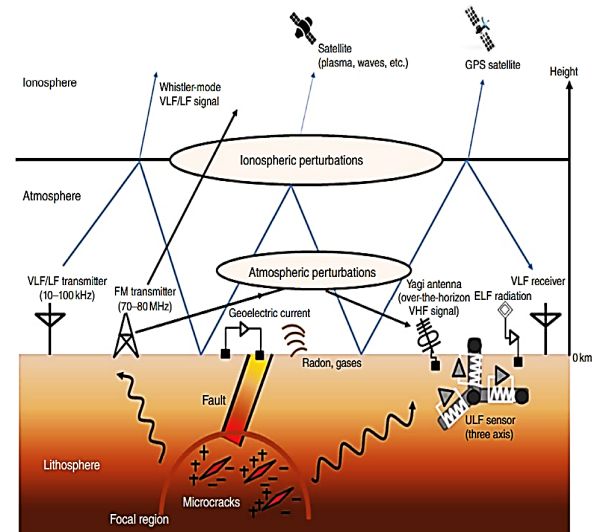
Cacing tanah keluar ke permukaan karena adanya kondisi dalam tanah yang dirasakannya, sehingga mereka merasa tidak nyaman berada di dalam tanah dan menyebabkan mereka keluar ke permukaan. Hasil penelitian pada binatang ini menunjukkan bahwa binatang memang lebih peka dari manusia terhadap emisi gelombang dengan frekuensi rendah, lebih kecil dari 50 Hz (Buskirk RE dkk., 1981).

Gelombang tersebut muncul karena adanya perubahan medan elektromagnetik di emisi batuan dalam bumi pada saat batuan tersebut mengalami tekanan dan terdeformasi. Proses fisis yang menyertai deformasi diantaranya *Ultra Low Frequency* (ULF).

Dalam proses gempa selalu didahului oleh terjadinya penumpukan energi stres yang mengakibatkan deformasi. Selama proses penumpukan stres tersebut terjadi proses fisis dan kimiawi dalam batuan. Batuan yang mengalami stres terdeformasi akan memancarkan gelombang gempa atau gelombang seismik yang mengubah batuan menjadi *carrier* aktif yang disebut *positive hole*. Ini dapat berubah cepat pada batuan sekitarnya seperti aliran baja. Proses ini membangkitkan gelombang elektromagnetik pada frekuensi rendah. Gelombang inilah yang direspon oleh binatang tanah seperti cacing (Freund F dan Stolc, 2013). Pada saat terjadi ledakan, pelepasan energi gelombang ini akan bersifat impulsif. Hanya sebagian kecil gelombang ini terdeteksi di permukaan, yaitu hanya pada *Ultra Low Frequency* (ULF) dan *Extreme Low Frequency* yang mampu sampai ke permukaan bumi.

Dengan sifat gelombang ULF yang mampu direspon cacing tanah dan mampu sampai ke permukaan sehingga terdeteksi alat, maka akan

digunakan untuk mengetahui penyebab keluarnya cacing tanah di Solo dan Klaten, apakah terkait dengan adanya deformasi dari daerah tersebut dengan menggabungkan data magnet bumi yang di monitor BMKG sebagai salah satu data penelitian prekursor gempa.

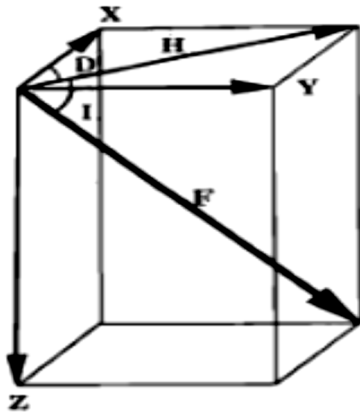


Gambar 2. Pandangan Umum Konseptual dari Fenomena Elektromagnetik dalam Kemungkinan Hubungan dengan Gempa Bumi dan Teknik Frekuensi Radio yang Berbeda Untuk Mengukur Efek Elektromagnetik

2. Metode Penelitian

Data keluarnya cacing tanah diambil dari laporan masyarakat, terutama yang dimuat media massa, seperti berita daring dari Kompas, Tribun, Detik dan laporan Stasiun Geofisika Yogyakarta, yang memonitor di lapangan. Data ULF merupakan data BMKG dari pemantauan di Stasiun Klimatologi Yogyakarta. Antara data keluarnya cacing tanah akan dicocokkan dengan hasil analisis data ULF sebagai data magnet bumi, apakah waktu keluarnya cacing tanah berada dalam periode deformasi yang diindikasikan dari hasil anomali analisis ULF.

Pengamatan magnet (ULF) hampir mirip dengan pengamatan gelombang seismik yaitu dimonitor pada tiga komponen, yaitu komponen Utara-Selatan (NS), komponen Timur-Barat (EW) dan komponen vertikal (Z). Gelombang ULF dibaca amplitudo, pulsa awal dari setiap komponen, serta waktu kejadiannya secara teliti. Ketiga komponen akan memberikan indikasi *azimuth* asal emisi, amplitudo akan menghasilkan *Power Amplitudo*. Komponen X, Y, dan Z tersebut digambarkan secara vektoral seperti pada Gambar 3 di bawah.



Gambar 3. Vektor Komponen Medan Magnet Bumi

Di mana:

X: Medan magnet komponen X, komponen US

Y: Medan magnet komponen Y, komponen EW

Z: Medan magnet komponen Z

H: Resultan medan magnet horizontal (X+Y)

F: Resultan X dan H atau (X+Y+Z)

D: Sudut deklinasi dalam tulisan ini juga sebagai *azimuth*

I: Sudut Inklinasi

Pembacaan alat yang dikonversi kedalam satuan medan magnet menghasilkan *power density*, *azimuth*, serta kedalaman sumber deformasi. Pada penelitian ini digunakan data geomagnetik komponen H dan Z monitoring magnet bumi di Stasiun BMKG di Yogyakarta.

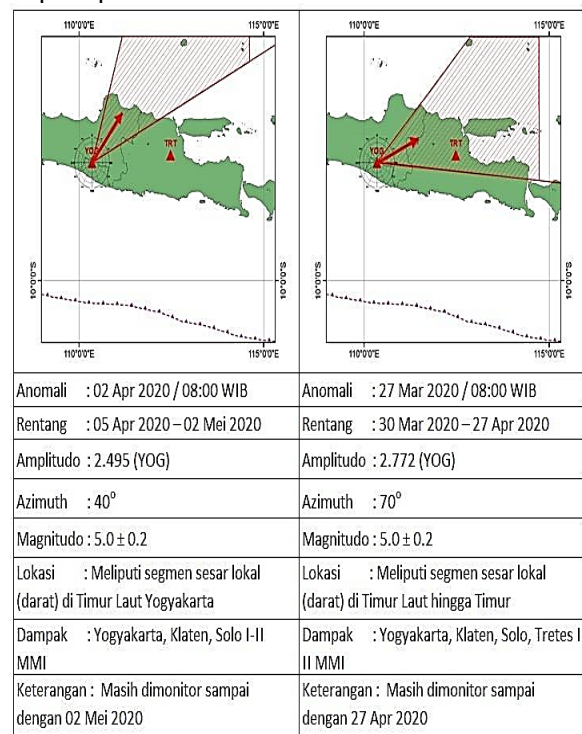
Analisis data dilakukan dengan tahapan algoritma kerja yang standar. (1) Koreksi data dan penghilangan *noise* dengan metode *Diff*; (2) Perhitungan *trend correction* untuk data harian untuk mendapatkan data harian yang lengkap untuk masing-masing komponen; (3) *Filtering* dengan *band pass* ULF; (4) Penentuan polarisasi *Spectral Density Ratio*. Polarisasi ini berguna untuk melihat spektrum anomali komponen H dan Z dari data geomagnetik. Polarisasi dilakukan dengan mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT); (5) Proses mengubah nilai rasio komponen SZ/SH dari domain frekuensi kembali ke domain waktu.

Dengan *Single Station Transfer Function* dipakai untuk melihat arah (*Azimuth*) dari sumber anomali ULF. Keluarannya berupa grafik kuadran dengan acuan titik stasiun pengamatan. Untuk perhitungannya digunakan rumus sederhana sebagai berikut, seperti dijelaskan pada gambar sebelumnya, *Azimuth* daerah terdeformasi sebagai sumber anomali yaitu sama dengan Sudut Deklinasi (D), dan sudut polarisasi sebagai sumber deformasi merujuk

pada sudut Inklinasi (I). Besar wilayah yang terdeformasi tersebut meliputi wilayah $\pm 25^\circ$ dari *azimuth* data (Ahadi, 2014).

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis data ULF medan magnet bumi dari hasil monitoring yang dilakukan BMKG untuk data Stasiun Pengamatan Magnet Bumi di Yogyakarta (ditempatkan di Stasiun Klimatologi Yogyakarta), menunjukkan telah terjadi dua kali anomali ULF yaitu: (1) Tanggal 2 April 2020 pukul 08.00 WIB dengan rentang puncak deformasi diprediksi antara 5 April – 2 Mei 2020. Amplitudo anomali 2,495 dengan *Azimuth* 40° . (2) Tanggal 27 Maret 2020 pukul 08.00 WIB dengan rentang deformasi diprediksi antara 30 Maret – 2 Mei 2020. Amplitudo anomali 2,772 dengan *Azimuth* 70° . Hasil analisis tersebut seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Analisis Magnetograf di Yogyakarta

Dari hasil analisis di atas dapat dilihat bahwa *azimuth* kedua data dengan $\pm 25^\circ$ data pertama menunjukkan daerah terdeformasi pada wilayah $15^\circ - 65^\circ$ dan data kedua $55^\circ - 95^\circ$. Sehingga, ada daerah irisan dari hasil tersebut yang menunjukkan bahwa telah terjadi deformasi pada lapisan kulit bumi dalam rentang waktu 30 Maret – 2 Mei 2020, pada lingkup daerah di antara *azimuth* 15° ($40^\circ - 25^\circ$) hingga 95° dengan daerah beririsan pada wilayah antara $55^\circ - 65^\circ$. *Azimuth* dihitung dari stasiun monitoring.

Daerah Solo dan Klaten dimana terjadi fenomena keluarnya cacing tanah dengan puncak 18 April 2020. Keduanya dapat dikatakan bahwa daerah Solo dan Klaten berada pada lingkup daerah yang deformasi yaitu pada lingkup ($55^{\circ} - 65^{\circ}$) serta waktu kejadian berada pada rentang waktu deformasi yang dihitung dengan *lead time*, 27 Maret sampai dengan 27 Mei 2020. Fenomena deformasi pada lapisan kulit bumi ini dilaporkan salah satunya terjadi di tubuh Gunung Merapi, seperti yang dilaporkan Kepada Badan Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Gunung Api BPPTKG Yogyakarta (Tribun Jogja, 09/07/2020). Proses pengelembungan ini tidak terjadi secara tiba-tiba. Sangat mungkin, jika salah satu penyebab anomali ULF yang terjadi juga saling berkaitan dengan proses deformasi Gunung Merapi.

Berdasarkan hasil analisis ULF terkait dengan keluarnya cacing tanah di Solo dan Klaten dapat dikatakan bahwa telah terjadi deformasi pada kulit dan memancarkan gelombang ULF yang mempengaruhi medan magnet bumi seperti yang tercatat di Yogyakarta. Lingkup daerah deformasi juga melingkupi daerah Solo dan Klaten, sehingga dapat diduga bahwa keluarnya cacing tanah di daerah itu dipengaruhi oleh pancaran gelombang ULF. Gelombang ULF mempengaruhi perilaku binatang (Maryann Mottc, 2015).

4. Kesimpulan

Dari penelusuran data dan hasil analisis anomali ULF dikaitkan dengan keluarnya cacing tanah di Solo dan Klaten, dapat disimpulkan bahwa:

1. Anomali hasil monitoring ULF menunjukkan anomali, yang mengindikasikan ada puncak deformasi di daerah lingkup *azimuth* ($15^{\circ} - 95^{\circ}$) dari Stasiun Monitoring Geomagnet di Yogyakarta pada tanggal 27 Maret – 2 Mei 2020).
2. Keluarnya cacing tanah ada pada rentang puncak deformasi dan pada wilayah lingkup deformasi, maka keluarnya cacing tanah dipengaruhi oleh emisi ULF tersebut.

Mengingat selepas periode tersebut dilaporkan ada pengelembungan tubuh Gunung Merapi sebagai salah satu bentuk deformasi, maka indikasi anomali ULF dapat membantu memberikan indikasi adanya deformasi di Gunung Merapi terkait dengan aktifitas gunung tersebut, disarankan untuk memulai mencari apakah ada hubungan antara anomali ULF magnet bumi dengan aktifitas gunung berapi.

Ucapan Terima Kasih

Terkait dengan penelitian ini, kami mengucapkan terima kasih atas diskusi yang telah dilakukan kepada rekan: Suhaidi Ahadi di BMKG Pusat Jakarta, Agus Riyanto dan Budiarta di Stasiun Geofisika Yogyakarta, terkait dengan masalah magnet bumi dan kegempabumian daerah Yogyakarta. Demikian pula untuk saudari Cyntia yang telah berkenan membaca dan memberikan masukan hasil penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Ahadi, S., Puspito, N.T., Ibrahim, G., & Saroso, S. (2014). Determination of The Onset time in Polarization Power Ratio Z/H for Prekursor of Sumatra Earthquake. *AIP Conference Proceedings*, 1617(1), 75-78.
- [2] Amirullah. (2020). *Viral ribuan cacing tanah di solo dan klaten muncul ke permukaan, ini kemungkinan penyebabnya*. Retrieved from <https://aceh.tribunnews.com/2020/04/19/>.
- [3] Bernardi, A., Fraser-Smith, A.C., & Villard, Jr. (1990). Low frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_s 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophysical Research Letters*, 17(9), 1465-1468.
- [4] Buskirk, R.E., Frohlich, C., & Latham, G.V. (1981). Unusual animal behavior before earthquakes: a review of possible sensory mechanisms. *Reviews of Geophysics*, 19(2), 247-270.
- [5] Detiknews. (2020). *Fenomena munculnya cacing tanah di solo bikin merinding*. Retrieved from <https://news.detik.com/berita-jawa-tengah/d-4982493/fenomena-munculnya-ratusan-cacing-tanah-di-solo-yang-bikin-merinding>.
- [6] Fraser-Smith, A.C. (1978). ULF tree potentials and geomagnetic pulsations. *Nature*, 271(5646), 641-642.
- [7] Friedemann, F., & Stolz, V. (2013). Nature of pre-earthquake phenomena and their effects on living organism. *Animals (Basel)*, 3(2), 513-531.
- [8] Yamauchi, H., Uchiyama, H., Ohtani, N., & Ohta, M. (2014). Animal behavior preceding the 2011 earthquake off the pacific coast of tohoku, japan: a way to predict the approach of large earthquakes. *Animal (Bensel)*, 4(2), 131-145.
- [9] Ibrahim, G., Ahadi, S., & Saroso, S. (2012). Karakteristik sinyal emisi ULF yang berhubungan dengan prekursor gempabumi di Sumatera, studi kasus: gempabumi Padang 2009, Gempabumi Mentawai 2010. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 11(2), 81-89.
- [10] Hayakawa, M. (2015). *Earthquake prediction with radio techniques*. Singapore: John Wiley and Sons.
- [11] Hayakawa, M. (2018). *Earthquake precursor studies in japan*. doi: 10.1002/9781119156949.ch2.
- [12] Hamidi, M., Namigo, E.L., & Ma'muri. (2018). Identifikasi anomali sinyal geomagnetik ultra low frequency sebagai prekursor gempa bumi dengan magnitudo kecil di wilayah Kepulauan Nias. *Jurnal Ilmu Fisika*, 10(1), 53-62.
- [13] Mott, M. (2003). *Can animals sense earthquakes?*. Retrieved from <https://www.nationalgeographic.com/animals/2003/11/animals-sense-earthquakes/>.
- [14] Huda, M.N (2020). *Gunung merapi menggembung, bpptkg yogyakarta: ada dua kemungkinan*. Retrieved from <https://jateng.tribunnews.com/2020/07/09/gunung-merapi-menggembung-bpptkg-yogyakarta-ada-dua-kemungkinan>.

- [15] Kurniati, P. (2020). *Setelah solo, cacing tanah muncul dalam jumlah banyak di Tabanan Bali*. Retrieved from <https://regional.kompas.com/read/2020/04/30/04000011/setelah-solo-cacing-tanah-muncul-dalam-jumlah-banyak-di-tabanan-bali-ini>.
- [16] Republika. (2009). *Sebelum gempa, hewan di taman safari histeris*. Retrieved from <https://nasional.republika.co.id/berita/nasional/nasional/73591/sebelum-gempa-hewan-di-taman-safari-histeris>.
- [17] Rikitake, T. (1989). Geomagnetism and earthquake prediction. *Tectonophysics*, 6(1), 59-68.
- [18] Sanderson, H. (2008). *Did animals can predict china's earthquake, science*. Retrieved from http://www.nbcnews.com/id/24646523/ns/technology_and_science-science/t/did-animals-predict-chinas-earthquake/#.XthAltQzYdU
- [19] Wang, K., Chen Q.F., Sun, S., & Wang, A (2006). Predicting the 1975 Haicheng earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 757-795. doi: 10.1785/0120050191.

ANALISIS KUALITAS UDARA PARAMETER $PM_{2.5}$ DI WILAYAH KOTA SORONG BERBASIS ISPU

ANALYSIS OF AIR QUALITY $PM_{2.5}$ PARAMETER IN SORONG CITY AREA BASED ON ISPU

Ayu Diah Syafaati^{1*}, Siti Najma Nindya Utami², Susilo Arifin³

^{1,2,3}Stasiun Pemantau Atmosfer Global Puncak Vihara Klademak Sorong, Jl. Sungai Remu KM.8 Malanu, Malaingkei, Kota Sorong, Papua Barat Daya
E-mail: ayudiahsyafaati17@gmail.com

Naskah masuk: 11 Agustus 2023

Naskah diperbaiki: 9 Oktober 2023

Naskah diterima: 23 Oktober 2023

ABSTRAK

Kota Sorong merupakan wilayah yang memiliki luas wilayah sebesar 1.105 km² dan menjadi wilayah terpadat penduduknya di Provinsi Papua Barat dan Papua Barat Daya. Seiring meningkatnya jumlah populasi di Kota Sorong, juga meningkatkan aktivitas manusia yang dapat berkontribusi pada meningkatnya konsentrasi $PM_{2.5}$. Sumber partikulat di Kota Sorong berasal dari aktivitas antropogenik seperti proyek pembangunan kota, aktivitas kendaraan bermotor, pembakaran biomassa, serta aktivitas masyarakat di wilayah tersebut. Partikulat $PM_{2.5}$ yang melebihi baku mutu udara ambiennya dapat mengganggu kesehatan manusia. Pengamatan $PM_{2.5}$ dilakukan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Sorong menggunakan instrumen otomatis BAM Met-One 1020. BAM-1020 secara otomatis mengukur dan mencatat tingkat konsentrasi partikel di udara menggunakan prinsip Atenuasi Sinar Beta yaitu pelemahan partikel beta yang mana melalui materi padatan yang terkumpul pada filter fiber. Materi padatan $PM_{2.5}$ yang terkumpul dalam filter fiber dalam satu volume udara ambien yang dihisap oleh pompa. Secara umum selama September 2021 – Juni 2023, konsentrasi $PM_{2.5}$ cenderung mengalami kenaikan. Hasil analisis diperoleh bahwa konsentrasi rata-rata harian $PM_{2.5}$ terukur selama September 2021 – Juni 2023 berada pada range 1,21 – 18,71 ug/m³; masih dibawah nilai ambang batas $PM_{2.5}$ sebesar 55 ug/m³ (24 Jam). Berdasarkan perhitungan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) Parameter $PM_{2.5}$, diketahui nilai ISPU berada pada rentang 0 – 50. Kondisi kualitas udara di wilayah Sorong

selama waktu tersebut berada pada kategori Baik. Pengaruh parameter meteorologi curah hujan dan suhu udara terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$ di Kota Sorong memiliki korelasi paling signifikan dan kuat, dengan nilai $r=0,8$ (suhu Udara) dan $r=-0,7$ (curah hujan).

Kata kunci: $PM_{2.5}$, Baku Mutu Udara, ISPU, Parameter Meteorologi

ABSTRACT

Sorong City has an area of 1.105 km² and is the most densely populated area in the Provinces of West Papua and Southwest Papua. As the population in Sorong City increases, human activities also increase which can contribute to increasing $PM_{2.5}$ particulate concentrations. Sources of particulates in Sorong City come from anthropogenic activities such as city development projects, transportations, biomass burning, and other public activities in the area. $PM_{2.5}$ that exceeds ambient air quality standards can harm human health. $PM_{2.5}$ Observations were carried out at Global Atmosphere Watch Sorong Station using BAM Met-One 1020 automatic instrument. BAM-1020 automatically measures and records the level of particle concentrations in the air using Beta Ray Attenuation principle, namely the attenuation of beta particles through the collected solid matter on fiber filters. $PM_{2.5}$ solid matter collected in the fiber filter in a volume of ambient air that is drawn by the pump. In general, during September 2021 – June 2023, $PM_{2.5}$ concentrations tend to increase. The results of the analysis showed

that the daily average concentration of $PM_{2.5}$ measured during September 2021 – June 2023 was in the range 1.21 – 18.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; still below the $PM_{2.5}$ threshold value of 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 hours). Based on the calculation of the $PM_{2.5}$ parameter Air Pollutant Standard Index (ISPU), it is known that the ISPU value is in the range 0 – 50. Air quality conditions in Sorong area during this time were in the good category. The

influence of meteorological parameters of rainfall and air temperature on $PM_{2.5}$ concentrations in Sorong City has the most significant and strongest correlation, with a value of $r=0.8$ (air temperature) and $r=-0.7$ (rainfall).

Keywords: $PM_{2.5}$, Air Quality Standards, ISPU, Meteorological Parameters

1. Pendahuluan

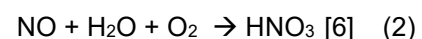
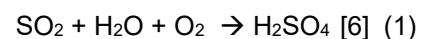
Kualitas udara di suatu wilayah mempengaruhi baik dan buruknya kualitas kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Menurunnya kualitas udara karena pencemaran udara dapat disebabkan oleh faktor alam dan manusia. Faktor alam yang dapat mencemari udara diantaranya adalah debu yang tertiuap angin, asap dari kebakaran semak serta aktivitas vulkanik gunung. Dan faktor manusia yang paling dominan adalah aktivitas transportasi dan perindustrian seiring dengan pertumbuhan penduduk [1]. Menurut Peraturan Pemerintah (PP) No. 41 Tahun 1999 [2], Pencemaran udara diartikan sebagai menurunnya kualitas udara sehingga udara mengalami penurunan mutu dalam penggunaannya dan akhirnya tidak dapat dipergunakan lagi sebagaimana mestinya sesuai dengan fungsinya.

Kota Sorong merupakan Ibu Kota Provinsi Papua Barat Daya, dengan luas wilayah daratan dan perairannya sebesar 1.105 Km^2 . Keadaan topografi Kota Sorong sangat bervariasi. Sebagian besar wilayah Kota Sorong merupakan daerah pegunungan dan perbukitan, sisanya berupa dataran rendah. Kota Sorong merupakan wilayah terpadat di Wilayah Papua Barat, meskipun memiliki luas wilayah terkecil [3]. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Sorong terjadi peningkatan jumlah penduduk mencapai 295.809 jiwa dengan tingkat pertumbuhan sebesar 1,93% (2020-2023). Sementara itu, peningkatan jumlah kendaraan bermotor juga terjadi sebesar 79% sejak tahun 2017 hingga 2022. Melalui pertumbuhan penduduk dan transportasi di wilayah Kota Sorong dapat mempengaruhi kondisi kualitas udara akibat dari emisi kendaraan yang dihasilkan serta meningkatnya aktivitas manusia.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kondisi kualitas udara di Wilayah Kota Sorong menggunakan parameter Partikulat $PM_{2.5}$, dan kategori kualitas udara yang dihitung

berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). *Particulate Matter* (PM) merupakan salah satu komponen berbahaya sebagai penyebab utama tingkat polusi partikulat udara. Karena kemampuannya untuk mengendap jauh di dalam saluran respirasi makhluk hidup, partikel $PM_{2.5}$ adalah jenis yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan yang serius [4]. WHO mencatat bahwa pada tahun 2019, tercatat hanya 10% kurang penduduk di kota-kota yang tidak terpapar konsentrasi partikulat halus melebihi standar kualitas udara. Hal tersebut dapat disebabkan oleh konsentrasi PM yang melayang-layang di udara bebas cukup lama, akibatnya polusi lokal terjadi dan menjadi polusi untuk sekitarnya lalu terhirup oleh penduduk kota.

Partikulat yang teremisikan ke atmosfer membawa senyawa yang bersifat asam seperti belerang (SO_2) dan nitrogen oksida (NO) dan kembali ke permukaan bumi melalui proses deposisi asam. Deposisi asam yang terjadi dalam bentuk aerosol atau partikulat ini disebut dengan deposisi kering [5].



Senyawa belerang (SO_2) dan nitrogen oksida (NO) dibebaskan ke atmosfer melalui pembakaran bahan bakar fosil dimana oksida-oksida tersebut ditransformasikan menjadi asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3) melalui reaksi kompleks dan dihilangkan dari atmosfer ke permukaan bumi melalui proses deposisi kering. Hasil dari deposisi kering tersebut dapat mengakibatkan kerusakan lingkungan yang serius [5].

Particulate Matter 2,5 ($PM_{2.5}$) merupakan partikel halus di udara yang ukurannya 2,5 mikron atau lebih kecil darinya. *Particulate Matter* dengan ukuran kurang 2,5 mikrometer ($PM_{2.5}$) umumnya bersumber dari dari semua jenis pembakaran, termasuk kendaraan

bermotor, pembangkit listrik, pembakaran kayu di perumahan, kebakaran hutan, pembakaran pertanian, dan beberapa proses industri [7]. Pentingnya pengamatan $PM_{2.5}$ karena partikulat ini memiliki dampak kesehatan yang lebih berbahaya bagi manusia.

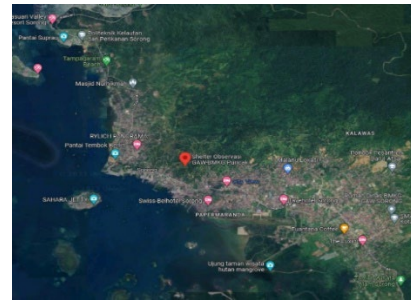
Particulate Matter diklasifikasikan berdasarkan diameter aerodinamik [8]. $PM_{2.5}$ adalah konsentrasi massa dari PM untuk partikel yang melewati inlet atau pipa saringan selektif yang memiliki efisiensi 50% pada diameter aerodinamik sebesar $2,5\ \mu m$ [9,10]. Partikulat $PM_{2.5}$ mempunyai waktu tinggal di atmosfer dalam jangka waktu yang lama dan berpotensi berpenetrasi ke bagian dalam sistem pernafasan manusia. $PM_{2.5}$ berukuran sangat kecil menyebabkan dapat langsung masuk ke dalam alveoli paru-paru dengan permukaannya yang dapat menyerap sejumlah besar bahan beracun dan berbahaya dan memasuki sistem sirkulasi darah sehingga menuju organ-organ lain, akhirnya dapat menyebabkan kerusakan struktur dan fungsi pada sistem pernapasan dan lainnya [11]. Sebaran $PM_{2.5}$ dipengaruhi oleh parameter meteorologis dan aktivitas manusia[12].

Batasan masalah pada penelitian ini adalah pengukuran kualitas udara di Wilayah Kota Sorong menggunakan parameter *Particulate Matter* 2,5 ($PM_{2.5}$) selama periode 2021 – 2023 dan dibandingkan dengan Nilai Ambang Batas Nasional, serta Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Korelasi dengan faktor meteorologi juga dilakukan untuk melihat seberapa besar pengaruhnya terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Shelter Observasi Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Puncak Vihara Klademak Sorong yang berlokasi di Kawasan Hutan Lindung Klademak Kota Sorong dengan titik koordinat -0,88 LS – 131,30 BT dan elevasi 220 mdpl.

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data kualitas udara parameter *Particulate Matter* 2,5 ($PM_{2.5}$) rata-rata harian dan bulanan selama September 2021 – Mei 2023, serta data meteorologi berupa rata-rata bulanan parameter Suhu (T), Tekanan Udara (P), Kelembaban relatif (RH), dan Curah Hujan. Data konsentrasi *Particulate Matter* 2,5 ($PM_{2.5}$) dalam satuan $\mu g/m^3$ diperoleh dari hasil pengamatan menggunakan Instrumen Otomatis BAM MetOne 1020 secara *real-time*



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Shelter Observasi Stasiun Pemantau Atmosfer Global Puncak Vihara Klademak Sorong (Sumber: Google maps)



Gambar 2. Instrumen BAM Met-One 1020 (Kiri) dan Shelter Pengukuran $PM_{2.5}$ (Kanan) (Sumber: Dokumentasi Stasiun)

Prinsip kerja Instrumen BAM MetOne 1020 beroperasi menggunakan metode BAM atau Beta Attenuation Monitor, BAM-1020 secara otomatis mengukur dan mencatat tingkat konsentrasi partikel di udara menggunakan prinsip Atenuasi Sinar Beta yaitu pelemahan partikel beta yang mana melalui materi padatan yang terkumpul pada filter fiber. Materi padatan yang terkumpul dalam filter fiber tidak lain adalah $PM_{2.5}$ dalam satu volume udara ambien yang dihisap oleh pompa [13]. Instrumen otomatis ini merupakan peralatan pengamatan yang sifatnya menetap di Shelter Pengamatan Stasiun Pemantau Atmosfer Global Puncak Vihara Klademak Sorong.

Analisis statistik yang digunakan pada penelitian ini berupa analisis deskriptif dan Koefisien korelasi. Analisis deskriptif digunakan untuk mendeskripsikan atau memberi gambaran terhadap objek yang diteliti melalui data sampel sebagaimana adanya. Alat analisis yang digunakan terdiri dari mean (rata-rata), maksimum, dan minimum [14].

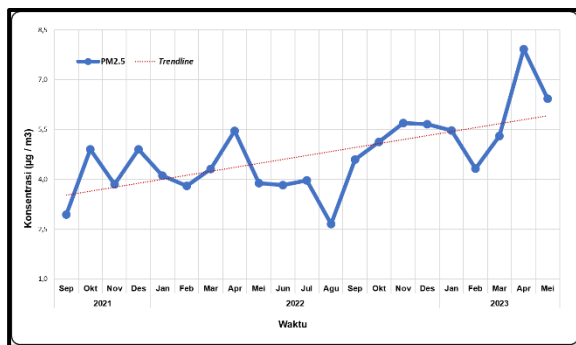
Koefisien korelasi yang digunakan adalah Korelasi Pearson (r), untuk mengetahui kuat tidaknya hubungan faktor meteorologi terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$. Nilai koefisien korelasi berada antara 1 dan -1 ($-1 \leq r \leq 1$). Variabel dikatakan memiliki korelasi yang kuat jika nilai koefisien korelasinya lebih besar dari 0,5 atau

lebih kecil dari -0,5. Jika nilai koefisien korelasinya positif, berarti kenaikan (penurunan) nilai variable bebas umumnya diikuti oleh kenaikan (penurunan) nilai variable tidak bebas, sementara nilai 0 tidak menunjukkan adanya hubungan antara kedua variabel tersebut [15].

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis Konsentrasi PM_{2.5} Selama 2021 – 2023

Gambar 3 memperlihatkan hasil pengamatan konsentrasi PM_{2.5} di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Puncak Vihara Klademak Sorong yang terukur selama periode September 2021 – Mei 2023. Konsentrasi rata-rata bulanan Partikulat PM_{2.5} mengalami fluktuasi dengan kecenderungan mengalami kenaikan yang ditunjukkan oleh garis trendline (garis putus-putus berwarna merah, dengan rentang nilai sebesar 2,66 – 7,92 µg/m³).



Gambar 3. Konsentrasi Rata-rata Bulanan PM_{2.5} di Wilayah Kota Sorong (Sumber: data diolah)

Pengamatan PM_{2.5} pada tahun 2021 dimulai pada bulan September hingga Desember, dengan konsentrasi rata-rata bulanan di tahun tersebut terukur pada rentang nilai 2,94 – 4,90 µg/m³. Konsentrasi rata-rata harian maksimum yang teramati sebesar 9,19 µg/m³, terjadi pada tanggal 23 November 2021. Sementara itu, konsentrasi rata-rata harian minimumnya sebesar 1,63 µg/m³ terjadi pada tanggal 18 Agustus 2023.

Selama tahun 2022 konsentrasi PM_{2.5} mengalami kecenderungan penurunan pada bulan Mei hingga Agustus, dan mengalami kenaikan mulai bulan September 2022 hingga akhir tahun 2022. Konsentrasi rata-rata bulanan PM_{2.5} di tahun 2022 terukur pada rentang 2,66 – 5,70 µg/m³. Di bulan Agustus 2022 terjadi penurunan konsentrasi partikulat, dengan nilai konsentrasi rata-rata bulanan sebesar 2,66 µg/m³, dan konsentrasi partikulat tertinggi tahun

2022 terjadi pada bulan November hingga Desember yaitu sebesar 5,7 dan 5,66 µg/m³.

Berdasarkan pengamatan konsentrasi PM_{2.5} pada tahun 2023 tertinggi terjadi pada bulan April 2023 dengan konsentrasi rata-rata bulanan sebesar 7,92 µg/m³ dan terendah pada bulan Februari 2023 sebesar 4,32 µg/m³. Apabila dilihat pada Gambar 3, grafik naik dan turunnya konsentrasi rata-rata bulanan selama Januari hingga Mei pada tahun 2022 dan 2023 memiliki pola fluktuasi yang sama, meskipun di tahun 2023 nilai partikulat yang dihasilkan lebih besar daripada di tahun 2022. Hal itu dimungkinkan karena seiring bertambahnya jumlah penduduk membuat aktivitas manusia semakin meningkat. Peningkatan jumlah transportasi kendaraan bermotor juga dapat menjadi faktor adanya kenaikan konsentrasi partikulat.

Analisis Baku Mutu Udara dan ISPU (Indeks Standar Pencemar Udara)

Menurut Lampiran VII Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021, baku mutu harian PM_{2.5} sebesar 55 µg/m³. Baku mutu udara ambien adalah ukuran batas atau kadar zat, energi, dan atau komponen yang ada atau yang seharusnya ada atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam udara ambien.

Pada Tabel 1 disajikan secara detail baku mutu udara ambien dari WHO, US-EPA, dan Lampiran VII Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.

Tabel 1. Rata-rata baku mutu PM_{2.5}

1) The WHO air quality guideline		
Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu (µg/m ³)
PM _{2.5}	24 Jam	25
	1 tahun	10
2) National Ambient Air Quality Standards-US EPA		
PM _{2.5}	24 Jam	35
	1 tahun	15
3) Baku Mutu Udara Ambien Nasional (Lampiran VII PP. No. 22 Tahun 2021)		
PM _{2.5}	24 Jam	55
	1 tahun	15

Sumber : (PERMENLH, 2010)

Berdasarkan hasil pengamatan konsentrasi $PM_{2.5}$ di Wilayah Kota Sorong, Konsentrasi $PM_{2.5}$ rata-rata harian (pengukuran 24 jam) selama 2021 – 2023 jika dibandingkan dengan nilai baku mutu nasional (NAB) berada pada kategori baik, artinya nilai yang diperoleh menunjukkan sangat jauh dibawah nilai ambang batasnya, yakni $55 \mu g/m^3$. Sementara itu konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$ selama tahun 2022 yang terukur sebesar $4,42 \mu g/m^3$, juga menunjukkan nilai dibawah ambang batas baku mutunya, yaitu sebesar $15 \mu g/m^3$ (pengukuran 1 tahun).

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) didefinisikan sebagai angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya. Meskipun nilai ISPU lebih tepat digunakan untuk daerah urban, pada prinsipnya nilai ini dapat diterapkan ke semua tipe wilayah [17]. Hasil perhitungan nilai ISPU digunakan untuk melakukan kategorisasi kondisi kualitas udara di suatu tempat.

Pemerintah menentukan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No.14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), terdapat 5 kategori yaitu Baik, Sedang, Tidak Sehat, Sangat Tidak Sehat, dan Berbahaya seperti sebagai berikut.

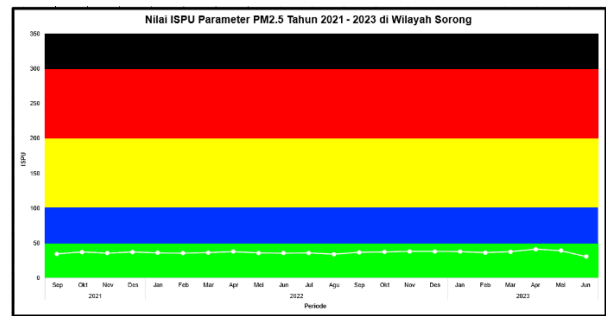
Rentang	Kategori	Penjelasan
1-50	Baik	Tingkat mutu udara yang sangat baik, tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan dan tumbuhan
51-100	Sedang	Tingkat mutu udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan dan tumbuhan.
101-200	Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang bersifat merugikan pada manusia, hewan dan tumbuhan.
201-300	Sangat Tidak Sehat	Tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar.
301+	Berbahaya	Tingkat mutu udara yang dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat.

Gambar 4. Kategori Rentang Nilai ISPU (Sumber: Permen LHK No.14 Tahun 2020)

Konsentrasi yang digunakan dalam perhitungan ISPU adalah $\mu g/m^3$. Data konsentrasi $PM_{2.5}$ yang digunakan dalam perhitungan adalah data rata-rata harian yang kemudian dikonversi menjadi nilai indeks ISPU terhitung, dengan rumus:

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \quad [19] \quad (3)$$

dengan keterangan I: ISPU terhitung, I_a : ISPU batas atas, I_b : ISPU batas bawah, X_a : Ambien batas atas, X_b : Ambien batas bawah, dan X_x : Konsentrasi ambien hasil pengukuran.



Gambar 5. Nilai ISPU Parameter $PM_{2.5}$ di Wilayah Sorong selama September 2021 – Juni 2023 (Sumber: data diolah)

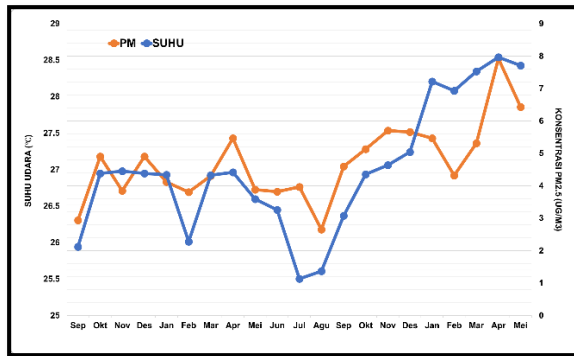
Berdasarkan gambar 6 diatas, hasil perhitungan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) Harian Parameter $PM_{2.5}$ di Wilayah Sorong selama September 2021 – Juni 2023, dihasilkan nilai ISPU berada pada rentang 0 – 50. Pada rentang nilai tersebut berada pada kategori Baik, dengan tingkat mutu udara yang sangat baik dan tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan serta tumbuhan. Sehingga dapat diketahui bahwa Kondisi kualitas Udara di Wilayah Sorong menurut nilai ISPU-nya selama waktu tersebut berada pada kategori Baik.

Analisis Faktor Meteorologi Terhadap Konsentrasi $PM_{2.5}$

Selain aktivitas antropogenik yang berperan sebagai sumber emisi, hasil pengamatan juga dipengaruhi faktor meteorologi yang berperan dalam dispersi polutan. Parameter meteorologi yang digunakan pada penelitian ini diantaranya curah hujan, tekanan udara, kelembaban relatif, dan suhu udara. Koefisien korelasi digunakan untuk melihat pengaruh faktor meteorologis terhadap konsentrasi partikulat.

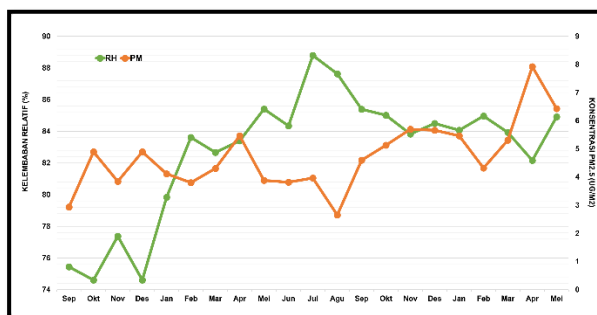
Tabel 2. Korelasi $PM_{2.5}$ dengan Parameter Meteorologi

Parameter	Korelasi
$PM_{2.5} \times \text{Suhu}$	0,8
$PM_{2.5} \times \text{RH}$	-0,4
$PM_{2.5} \times \text{Tekanan}$	0,3
$PM_{2.5} \times \text{Curah Hujan}$	-0,7



Gambar 6. Grafik Hubungan Konsentrasi PM_{2,5} dengan Suhu Udara (Sumber: data diolah)

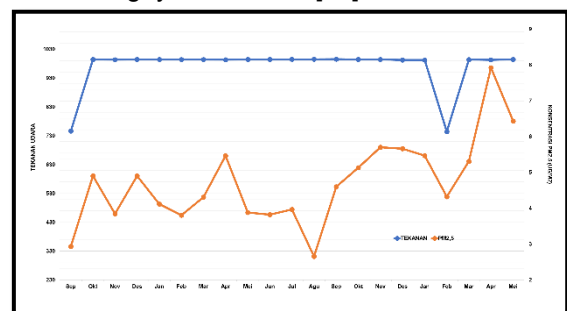
Hubungan Suhu udara rata-rata bulanan dengan konsentrasi PM_{2,5} dilihat dari Gambar 6 diatas. Diketahui bahwa rata-rata suhu udara minimum sebesar 25,5°C terjadi pada bulan Juli 2022. Sedangkan rata-rata suhu udara maksimum terjadi pada bulan April 2023 sebesar 28,5°C. Berdasarkan hasil analisis korelasi dapat disimpulkan bahwa suhu udara mempunyai hubungan yang signifikan, sangat kuat dan searah. Hal ini berarti ketika suhu udara naik maka konsentrasi partikulat juga akan naik. Dari gambar 6 dapat kita ketahui bahwa rata-rata suhu udara maksimum terjadi, keadaan lingkungan akan panas dan kering, sehingga polutan akan mudah terangkat dan melayang di udara. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Duppa (2020) [19], yang menyatakan bahwa pada suhu yang tinggi partikel debu akan lebih ringan, sehingga akan lebih lama berada di udara dalam keadaan turbulen. Sementara pada suhu rendah partikel akan lebih berat dan lebih cepat mengendap sehingga partikel debu yang terhisap oleh alat lebih sedikit.



Gambar 7. Grafik Hubungan Konsentrasi PM_{2,5} dengan Kelembaban Relatif (Sumber: data diolah)

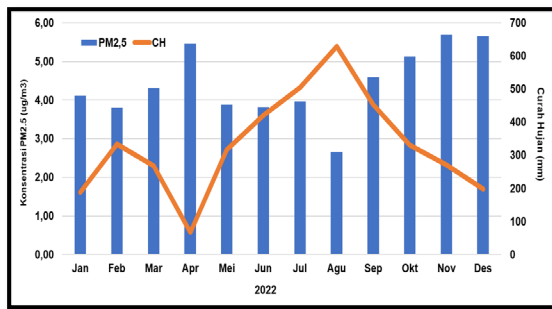
Hubungan kelembaban udara relatif dengan konsentrasi PM_{2,5} rata-rata bulanan dapat dilihat pada gambar 7 di atas. Rata-rata kelembaban udara relatif minimum di wilayah Kota Sorong adalah 74,6% terjadi pada bulan Oktober dan bulan Desember 2021. Sedangkan rata-rata kelembaban udara relatif maksimum sebesar

88,79% pada bulan Juli 2022 diikuti pada bulan Agustus 2022 sebesar 87,63%. Pada periode bulan Juli hingga Agustus 2022 merupakan periode puncak curah hujan tinggi di Wilayah Kota Sorong. Berdasarkan hasil analisis korelasi, diketahui bahwa antara kelembaban udara relatif dengan konsentrasi partikulat PM_{2,5} memiliki hubungan cukup kuat dan berbanding terbalik. Hal ini berarti ketika kelembaban udara relatif turun maka konsentrasi partikulat akan naik. Hal ini disebabkan ketika kelembaban udara relatif rendah, maka keadaan udara akan kering sehingga sumber pencemar atau polutan akan mudah terangkat dan melayang di udara bebas, sehingga lebih mudah terpapar dan akan meningkatkan nilai konsentrasi partikulat. Menurut Misriani (2015) [20], kondisi udara lembab membantu proses pengendapan bahan pencemar dikarenakan partikel debu lebih cepat mengendap pada kelembaban tinggi dibandingkan dengan kelembaban rendah. Selain itu, udara lembab menyebabkan partikel berikatan dengan air yang ada di udara dan membentuk partikel berukuran lebih besar sehingga mudah mengendap ke permukaan bumi oleh gaya tarik bumi [19].



Gambar 8. Grafik Hubungan Konsentrasi PM_{2,5} dengan Tekanan Udara (Sumber: data diolah)

Hubungan tekanan udara dengan konsentrasi PM_{2,5} rata-rata bulanan dapat dilihat pada gambar 8. Rata-rata tekanan udara minimum di wilayah Kota Sorong adalah 744,36 mb, terjadi pada bulan Februari 2023 diikuti pada bulan September 2021 sebesar 746 mb. Berdasarkan hasil analisis korelasi, diketahui bahwa antara tekanan udara dengan konsentrasi PM_{2,5} memiliki hubungan yang lemah. Artinya faktor meteorologis parameter tekanan udara tidak cukup memiliki pengaruh terhadap konsentrasi partikulat di Wilayah Kota Sorong.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Konsentrasi PM_{2.5} dengan Curah Hujan Selama tahun 2022 (Sumber: data diolah)

Analisis korelasi parameter Curah Hujan terhadap konsentrasi partikulat selama tahun 2022 dilakukan (lihat gambar 9). Nilai korelasi yang dihasilkan adalah $r = -0,7$ yang artinya pengaruh curah hujan terhadap besarnya nilai partikulat yang terukur memiliki hubungan yang kuat dengan arah berbanding terbalik. Semakin tinggi curah hujan yang terjadi, konsentrasi partikulat yang terukur semakin menurun. Hal tersebut terjadi karena air hujan mencuci atmosfer yang menyebabkan polutan di atmosfer berkurang karena dibawa oleh air hujan turun ke permukaan bumi [21].

Curah hujan tinggi yang turun ke bumi mengakibatkan tercucinya atmosfer dari senyawa polutan, sehingga konsentrasi partikulat berkurang. Komposisi partikulat di atmosfer terdiri dari beberapa unsur tergantung dari sumber asal dihasilkan. Polutan atau bahan pencemar udara di atmosfer seperti Belerang Dioksida (SO₂) dan Nitrogen Oksida (NO_x) yang dilepaskan dari atmosfer dan terdeposisi kembali melalui *Wet Deposition* dan *Dry Deposition*. *Wet Deposition* terjadi melalui proses turunnya hujan yang turun ke bumi, serta *Dry Deposition* yang terjadi melalui gas dan aerosol (partikulat) [6].

4. Kesimpulan

Pengamatan PM_{2.5} telah dilakukan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global (GAW) Puncak Vihara Klademak Sorong selama periode September 2021 hingga Juni 2023. Berdasarkan hasil pengamatan menunjukkan bahwa konsentrasi rata-rata bulanan PM_{2.5} mengalami fluktuasi dengan kecenderungan mengalami kenaikan selama waktu tersebut, dengan rentang nilai 2,66 – 7,92 µg/m³. Berdasarkan baku mutu udara ambiennya, konsentrasi rata-rata harian PM_{2.5} yang terukur selama September 2021 – Juni 2023 berada pada range 1,21 – 18,71 µg/m³; yaitu masih dibawah baku

mutunya sebesar 55 µg/m³ (waktu pengukuran 24 jam). Kemudian berdasarkan perbandingan antara konsentrasi PM_{2.5} rata-rata tahunannya dengan nilai baku mutu udara ambiennya sebesar 4,43 µg/m³ (2022), yang mana masih dibawah nilai ambang batasnya, sebesar 15 µg/m³ (waktu pengukuran 1 tahun).

Berdasarkan perhitungan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) Parameter PM_{2.5}, diketahui nilai ISPU berada pada rentang 0 – 50, sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi kualitas udara di Wilayah Sorong selama periode September 2021 hingga Juni 2023 berada pada kategori Baik.

Pengaruh parameter meteorologi terhadap konsentrasi PM_{2.5} selama September 2021 – Juni 2023, memiliki korelasi yang signifikan dan kuat untuk parameter curah hujan ($r = -0,7$) dan suhu udara ($r = 0,80$), serta korelasi yang cukup kuat untuk parameter kelembaban relatif ($r = 0,4$) dan korelasi lemah untuk tekanan udara ($r = 0,3$).

Daftar Pustaka

- [1] Agista, P. I., Gusdini, N., & Maharani, M., D., D. (2020). Analisis Kualitas Udara Dengan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dan Sebaran Kadar Polutannya Di Provinsi DKI Jakarta. *Jurnal SEOI*, 2(2), 39-57
- [2] Sekretaris Kabinet Republik Indonesia. (1999). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan dan Perlindungan Lingkungan Hidup*. Retrieved from <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>
- [3] Badan Pusat Statistik. (2023). *Kota Sorong dalam Angka*. Sorong
- [4] Mueller, D., Uibel, S., Braun M., Klinglhoefer, D. Takemura, M., & Groneberg, D. (2011). Tobacco Smoke Particles and Indoor Air. *J Occup Med Toxicol*. 6 (35), 1-5
- [5] Gusnita, D. (2003). Deposisi Asam dan Dampaknya Bagi Lingkungan. *Berita Dirgantara*, 3 (1), 21-30
- [6] Hastutiningrum, S., Sunarsih, S., Imelda. (2018). Analisis Hubungan Aktivitas Kendaraan Bermotor Terhadap Konsentrasi So₂ Dan No₂ Di Udara Ambien (Studi Kasus: Jl. Panembahan Senopati Yogyakarta). *Jurnal Teknologi Technoscientia*. 11(1), 85-94
- [7] Wandayantolis. (2019). *Mengenal Polusi Partikel Particulate Matter Penyebab Menurunnya Kualitas Udara*. Retrieved from <https://www.climate4life.info/2019/08/mengenal-polusi-partikel-particle-matter-pm-penyebab-menurunnya-kualitas-udara.html>
- [8] Council, N. R. (2010). *Global Sources of Local Pollution: An Assessment of Long-range Transport of Key Air Pollutants to and from the United States*. National Academies Press
- [9] ISO. (1995). *International Organization for Standardization (ISO) 7708 Particle size definitions for health related sampling*. Geneva, Switzerland:ISO
- [10] Tiwary, A., & Jeremy, C. (2010). *Air pollution: measurement, modelling and mitigation, third edition*. London. England: Taylor & Francis Group.

- [11] Dong-Qun, X. & Wen-Li, Z. (2004). Monitoring of pollution of air fine particles (PM_{2.5}) and study on their genetic toxicity. *Biomedical Environmental Sciences*. 17, 452-458.
- [12] Virgianto, R. H., & Akbar, D. (2019). Analisis Konsentrasi Pm_{2.5} Selama Penyelenggaraan Asian Games Ke-18 Di Jakarta. *Statmat: Jurnal Statistika Dan Matematika*, 1(1), 10-24
- [13] MetOne Instrument, Inc. (2016). *BAM 1020 Particulate Monitor Operation Manual*. 1600 NW Washington Blvd: Met One Instrument, Inc
- [14] Meiryani. (2021). *Memahami Analisis Statistik Deskriptif Dalam Penelitian Ilmiah*. Retrieved from https://accounting.binus.ac.id/2021/08/10/_trashed-2
- [15] Sudjana. (2005). *Metoda Statistika*. Bandung: Tarsito
- [16] Menteri Negara Lingkungan Hidup. (2010). *Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 tahun 2010 Tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara*. Jakarta
- [17] Kurniawan, A. (2017). Pengukuran Parameter Kualitas Udara (CO, NO₂, SO₂, O₃ dan PM₁₀) di Bukit Kototabang Berbasis ISPU. *Jurnal Tekno Sains*, 7(1), 1-13.
- [18] Sekretaris Kabinet Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.14/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2020 Tentang Indeks Standar Pencemar Udara*
- [19] Duppa, A., Daud, A., & Bahar, B. 2020. Kualitas udara ambien di sekitar industri Semen Bosowa Kabupaten Maros. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Maritim*, 3 (3), 86-92
- [20] Misriani. (2015). *Penilaian Konsentrasi Partikulat Matter (PM₁₀) dan PM_{2.5} Di Sekolah Dasar*. Makasar: Universitas Hasanuddin.
- [21] Kwak, H. Y., Ko, J., Lee, S., & Joh, C. H. (2017). Identifying the correlation between rainfall, traffic flow performance and air pollution concentration in Seoul using a path analysis. *Transportation research procedia*, 25, 3552-3563.
doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.288

EVALUASI LUARAN MODEL S2S (*SUBSEASONAL TO SEASONAL*) ECMWF DALAM MENANGKAP VARIABILITAS HUJAN EKSTREM DI SUMATERA BARAT

EVALUATION OF ECMWF S2S (SEASONAL TO SEASONAL) MODEL OUTPUT IN CAPTURING VARIABILITY OF EXTREME RAINFALL IN WEST SUMATERA

Charisma Ivana Almira Reyhan^{1*}, Rizky Armei Syaputra²

^{1,2}Stasiun Klimatologi Sumatera Barat, Jl. Raya Padang – Bukittinggi KM.51, Padang Pariaman

*E-mail: charisma.reyhan@bmkgo.id

Naskah masuk: 5 September 2023 Naskah diperbaiki: 13 Oktober 2023 Naskah diterima: 9 Desember 2023

ABSTRAK

Kejadian hujan ekstrem memberikan tantangan mengenai pengelolaan sumber daya air, pencegahan banjir, dan kesiapsiagaan bencana. Prediksi hujan yang akurat menjadi salah satu penyumbang untuk mengurangi dampak dari kejadian ekstrem. Beberapa tahun terakhir, prediksi pada skala waktu yang diperpanjang atau *subseasonal to seasonal* (S2S) dikembangkan untuk mengisi celah antara prediksi cuaca jangka pendek dan perkiraan musiman jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk menilai kinerja model S2S dalam memprediksi kejadian curah hujan ekstrem dengan indeks ekstrem R95p, R99p, PRCPTOT, dan Rx1day. Data yang digunakan yaitu data model S2S ECMWF dan data observasi yang diuji pada Stasiun Klimatologi Sumatera Barat dan Stasiun Meteorologi Minangkabau selama periode tahun 2017-2022. Data model S2S ECMWF dikoreksi dengan metode *Distribution Mapping*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai korelasi curah hujan harian terkoreksi di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat berkisar antara 0.16 hingga 0.47 sementara di Stasiun Meteorologi Minangkabau berkisar antara 0.24 hingga 0.41. Nilai korelasi ini mengindikasikan hubungan linear antara data hujan harian yang diprediksi dengan model S2S ECMWF dan data hujan observasi di kedua stasiun. Korelasi data harian di Stasiun Meteorologi Minangkabau menunjukkan bahwa model S2S memiliki kemampuan yang lebih baik dalam memprediksi curah hujan harian dibandingkan Stasiun Klimatologi Sumatera Barat. Data hujan bulanan terkoreksi menunjukkan nilai korelasi

antara 0.05 hingga 0.86 untuk Stasiun Klimatologi Sumatera Barat dan 0.27 hingga 0.62, untuk Stasiun Meteorologi Minangkabau. Nilai korelasi positif menunjukkan ada hubungan yang signifikan antara pola hujan bulanan yang diprediksi oleh model S2S dengan data yang diamati di kedua stasiun. Nilai RMSE pada Stasiun Klimatologi Sumatera Barat lebih kecil, dengan RMSE hujan harian 21.45 hingga 40.06 dan RMSE hujan Bulanan 365.27 hingga 783.22, dibandingkan nilai RMSE pada Stasiun Meteorologi Minangkabau, RMSE hujan harian 26.00 hingga 44.01 dan RMSE hujan bulanan 374.07 hingga 786.48. Indeks ekstrem yang dihitung menunjukkan nilai underestimate untuk indeks R95p, R99p, dan nilai yang overestimate untuk indeks PRCPTOT, dan Rx1day.

Kata kunci: Hujan Ekstrem, Subseasonal To Seasonal (S2S), Prediksi Iklim, Sumatera Barat

ABSTRACT

Extreme rain events pose challenges regarding disaster preparedness. Accurate rain prediction is one of the contributions to reducing the impact of extreme events. Predictions on subseasonal to seasonal (S2S) have been developed to fill the gap between short-term weather predictions and long-term seasonal forecasts. This study aims to assess the performance of the S2S model in predicting extreme rainfall events with extreme indices R95p, R99p, PRCPTOT, and Rx1day. The data used are the S2S ECMWF data and observational data that were tested at the Stasiun Klimatologi Sumatera Barat and

Stasiun Meteorologi Minangkabau during 2017-2022 period. Bias correction of S2S ECMWF data is corrected using the Distribution Mapping method. The research results show that the corrected daily rainfall correlation value at Stasiun Klimatologi Sumatera Barat ranges from 0.16 to 0.47 while at Stasiun Meteorologi Minangkabau it ranges from 0.24 to 0.41. This correlation value indicates a linear relationship between daily rainfall data predicted by the ECMWF S2S model and observed rainfall data at both stations. Daily data correlation at Stasiun Meteorologi Minangkabau shows that the S2S model has better ability in predicting daily rainfall compared to Stasiun Klimatologi Sumatera Barat. Corrected monthly rainfall data shows correlation values between 0.05 to 0.86 for Stasiun Klimatologi Sumatera Barat and 0.27 to 0.62 for Stasiun Meteorologi Minangkabau. Positive correlation values indicate there is a significant relationship between the monthly rainfall patterns predicted by the S2S model and the data observed at both stations. The RMSE value at Stasiun Klimatologi Sumatera Barat is smaller, with daily rainfall RMSE 21.45 to 40.06 and monthly rainfall RMSE 365.27 to 783.22, compared to the RMSE value at Stasiun Meteorologi Minangkabau, daily rainfall RMSE 26.00 to 44.01 and monthly rainfall RMSE 374.07 to 786.48. The calculated extreme indices show underestimated values for the R95p, R99p indices, and overestimated values for the PRCPTOT and Rx1day indices.

Keywords: Extreme Rainfall, Subseasonal To Seasonal (S2S), Climate Prediction, West Sumatera

1. Pendahuluan

Hujan ekstrem merupakan salah satu penyebab terjadinya bencana hidrometeorologi seperti banjir dan longsor. Kejadian hujan ekstrem memberikan tantangan mengenai pengelolaan sumber daya air, pencegahan banjir, dan kesiapsiagaan bencana. Sumatera Barat Padang memiliki pola hujan ekuatorial, dengan dua puncak hujan setiap tahun dimana beberapa kondisi tersebut dapat menyebabkan hujan ekstrem [1]. Prediksi hujan yang akurat menjadi salah satu penyumbang untuk mengurangi dampak dari kejadian ekstrem serta berguna untuk memastikan strategi respon yang efektif. Beberapa tahun terakhir, prediksi pada skala waktu yang diperpanjang atau *subseasonal to seasonal* (S2S) dikembangkan untuk mengisi celah antara prediksi cuaca jangka pendek dan perkiraan

musiman jangka panjang. Nilai prediksi S2S yang relevan dengan nilai observasi, serta peluang dan tantangan pada penerapannya menghadirkan peluang baru yang signifikan yang dapat dieksplorasi untuk kemampuan banyak sektor sebagai peluang untuk merencanakan secara sistematis strategi respon yang dihadapi [2].

Prakiraan S2S berpotensi memperluas cakupan prakiraan banjir dan meningkatkan keterampilan pemodelan prediksi hidrologi. Meskipun prakiraan S2S tidak seakurat prakiraan jangka pendek, peringatan dini terhadap kondisi yang dapat mengakibatkan banjir besar atau sering terjadi dalam 2–4 minggu ke depan (atau lebih) dapat memungkinkan layanan darurat untuk merencanakan dan bersiap menghadapi dampak banjir dengan lebih baik [3]. Skala waktu submusim-ke-musim (S2S) ini relevan dengan keberhasilan perencanaan dan persiapan di berbagai sektor, termasuk kesehatan masyarakat, kesiapsiagaan bencana, pengelolaan air, energi, dan pertanian. Menjembatani “kesenjangan” prediksi antara prakiraan cuaca dan iklim, prediksi S2S adalah bidang penelitian aktif yang bertujuan untuk mengatasi tingginya permintaan masyarakat akan prakiraan yang terampil dalam skala waktu ini (Lang, Pegion, & Barnes, 2020).

Keterampilan prediksi S2S tidak hanya bergantung pada kondisi inisialisasi dan SST, tetapi juga mode sirkulasi berskala besar dalam sistem iklim, seperti *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO), *Madden Julian Oscillation* (MJO), *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan Osilasi Atlantik Utara, serta pengaruhnya terhadap fenomena cuaca tertentu termasuk peristiwa ekstrem. Prakiraan S2S memiliki potensi untuk memprediksi permulaan, evolusi, dan pelemahan beberapa peristiwa ekstrem berskala besar beberapa minggu ke depan seperti prediksi suhu ekstrem serta prediksi hujan ekstrem yang berkaitan dengan siklon tropis, ENSO dan MJO (de Andrade, Coelho, & Cavalcanti, 2019; Vitart & Robertson, 2018; Vivi, Hidayat, Faqih, & Alfahmi, 2021).

Prakiraan S2S tentang kejadian ekstrem dapat diintegrasikan antara prakiraan musiman dan rentang menengah, dengan memberikan peringatan dini tentang peristiwa ekstrem beberapa minggu sebelumnya. Prediktabilitas S2S ditemukan secara sistematis lebih rendah

di daratan dibandingkan lautan, biasanya mencapai hujan dan menurun pada puncak musim hujan. Di sebagian besar wilayah Asia Selatan dan Tenggara, skala spasial sangat termodulasi oleh osilasi intramusiman, sehingga meningkatkan prediktabilitas curah hujan S2S, sementara hal ini diimbangi oleh intensitas curah hujan rata-rata harian yang besar sehingga meningkatkan *noise*. Akibatnya, keterampilan curah hujan S2S di sini secara umum masih rendah (Moron & Robertson, 2021a). Prakiraan S2S juga dapat digunakan untuk menyelidiki penyebab beberapa peristiwa ekstrem yang berkaitan dengan variabilitas hujan. Prediksi S2S mewakili peluang yang signifikan untuk menghasilkan aplikasi prakiraan yang berguna, dapat digunakan, dan dapat ditindaklanjuti untuk dan bersama pengguna yang akan semakin membuka potensi skala waktu perkiraan ini (Christopher J. White et al., 2022).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menilai kinerja model S2S dalam memprediksi kejadian curah hujan ekstrem yang dijelaskan melalui indeks curah hujan ekstrem R95p, R99p, PRCPTOT, dan Rx1day. Kami memeriksa kemampuan data model S2S dalam menangkap kejadian hujan ekstrem selama periode tahun 2017-2022. Data model yang digunakan yaitu curah hujan Subseasonal to Seasonal (S2S) dari model ECMWF yang dikoreksi dengan metode Distribution Mapping. Untuk mencapai hal ini, kami menggunakan data curah hujan observasi selama tahun 1991-2020 dari Stasiun Klimatologi Sumatera Barat dan Stasiun Meteorologi untuk mencari nilai ambang batas persentil 95 dan persentil 99. Indeks PRCPTOT menjelaskan jumlah curah hujan tahunan selama periode 2017-2022. Indeks Rx1day menjelaskan tentang jumlah curah hujan harian maksimum selama satu tahun selama periode 2017-2022. Selanjutnya, dilakukan perhitungan verifikasi dan validasi untuk mengetahui hubungan dan tingkat keakuratan model prediksi terhadap data observasi.

2. Metode Penelitian Data

Data model S2S ECWMF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) yang digunakan mulai dari tahun 2017-2022. Data hujan harian ECMWF terdiri dari 51 member yang kemudian dihitung nilai ensemble model. Data curah hujan harian didapatkan dari 2 lokasi pengamatan yaitu Stasiun Meteorologi Minangkabau dan Stasiun Klimatologi Sumatera Barat. Data hujan harian tahun 2017-2022 digunakan untuk mengevaluasi luaran data model, sedangkan data hujan harian tahun 1991-2020 digunakan untuk menentukan nilai ambang batas persentil 95 dan 99.

Koreksi Bias *Distribution Mapping*

Pertama, data luaran model S2S dikoreksi menggunakan metode *Distribution Mapping* (Piani, Haerter, & Coppola, 2010). Metode *distribution mapping* mengasumsikan bahwa sebaran curah hujan memiliki distribusi gamma pada variabel acak positif menggunakan parameter bentuk (α) dan parameter skala (β). Bentuk distribusi peluang curah hujan pada dasarnya mengikuti distribusi gamma sebagai bentuk distribusi yang cocok untuk kajian klimatologi curah hujan (Nur, Hidayat, Latifah, & Misnawati, 2021). Oleh karena itu, fungsi kepadatan peluang (*Probability Density Function/pdf*) curah hujan observasi dan curah hujan model dihitung sebagai berikut:

$$pdf(x) = \frac{e^{\left(-\frac{x}{\theta}\right)} e^{(k-1)}}{\Gamma(k) \theta^k} \quad (1)$$

Keterangan:

x=curah hujan harian rata-rata (mm)

k=parameter bentuk sebaran gamma

θ = parameter skala sebaran gamma

Γ = fungsi gamma

Kemudian, dibuat hubungan fungsi transfer distribusi kumulatif gamma (*Inverse Gamma Cumulative Distribution Functions (CDFs)*) dengan persamaan berikut:

$$cdf(x) = \int_0^x \frac{e^{\left(-\frac{x'}{\theta}\right)} x'^{(k-1)}}{\Gamma(k) \theta^k} dx' + cdf(0) \quad (2)$$

Langkah selanjutnya yaitu menentukan fungsi transfer distribusi kumulatif gamma antara data curah hujan observasi dan data curah hujan model. Fungsi transfer, $y = f(x)$, dapat berupa persamaan regresi polinomial. Faktor koreksi yang didapat dari fungsi transfer digunakan untuk mengoreksi data model dimana x adalah curah hujan harian model yang belum terkoreksi.

Evaluasi Data Model

Verifikasi adalah proses untuk menguji kinerja model dengan menggunakan data observasi di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat dan Stasiun Meteorologi Minangkabau. Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan nilai koefisien korelasi pearson untuk menunjukkan hubungan antara data model dengan data observasi yang dihitung dengan persamaan regresi (Nuramalia & Lasminto, 2022).

Tabel 1. Kriteria Nilai Koefisien Korelasi.

Interval Nilai (+/-)	Interpretasi
0 - 0.19	Sangat Rendah
0.20 - 0.39	Rendah
0.40 - 0.59	Sedang
0.60 - 0.79	Kuat
0.8 - 1	Sangat Kuat

Sumber: (Nuramalia dan Lasminto, 2022)

Tabel 1 menunjukkan nilai korelasi maksimum adalah +1, yang menunjukkan korelasi sempurna positif, artinya ketika satu variabel naik, variabel lainnya juga naik secara proporsional. Sebaliknya, nilai korelasi minimum adalah -1, yang menunjukkan korelasi sempurna negatif, artinya ketika satu variabel naik, variabel lainnya turun secara proporsional. Nilai korelasi 0 menunjukkan tidak adanya korelasi.

Validasi merupakan proses evaluasi terhadap data model untuk mengetahui nilai ketidakpastian data model (Nuramalia & Lasminto, 2022). Pada tahap ini perhitungan galat dihitung dengan RMSE pada persamaan (3). Nilai RMSE menyatakan nilai galat secara relatif terhadap skala variabel yang diukur, sehingga dapat memudahkan interpretasi galat daripada MSE atau MAE (Vebriana, 2022). RMSE memberikan bobot lebih besar pada kesalahan yang lebih besar sehingga RMSE mampu menangkap dan menunjukkan dampak dari kesalahan yang lebih besar secara lebih kuat.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (3)$$

Indeks Ekstrem

Indeks iklim ekstrem yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 4 indeks dari Indeks ETCCDI *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) untuk mendefinisikan curah hujan ekstrem (Karl, Nicholls, & Ghazi, 1999; Peterson et al., 2001). Indeks ini dihitung berdasarkan data curah

hujan observasi dan curah hujan model. Keempat indeks diuraikan sebagai berikut:

1. R95p (*Heavy Rain Days*)

Jumlah total curah hujan tahunan melebihi ambang batas persentil 95 dalam satuan mm. Perhitungan R95p disajikan pada Persamaan (4).

$$R95_{pj} = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ dimana } R95_{pj} > RR_{wn}95 \quad (4)$$

2. R99p (*Very Heavy Rain Days*)

Jumlah total curah hujan tahunan melebihi ambang batas persentil 95 dalam satuan mm. Perhitungan R99p disajikan pada Persamaan (5).

$$R99_{pj} = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \text{ dimana } R99_{pj} > RR_{wn}99 \quad (5)$$

3. PRCPTOT

Jumlah total curah hujan tahunan dengan curah hujan lebih atau sama dengan 1 mm. Perhitungan PRCPTOT disajikan pada Persamaan (6).

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (6)$$

4. Rx1day

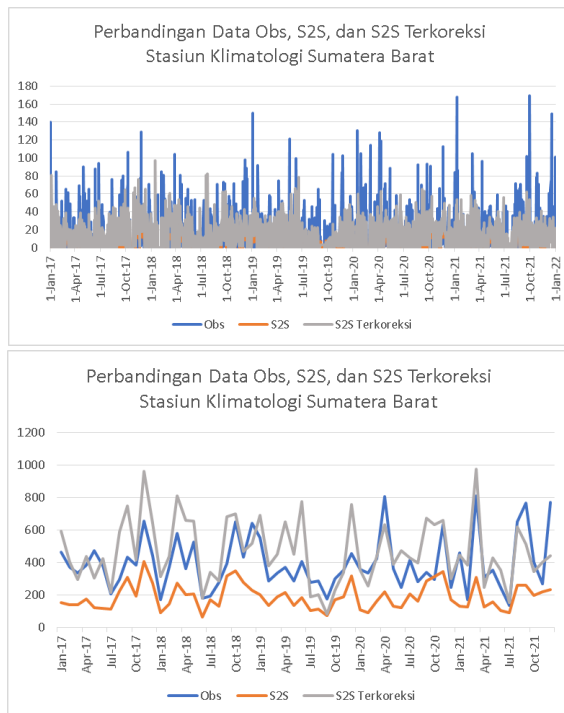
Jumlah hujan harian maksimum dalam 1 tahun (mm).

$$Rx1day_j = \max(RR_{ij}) \quad (7)$$

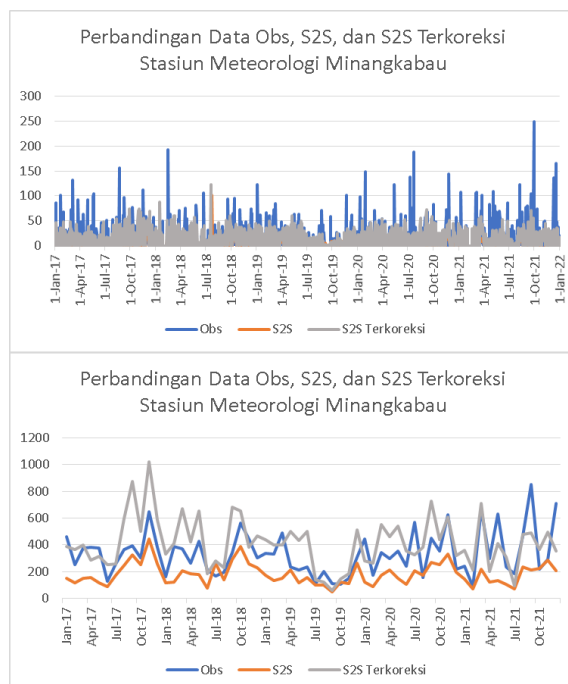
3. Hasil dan Pembahasan

Koreksi Bias Metode *Distribution Mapping*

Perhitungan koreksi bias dengan metode *distribution mapping* menghasilkan 12 faktor koreksi untuk setiap bulannya. Faktor koreksi digunakan untuk mengoreksi data model sehingga didapatkan data model S2S yang sudah terkoreksi. Setelah didapatkan hasil koreksi curah hujan harian, data disusun kembali untuk melihat perbandingan data hujan terkoreksi dan data observasi. Gambar 1 menunjukkan perbandingan data curah hujan observasi dan data model S2S yang sudah dikoreksi di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat. Pada skala harian, data observasi memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan data model. Data model belum mampu menangkap variasi nilai curah hujan yang lebih tinggi. Pada curah hujan bulanan, data model terkoreksi memiliki nilai yang lebih tinggi meskipun jika dilihat dari polanya terdapat kemiripan antara data model terkoreksi dengan data observasi. Data yang belum terkoreksi menunjukkan nilai yang rendah dibandingkan dengan data observasi.



Gambar 1. Perbandingan Curah Hujan Observasi, S2S, dan S2S Terkoreksi di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat. a) Harian b) Bulanan
Sumber: Data dan Grafik diolah



Gambar 2. Perbandingan Curah Hujan Observasi, S2S, dan S2S Terkoreksi di Stasiun Meteorologi Minangkabau. a) Harian b) Bulanan
Sumber: Data dan Grafik diolah

Perbandingan data curah hujan observasi dengan data model S2S di Stasiun Meteorologi Minangkabau ditunjukkan oleh Gambar 2. Data hujan harian menunjukkan bahwa nilai observasi lebih tinggi daripada nilai curah hujan yang terkoreksi. Data model yang terkoreksi tidak menangkap variasi curah hujan yang tinggi. Curah hujan bulanan menunjukkan pola yang cukup mirip dengan data observasi meskipun pada beberapa bulan memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan data observasi. Curah hujan yang belum terkoreksi memiliki pola yang juga cukup mirip dengan data observasi meskipun jika dilihat dari nilainya lebih rendah dibandingkan data observasi.

Tabel 2. Nilai Korelasi dan RMSE Stasiun Klimatologi Sumatera Barat Sumber: Data diolah

Bulan	Curah Hujan	Korelasi		RMSE	
		Harian	Bulanan	Harian	Bulanan
Januari	Tidak Terkoreksi	0.46	0.87	32.26	449.95
	Distribution Mapping	0.42	0.70	39.20	639.34
Februari	Tidak Terkoreksi	0.47	0.11	23.06	334.11
	Distribution Mapping	0.41	0.08	28.48	468.84
Maret	Tidak Terkoreksi	0.41	0.84	29.57	552.51
	Distribution Mapping	0.34	0.86	36.49	783.22
April	Tidak Terkoreksi	0.38	0.54	28.39	490.89
	Distribution Mapping	0.31	0.47	34.64	680.77
Mei	Tidak Terkoreksi	0.46	0.81	23.00	402.63
	Distribution Mapping	0.38	0.75	28.68	566.19
Juni	Tidak Terkoreksi	0.40	0.05	25.35	407.66
	Distribution Mapping	0.33	-0.13	32.45	589.57
Juli	Tidak Terkoreksi	0.44	0.69	17.71	286.44
	Distribution Mapping	0.40	0.71	21.45	365.27
Agustus	Tidak Terkoreksi	0.52	0.72	23.40	420.76
	Distribution Mapping	0.47	0.60	28.84	571.85
September	Tidak Terkoreksi	0.28	0.80	34.46	405.55
	Distribution Mapping	0.16	0.65	40.06	553.06
Oktober	Tidak Terkoreksi	0.42	0.56	27.50	500.77
	Distribution Mapping	0.35	0.50	32.27	642.21
November	Tidak Terkoreksi	0.39	0.77	31.00	598.47
	Distribution Mapping	0.31	0.62	36.92	779.12
Desember	Tidak Terkoreksi	0.43	0.24	28.73	571.50
	Distribution Mapping	0.35	0.16	34.83	746.13

Faktor koreksi bulanan juga dihitung untuk memeriksa korelasi dan error bulanan. Tabel 2 menunjukkan nilai korelasi curah hujan harian dan bulanan di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat. Nilai curah hujan harian terkoreksi cenderung memiliki nilai korelasi yang kecil rendah dibanding curah hujan yang tidak terkoreksi. Korelasi curah hujan terkoreksi berada pada kategori sangat rendah hingga sedang. Bulan September memiliki nilai korelasi harian yang paling kecil dengan kategori sangat rendah (0.16). Sementara bulan Agustus memiliki nilai korelasi harian paling tinggi diantara bulan lainnya dengan kriteria sedang (0.47). Secara umum, data hujan bulanan memiliki kecenderungan nilai korelasi yang lebih tinggi dibandingkan data harian. Nilai korelasi data bulanan bervariasi pada kategori sangat rendah hingga sangat kuat. Bulan Maret memiliki korelasi bulanan sangat kuat untuk data terkoreksi maupun tidak terkoreksi dengan korelasi lebih dari 0.80. Korelasi paling kecil yaitu bulan Februari Juni Desember yang memiliki nilai korelasi kurang dari 0.25 dengan kategori sangat rendah hingga rendah. Bulan Juni memiliki korelasi yang negatif yang menunjukkan bahwa data model terkoreksi hubungan yang berlawanan dengan data observasi. Nilai RMSE pada data harian yang belum terkoreksi berkisar antara 17.71 hingga 34.46 sementara data terkoreksi memiliki nilai RMSE lebih tinggi yaitu 21.45 hingga 40.06. Nilai RMSE pada data bulanan yang belum terkoreksi berkisar antara 286.44 hingga 598.47 sementara data terkoreksi memiliki nilai RMSE lebih tinggi yaitu 365.27 hingga 783.22.

Tabel 3 menunjukkan nilai korelasi curah hujan harian dan bulanan di Stasiun Meteorologi Minangkabau. Nilai curah hujan harian terkoreksi cenderung memiliki nilai korelasi yang kecil rendah dibanding curah hujan yang tidak terkoreksi. Korelasi curah hujan terkoreksi berada pada kategori sangat rendah hingga sedang. Bulan September memiliki nilai korelasi harian yang paling kecil dengan kategori sangat rendah dengan nilai kurang dari 0.30. Sementara bulan Mei memiliki nilai korelasi harian paling tinggi diantara bulan lainnya dengan kriteria sedang (0.41). Secara umum, data hujan bulanan memiliki kecenderungan nilai korelasi yang lebih tinggi dibandingkan data harian. Nilai korelasi data bulanan bervariasi pada kategori negatif sangat rendah hingga negatif sangat kuat dan positif sangat rendah hingga sangat kuat. Bulan April Juni dan Desember memiliki korelasi negatif yang menunjukkan bahwa data model memiliki pola yang berkebalikan dengan data observasi. Bulan September dan November memiliki

korelasi bulanan yang kuat dengan nilai lebih dari 0.60. Pada bulan Januari dan Juli nilai korelasi bulanan setelah data dikoreksi memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan data yang belum dikoreksi. Nilai RMSE pada data S2S harian yang belum dikoreksi berkisar antara 21.47 hingga 37.19 sementara nilai RMSE pada data terkoreksi berkisar antara 26.00 hingga 44.01. Nilai RMSE pada data S2S bulanan yang belum dikoreksi berkisar antara 299.84 hingga 609.93 sementara nilai RMSE pada data terkoreksi berkisar antara 374.07 hingga 786.48.

Tabel 3. Nilai Korelasi dan RMSE Stasiun Meteorologi Minangkabau. Sumber: Data diolah

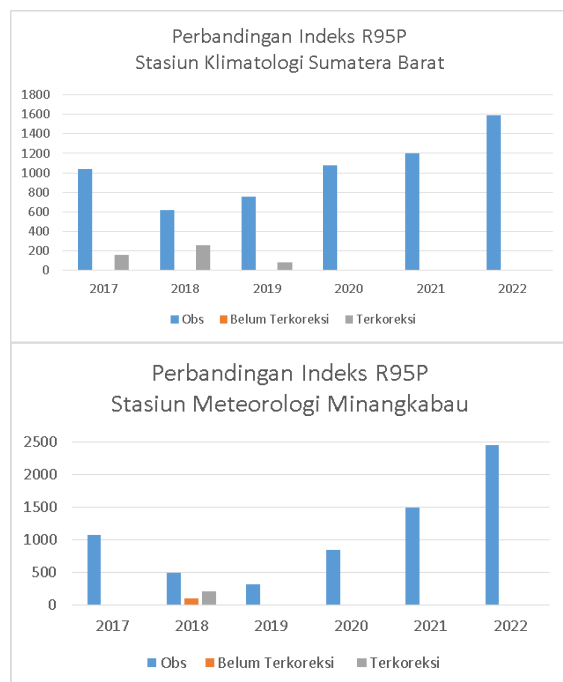
Bulan	Curah Hujan	Korelasi		RMSE	
		Harian	Bulanan	Harian	Bulanan
Januari	Tidak Terkoreksi	0.44	0.33	25.14	354.04
	Distribution Mapping	0.38	0.35	30.03	471.63
Februari	Tidak Terkoreksi	0.43	0.57	27.94	315.94
	Distribution Mapping	0.39	0.32	32.83	435.76
Maret	Tidak Terkoreksi	0.41	0.42	29.88	487.12
	Distribution Mapping	0.32	0.35	36.70	689.91
April	Tidak Terkoreksi	0.35	-0.57	22.05	350.30
	Distribution Mapping	0.26	-0.65	26.00	472.06
Mei	Tidak Terkoreksi	0.47	0.48	26.82	418.63
	Distribution Mapping	0.41	0.33	33.28	597.37
Juni	Tidak Terkoreksi	0.37	-0.07	21.47	299.84
	Distribution Mapping	0.28	-0.45	26.69	418.79
Juli	Tidak Terkoreksi	0.21	0.27	25.79	344.68
	Distribution Mapping	0.29	0.53	26.93	374.07
Agustus	Tidak Terkoreksi	0.38	0.53	27.23	381.69
	Distribution Mapping	0.30	0.35	31.37	503.48
September	Tidak Terkoreksi	0.34	0.76	37.19	402.35
	Distribution Mapping	0.24	0.60	44.01	585.26
Oktober	Tidak Terkoreksi	0.38	0.81	27.29	498.20
	Distribution Mapping	0.28	0.56	31.11	607.94
November	Tidak Terkoreksi	0.39	0.80	32.64	609.93
	Distribution Mapping	0.32	0.62	38.33	786.48
Desember	Tidak Terkoreksi	0.40	-0.13	26.71	477.71
	Distribution Mapping	0.31	-0.20	31.32	598.26

Pada kedua stasiun yang diamati, terdapat variasi nilai korelasi yang mengindikasikan bahwa pada skala waktu yang berbeda, keterampilan model S2S ECMWF memiliki tingkat hubungan yang bervariasi. Hal ini dapat disebabkan oleh faktor lain seperti pengaruh intraseasonal atau intensitas hujan harian yang besar sehingga mempengaruhi prediktabilitas

curah hujan S2S. Wilayah daratan seperti di sekitar Benua Maritim menunjukkan skala dan keterampilan spasial yang lebih besar, terutama di wilayah dengan amplitudo relatif variasi antar tahunan yang disebabkan oleh SPL yang kuat (Moron & Robertson, 2021b)

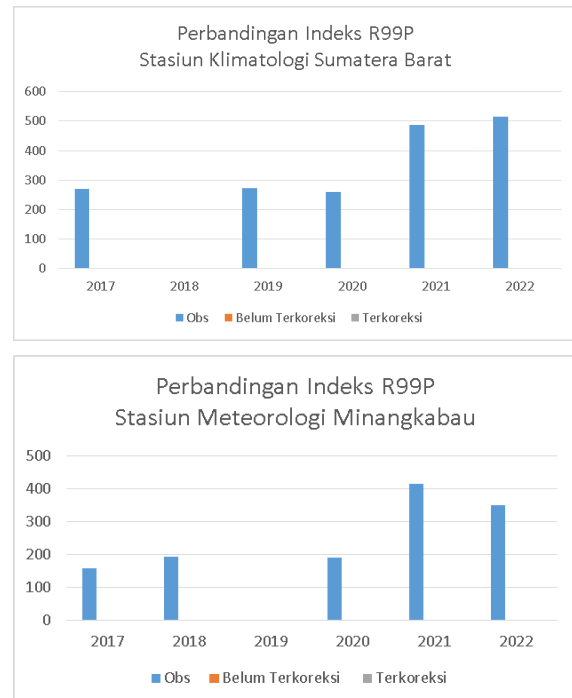
Indeks Iklim Ekstrem

Gambar 3 menunjukkan perbandingan Indeks R95p terhadap data observasi, data model yang belum terkoreksi dan data model yang sudah terkoreksi. Indeks R95p yang dihitung di Stasiun Meteorologi Minangkabau untuk data model terkoreksi menunjukkan nilai *underestimate* atau nilai yang lebih rendah dibandingkan nilai observasi. Pada 4 tahun periode yang diuji tidak mencatat adanya curah hujan yang melebihi ambang batas persentil 95. Indeks R95p di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat menunjukkan nilai *underestimate*. Pada 3 tahun terakhir bahkan tidak tercatat curah hujan yang melebihi ambang batas persentil 95.



Gambar 3. Perbandingan Indeks R95p 2017-2022
Sumber: Data dan Grafik diolah

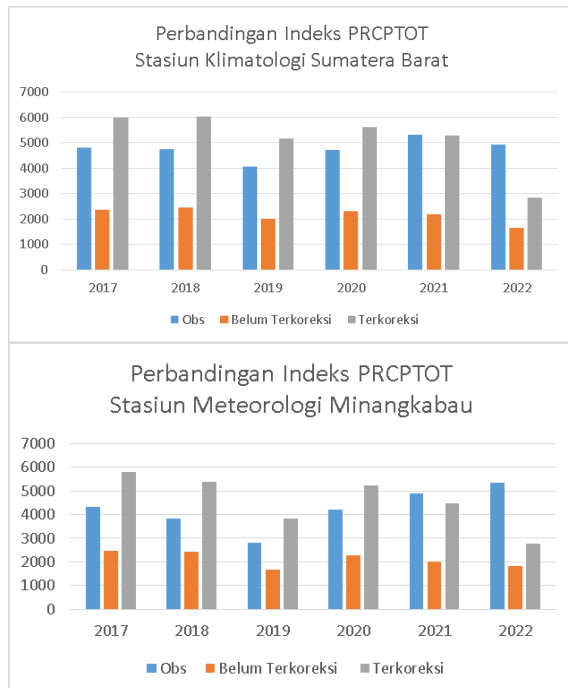
Ambang batas yang dinilai lebih ekstrem, R99P, pada Gambar 4 menunjukkan bahwa data model S2S pada kedua lokasi pengamatan baik yang terkoreksi maupun yang belum dikoreksi tidak dapat menangkap curah hujan yang melebihi ambang batas persentil 99.



Gambar 4. Perbandingan Indeks R99p 2017-2022
Sumber: Data dan Grafik diolah

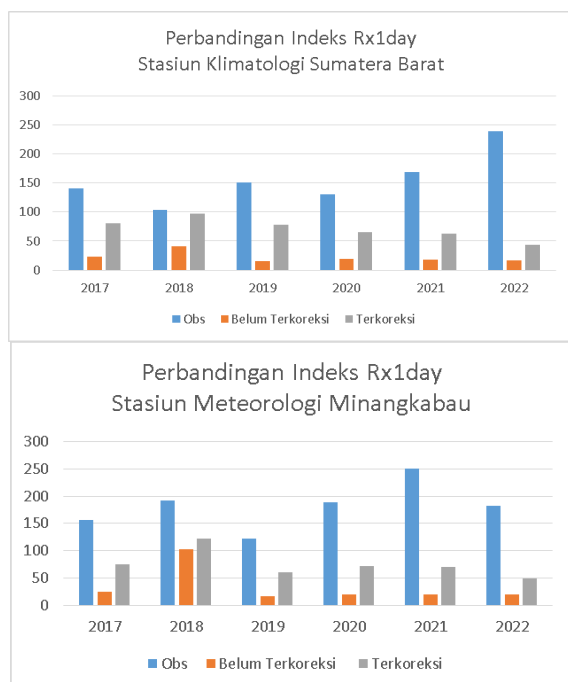
Indeks PRCPTOT yang diihitung untuk data model terkoreksi pada Gambar 5 menunjukkan nilai yang cenderung *overestimate* atau melebihi nilai observasi. Stasiun Meteorologi Minangkabau pada 2 tahun terakhir menunjukkan nilai yang *undersetimate*. Data model yang belum terkoreksi menunjukkan nilai yang konsisten *underestimate* dibandingkan dengan nilai observasi. Sementara untuk Stasiun Klimatologi Sumatera Barat pada 1 tahun terakhir menunjukkan nilai yang *undersetimate*. Data model yang belum terkoreksi menunjukkan nilai yang konsisten *underestimate* dibandingkan dengan nilai observasi.

Indeks Rx1day menjelaskan jumlah curah hujan harian maksimum dalam satu tahun. Berdasarkan Gambar 6, indeks Rx1day pada data observasi memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan data model. Data model S2S yang terkoreksi belum mampu menangkap nilai indeks Rx1day. Data S2S yang belum terkoreksi memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan data yang sudah terkoreksi.



Gambar 5. Perbandingan Indeks PRCPTOT 2017-2022

Sumber: Data dan Grafik diolah



Gambar 6. Perbandingan Indeks Rx1day 2017-2022

Sumber: Data dan Grafik diolah

4. Kesimpulan

Nilai korelasi data model terkoreksi di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat untuk curah hujan harian berkisar antara 0.16 hingga 0.47 dan berkisar antara 0.05 hingga 0.86 untuk hujan bulanan. Nilai korelasi data model terkoreksi di

Stasiun Meteorologi Minangkabau untuk curah hujan harian berkisar antara 0.24 hingga 0.41 dan berkisar antara 0.27 hingga 0.62 untuk hujan bulanan. Data hujan bulanan yang dikoreksi dengan metode distribution mapping memiliki nilai korelasi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan curah hujan harian terkoreksi. Hal ini mungkin disebabkan oleh rentang data yang digunakan pada data bulanan lebih sedikit dibandingkan data harian. Nilai RMSE pada data yang tidak dikoreksi umumnya lebih rendah dibandingkan dengan data yang sudah dikoreksi. Nilai RMSE pada Stasiun Klimatologi Sumatera Barat lebih kecil dibandingkan Nilai RMSE pada Stasiun Meteorologi Minangkabau. Data S2S ECMWF terkoreksi belum mampu menangkap variabilitas ekstrem yang dijelaskan oleh indeks R95p, R99p, PRCPTOT, dan Rx1day dengan baik.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan sebagai penghargaan terhadap rekan-rekan di BMKG terutama di Stasiun Klimatologi Sumatera Barat yang sudah membantu menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Hadiansyah, R., Indranata, A. L., Silitonga, A. K., & Winarso, P. A. (2019). Kajian Kondisi Atmosfer Saat Kejadian Hujan Ekstrem di Padang Sumatera Barat (Studi Kasus Tanggal 14 Februari 2018). *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya)*, 3, 246-257.
- [2] White, Christopher J, Carlsen, H., Robertson, A. W., Klein, R. J., Lazo, J. K., Kumar, A., ... Others. (2017). Potential applications of subseasonal-to-seasonal (S2S) predictions. *Meteorological Applications*, 24, 315--325.
- [3] White, C. J., Franks, S. W., & McEvoy, D. (2015). Using subseasonal-to-seasonal (S2S) extreme rainfall forecasts for extended-range flood prediction in Australia. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 370, 229-234. doi.org/10.5194/piahs-370-229-2015
- [4] Lang, A. L., Pegion, K., & Barnes, E. A. (2020). Introduction to special collection: "Bridging weather and climate: subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(4).

- [5] Vitart, F., & Robertson, A. W. (2018). The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1). doi.org/10.1038/s41612-018-0013-0
- [6] Vivi, A., Hidayat, R., Faqih, A., & Alfahmi, F. (2021). Preliminary assessment for sub-seasonal to seasonal precipitation model on four specific conditions over western Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 893(1). doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012045
- [7] de Andrade, F. M., Coelho, C. A., & Cavalcanti, I. F. (2019). Global precipitation hindcast quality assessment of the Subseasonal to Seasonal (S2S) prediction project models. *Climate Dynamics*, 52(9–10), 5451–5475.
- [8] Moron, V., & Robertson, A. W. (2021a). Relationships between subseasonal-to-seasonal predictability and spatial scales in tropical rainfall. *International Journal of Climatology*, 41(12), 5596–5624. doi.org/10.1002/joc.7143
- [9] White, Christopher J., Domeisen, D. I. V., Acharya, N., Adefisan, E. A., Anderson, M. L., Aura, S., ... Wilson, R. G. (2022). Advances in the Application and Utility of Subseasonal-to-Seasonal Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(6), E1448–E1472. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0224.1
- [10] Piani, C., Haerter, J. O., & Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1–2), 187–192. https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9
- [11] Nur, I. A., Hidayat, R., Latifah, A. L., & Misnawati. (2021). Pengaruh koreksi bias dan metode ensemble pada data curah hujan dari empat model luaran Regional Climate Model (RCM) CORDEX-SEA di Sumatera. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 11(1), 49–56. https://doi.org/10.29244/jpsl.11.1.49-56
- [12] Nuramalia, R., & Lasminto, U. (2022). Keandalan Data Curah Hujan Satelit TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) Terhadap Data Curah Hujan Stasiun Bumi pada Beberapa Sub DAS di DAS Brantas. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 20(2), 207. https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v20i2.12015
- [13] Vebriana, E. (2022). *Pemodelan Spasial Nyesian Model Averaging Pada Angka Putus Sekolah Jenjang Sekolah Dasar di Provinsi Sumatera Utara*. Universitas Muhammadiyah Semarang.
- [14] Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary. In *Weather and Climate Extremes* (pp. 3–7). Springer.
- [15] Peterson, T. C., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., & Plummer, N. (2001). *Report on the activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related apporteurs*. Geneva: Word Meteorological Organization.

PENERAPAN IMPUTASI LOCF DAN CROSS MEAN DALAM PENGISIAN DATA KOSONG PADA CURAH HUJAN HARIAN ARG

APPLICATION OF LOCF AND CROSS MEAN IMPUTATION IN COMPLETING MISSING DATA ON ARG DAILY RAINFALL

Siti Risnayah^{1*}, La Ode Hasnuddin S. Sagala²

¹BMKG, Stasiun Klimatologi Sulawesi Tenggara, Jl. Poros Bandara Kec. Ranomeeto, Konawe Selatan, 93870

²Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Sembilanbelas November Kolaka, Kec. Tanggetada, Kolaka, 93561

*E-mail: siti.risnayah@bmkg.go.id

Naskah masuk: 28 September 2023 Naskah diperbaiki: 20 Oktober 2023 Naskah diterima: 31 Oktober 2023

ABSTRAK

Banyaknya alat penakar hujan Automatic Rain Gauge (ARG) yang telah terpasang saat ini belum dimanfaatkan secara optimal. Hal ini disebabkan ARG yang bekerja secara otomatis sering kali mengalami *missing data* akibat permasalahan teknis dan jaringan yang pada akhirnya menimbulkan keraguan akan keakuratannya. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data curah hujan ARG dalam periode 10 menit selama tahun 2021 serta data curah hujan dari alat penakar hujan konvensional di lokasi yang sama. Data akan diolah hingga menjadi data harian kemudian dipulihkan dengan pengisian data kosong yang dikerjakan melalui bahasa pemrograman Python. Karena data ARG berjenis data longitudinal maka pengisian data kosong akan menggunakan imputasi LOCF dan *cross mean*. Uji validitas kemudian dilakukan untuk membandingkan data ARG yang telah dipulihkan dengan data dari alat manualnya melalui perhitungan nilai MAE, RMSE, dan koefisien korelasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengisian data kosong dapat mengurangi persentase *missing data* yang semula 21.4% menjadi 1.1%. Hasil uji validitas menunjukkan ARG dapat menghasilkan data yang akurat ditandai dengan nilai eror yang rendah (MAE=0.998 mm, RMSE=2.253 mm) dan korelasi yang sangat tinggi ($r=0.966$). Dengan semakin tingginya persentase kelengkapan data dan akurasi yang sangat baik maka penggunaan data tersebut akan menjadi semakin luas sehingga memberikan lebih banyak manfaat terutama untuk keperluan analisis, prakiraan, pelayanan data, maupun penelitian.

Kata kunci: ARG, *missing data*, Python, LOCF, Cross Mean

ABSTRACT

The number of installed Automatic Rain Gauges (ARG) today has not been optimally utilized. It is because ARG that works automatically often has missing data due to technical and network problems raising doubts about its accuracy. The data used are ARG rainfall data in 10 minute periods during 2021 and rainfall data from conventional gauge at the same location. The data will be processed until it becomes daily data and will be recovered by missing data entry worked by the Python programming language. Because the ARG data is the longitudinal data type, missing data entry will use LOCF and cross mean imputation. The validity test will compare the recovered ARG data with the conventional gauge data by calculating the MAE, RMSE, and correlation coefficient. The results showed that missing data entry could reduce the percentage of missing from 21.4% to 1.1%. The result of validity tests showed that ARG could produce accurate data determined by a lower error (MAE=0.998mm, RMSE=2.253mm) and a very high correlation ($r=0.966$). With a higher percentage of data completeness and excellent accuracy, the data usage will become more extensive to provide more benefits, especially for the need of analysis, forecasting, data services, and research.

Keywords: ARG, *missing data*, Python, LOCF, Cross Mean

1. Pendahuluan

Pada bidang klimatologi, bahasa pemrograman Python sangat handal digunakan untuk pengolahan data numerik seperti data *timeseries* curah hujan keluaran *Automatic Rain Gauge* (ARG). ARG merupakan alat penakar hujan otomatis yang mencatat curah hujan setiap 10 menit dan menyimpannya dalam *data logger*. Permasalahan yang sering kali terjadi pada setiap alat otomatis adalah adanya *missing data* akibat kendala jaringan ataupun kendala teknis lainnya. *Missing data* yang terjadi terkadang masih dapat diselamatkan karena beberapa ARG mengakumulasi datanya di menit berikutnya. Jika tidak diamati dengan baik maka *missing data* akan dibuang padahal data tersebut masih dapat dipulihkan.

Terdapat dua format data curah hujan pada ARG yakni yang mengakumulasi hujan ke menit berikutnya dan yang menampilkan data hujan *real* setiap 10 menit. Pada ARG yang mengakumulasi curah hujannya hingga jam 00.00 UTC, total curah hujan hariannya adalah data pada jam 00.00 UTC tersebut. Akan tetapi dalam penentuannya sebagai total curah hujan harian klimatologi di BMKG didasarkan pada laporan hujan F-Klim71 yang juga diterapkan di pos hujan kerjasama yakni jumlah curah hujan harian dihitung dari jam 07.00 hingga jam 07.00 waktu setempat keesokan harinya dan dicatat sebagai hujan pada waktu penakaran [1]. Mengingat wilayah penelitian masuk dalam zona Waktu Indonesia Tengah (WITA), maka jam 07.00 waktu setempat adalah jam 23.00 UTC. Oleh sebab itu, curah hujan harian ARG diperoleh dari curah hujan yang tercatat pada jam 23.00 UTC ditambah dengan selisih antara jam 00.00 dan 23.00 UTC hari sebelumnya.

Banyaknya alat otomatis yang telah dipasang saat ini belum menjadi solusi ketersediaan data iklim di banyak lokasi di Indonesia. Hal ini disebabkan karena pengolahan data dari alat otomatis ini belum dilakukan secara optimal. Kesulitan memahami struktur data, kondisi data yang masih mentah, dan terutama karena kurangnya kepercayaan akan data dari alat otomatis menjadi faktor penyebabnya [2]. Karena data terkumpul secara otomatis, ada ketakutan bahwa data tidak akurat mengingat banyaknya permasalahan yang sering dialami oleh alat otomatis. Alat otomatis yang jarang dilakukan pengecekan seringkali data tetap masuk akan tetapi nilainya menunjukkan angka yang 'aneh' sehingga performa alat ini pun semakin diragukan.

Tahap awal dalam pengolahan data adalah proses pembersihan data (*data cleaning*). Salah satu langkah dalam pembersihan data ini adalah proses pembersihan data kosong yang mana dapat ditangani dengan menghapusnya atau mengisi nilainya dengan estimasi atau imputasi tergantung kondisi data tersebut [3]. Pengisian data kosong bertujuan untuk memulihkan data sehingga jumlah data semakin banyak dan pengolahannya semakin akurat. Dampak dari data yang hilang pada penelitian kuantitatif dapat menjadi serius karena dapat menyebabkan perkiraan parameter yang bias, hilangnya informasi, penurunan kekuatan statistik, peningkatan kesalahan standar, dan generalisasi temuan yang melemah [4]. Persentase data masuk yang rendah secara tidak langsung dapat mengurangi tingkat kepercayaan data sehingga data tidak digunakan dalam analisis [5, 6].

Pemulihan data akan sangat berguna bagi kualitas data itu sendiri. Kondisi data yang cenderung lengkap dapat meningkatkan daya guna data tersebut sehingga dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam analisis, prakiraan, maupun penelitian. Tidak ada batasan yang pasti mengenai persentase yang dapat diterima dari data yang hilang untuk kesimpulan statistik yang valid [4]. Terdapat referensi yang menyatakan ambang maksimum yang aman untuk data kosong adalah 5% dari total kumpulan data yang besar, jika lebih dari 5% maka sebaiknya tidak digunakan [6]. Beberapa referensi menetapkan aturan berbeda untuk persentase *missing data* yang berbeda [7, 8]. Scheffer (2002) menyarankan penghapusan *missing data* dapat digunakan jika tidak lebih dari 6% data hilang, imputasi tunggal jika tidak lebih dari 10% data hilang dan prosedur yang lebih kompleks seperti imputasi berganda jika antara 10% dan 25% dari datanya hilang [7]. Zhang dkk. (2004) dalam Ocampo-Marulanda dkk (2021) menetapkan curah hujan bulanan tidak dihitung jika terdapat *missing data* lebih dari tiga hari dalam sebulan dan curah hujan tahunan tidak dihitung jika lebih dari 15 hari atau satu bulan hilang dalam setahun. [9].

World Meteorological Organization (WMO) sebagai badan dunia yang membuat aturan pengolahan data iklim bahkan menetapkan aturan yang lebih ketat. Dalam perhitungan total curah hujan bulanan, WMO mensyaratkan tidak boleh ada satu haripun data yang hilang [10]. WMO mensyaratkan total bulanan agar dapat digunakan harus memiliki kelengkapan 100% baik data itu dibangun dari hasil pengamatan maupun estimasi [10].

Diterangkan lebih lanjut bahwa data estimasi harus memenuhi kriteria 11/5 yakni menerima hanya 11 hari data estimasi dan tidak lebih 5 hari berturut-turut [10]. Hal ini tentu menjadi kendala bagi kebanyakan alat otomatis untuk memenuhi syarat penggunaan data karena seringkali mengalami gangguan jaringan yang kemudian menghasilkan *missing value*. Melalui proses pengisian data kosong yang tepat maka penggunaan data meningkat dan informasi yang dihasilkan tidak menjadi bias.

Saat ini pemikiran bagaimana melakukan pengisian *missing value* menjadi lebih berkembang daripada pemikiran bagaimana mengatasi *missing value* tersebut [11]. Telah banyak penelitian terkait pengisian data-data yang hilang dari rangkaian curah hujan dimana hasil akhirnya dapat meningkatkan akurasi data tersebut. Miro dkk (2017) telah mengujicobakan beberapa pendekatan untuk mengisi seris data yang tidak lengkap dan berhasil menemukan satu metode yang paling baik [11]. Muflihah dan Pahlawan (2017) juga menyatakan dapat meningkatkan korelasi dan mengurangi RMSE dari pengisian data kosong curah hujan dengan metode yang tepat [12]. Ocampo-Marulanda dkk (2021) berhasil melakukan pengisian data kosong pada kasus hujan ekstrim ditandai dengan koefisien korelasi mendekati 1 dan RMSE mendekati 0 [9]. Sementara Papailiou dkk (2022) menemukan metode yang lebih akurat untuk mengisi data hujan yang hilang akan tetapi membutuhkan waktu yang lebih lama [13]. Penelitian ini juga akan melakukan pengolahan data *timeseries* curah hujan yang dilakukan secara otomatis menggunakan bahasa pemrograman Python dimana dalam prosesnya akan dilakukan pemulihan data yang hilang. Diharapkan penelitian ini akan memudahkan pengolahan data ARG sehingga ke depannya data dari alat otomatis ini dapat digunakan dalam analisis, prakiraan, pelayanan data, maupun penelitian.

2. Metode Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data curah hujan hasil pengukuran alat otomatis jenis *Automatic Rain Gauge* (ARG) dalam periode 10 menit selama tahun 2021 serta data curah hujan harian hasil observasi dengan alat penakar hujan konvensional tipe OBS di lokasi yang sama (lihat Tabel 1). Data alat otomatis ARG diperoleh dari situs awscenter.bmkg.go.id sementara data pengukuran manual diperoleh dari BMKGSoft hasil input data elektronik Pos Hujan Kerjasama (ePHK).

Tabel 1. Metadata ARG dan Pos Hujan Kerjasama (PHK)

Parameter	ARG	PHK
Nama	ARG Kapontori	PHK Wakangka
ID Stasiun	150159	74042201a
Lintang	5.20872 LS	5.20900 LS
Bujur	122.8283 BT	122.8280 BT
Lokasi	Desa Wakangka, Kec. Kapontori, Kab. Buton	Desa Wakangka, Kec. Kapontori, Kab. Buton
Reset Time	00.10 UTC (08.10 WITA)	23.00 UTC (07.00 WITA)

Sumber: BMKG

Data curah hujan yang telah terkumpul akan diolah menggunakan bahasa pemrograman Python yang dikerjakan melalui *Google Colabs*. Sebuah *script* sederhana akan disusun sehingga nantinya petugas pengolah data cukup dengan memasukkan data unduhan dari ARG dan mengisi beberapa informasi lalu *running script*-nya sehingga menghasilkan data harian. Dalam *script* tersebut telah mencakup pengisian data kosong sehingga jumlah data yang dihasilkan dapat maksimal. Selanjutnya data akan divisualisasikan dan dibandingkan dengan data dari alat konvensional untuk diverifikasi. Urutan pengolahan data ARG menggunakan Python dijelaskan dalam poin-poin di bawah ini:

- 1) Unduh data curah hujan ARG dan pos hujan dalam format Excel dan simpan di komputer atau *Google Drive*.
- 2) *Rename file* unduhan tersebut dengan format `arg_stasiun_tahun_bulan`. Contoh: `arg_kapontori_2021_01`.
- 3) Sedikit modifikasi pada data ARG yakni menghapus keseluruhan baris pertama yang berisi keterangan *Quality Code*.
- 4) Mengunggah data ARG dan data pos hujan tersebut ke dalam Python.
- 5) Cukup mengisi 3 informasi yakni list periode data yang diolah, nama stasiun, dan list periode data yang akan dihasilkan.

Jenis data ARG yang mengakumulasi hujan ke menit berikutnya hingga ke jam 00.00 UTC (dan kembali 0 mm pada jam 00.10 UTC) adalah jenis data longitudinal. Terdapat banyak metode imputasi dalam mengatasi kehilangan data pada data longitudinal, namun metode yang paling cocok digunakan adalah imputasi tunggal berupa LOCF dan *cross mean* [7, 14, 15]. LOCF (*Last Observation Carried Forward*) berarti mengganti nilai hilang dengan nilai pengamatan terakhir yang dapat tercatat sementara *cross mean* berarti mengganti nilai hilang dengan nilai rata-rata [5, 14, 15]. Pengisian data kosong dengan nilai pengamatan terakhir sangat berguna pada data

dimana nilai pengamatan akan dicatat hanya ketika ada perubahan [14].

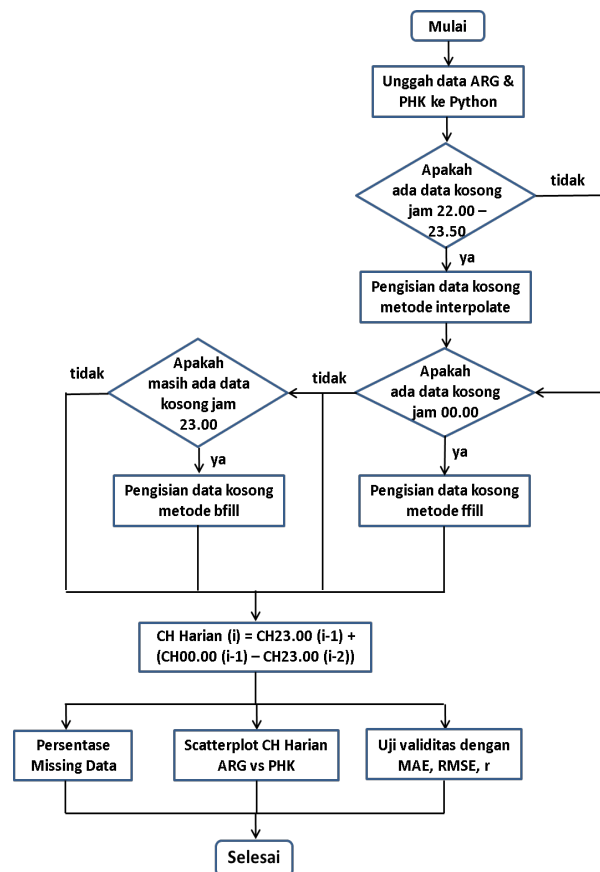
Waktu utama untuk menentukan total curah hujan harian pada data ARG adalah jam 23.00 dan 00.00 UTC. Untuk memulihkan nilai-nilai yang tidak terekam pada waktu tersebut maka pada penelitian ini ditetapkan batasan waktu yang menjadi pengisi data hilang tersebut yakni data antara jam 22.00 s.d 00.00 UTC. Batasan ini ditetapkan dengan keyakinan bahwa curah hujan 1 jam sebelum dan sesudah jam utama (22.00 UTC dan 00.00 UTC) dapat sama atau minimal mendekati dengan hujan pada jam utama (23.00 UTC).

Untuk lebih memahami teknis pengisian data kosong, berikut dijelaskan jenis-jenis data kosong yang terdapat pada data ARG.

- 1) Data kosong sebagian antara jam 22.00 – 00.00 UTC maka data masih bisa dipulihkan dengan nilai pada rentang jam tersebut.
- 2) Data kosong keseluruhan dari jam 22.00 – 00.00 UTC maka data tidak bisa dipulihkan dan akan tercatat sebagai NaN atau 9999.

Pada bahasa pemrograman Python, terdapat sintaks untuk imputasi tunggal yakni *interpolate*, *forward fill (ffill)*, dan *backward fill (bfill)*. Sintaks-sintaks ini akan dipakai dalam 3 tahapan seperti yang dijelaskan pada diagram alir (Gambar 1). Sintaks *interpolate* digunakan pada pencarian nilai tengah dari 2 data yang ada, sintaks *ffill* digunakan pada pengisian data kosong dengan data dari menit sebelumnya, sedangkan sintaks *bfill* digunakan pada pengisian data kosong dengan data dari menit setelahnya [16]. Dengan prinsip rata-rata, imputasi *interpolate* mampu mengisi data kosong yang diapit oleh dua data antara jam 22.00 – 23.50 UTC sehingga data jam utama 23.00 UTC dapat dipulihkan (tidak dapat dipulihkan jika tidak ada data selama jam 22.00 – 23.50 UTC). Selanjutnya mengecek jam 00.00 UTC, jika kosong maka dilengkapi dengan data dari jam 23.50 UTC berdasarkan prinsip *ffill*. Kemudian kembali mengecek kelengkapan jam 23.00 UTC, jika masih kosong maka dilengkapi dengan data dari jam 23.50 UTC berdasarkan prinsip *bfill*. Untuk kasus *missing data* seharian dan *missing data* di atas jam 22.00 UTC maka data dibiarkan hilang atau ditulis sebagai NaN.

Menggunakan imputasi tunggal dapat menghasilkan nilai pengisian yang terlalu rendah [16] terutama ketika kasus kejadian hujan lebat antara jam 23.00 – 00.00 UTC tidak terekam. Untuk meningkatkan keyakinan pada metode ini diperlukan analisis statistik tambahan



Gambar 1. Diagram Alir Pengolahan Data ARG (Sumber: data diolah)

yang tepat yang dapat membedakan antara nilai sebenarnya dan nilai estimasi [14]. Dalam penelitian ini akan digunakan perhitungan statistik uji validitas dengan menghitung nilai MAE, RMSE, koefisien korelasi, dan *slope* menggunakan *library metrics* dan *pandas* yang tersedia di Python. Nilai MAE dan RMSE dikatakan baik jika nilainya mendekati 0 sedangkan koefisien korelasi baik jika besarnya mendekati 1 [17]. *Slope* berarti rata-rata pertambahan (jika bernilai positif) atau pengurangan (jika bernilai negatif) yang terjadi pada variabel y untuk setiap peningkatan satu satuan variabel x [18]. Nilai statistik ini dapat menjadi koreksi maupun verifikasi performa alat maupun kualitas kedua data tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

Tipe Data Kosong pada ARG. Untuk memahami bagaimana pengisian data kosong dapat dilakukan, pertama-tama perlu mengetahui kondisi data mentah ARG yang seringkali kehilangan data. Beberapa kejadian data hilang di ARG Kapontori yang sebagian datanya masih dapat diselamatkan ditampilkan pada Gambar 2. Mengingat jam utama dalam

Time	1/21	1/22	2/3	2/4	3/10	3/18	6/13	6/21	6/26	6/29	7/1	7/2	7/3	7/5	7/15	7/16	7/26	7/27	7/28	8/10	8/11	9/23	9/24
0:00:00	3		7.4		1.4	0	10.6	37.6	2.8	18.6	0.8	3.2	30.6	0.6	5.6	7.4	0	0	0	0.2	1.8	18	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22:00:00		7.6	12	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:10:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:20:00		7.6		19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.8	0				1.2	3.2		0.2
22:30:00		7.6		19.2	13		1	66.6	31.6	21.6	3.2	30.4	4.6		7	0				1.2	3.2		0.2
22:40:00		7.6		19.2		7.2	1	66.6	31.8						7	0				1.4	3.2		0.2
22:50:00		7.6		19.2	13	7.2	1	66.6	31.8						7	0				1.4	3.2		0.2
23:00:00		7.6		19.2		7.2	1	66.6	31.8						7.2	0				1.4	3.2		0.2
23:10:00		7.6		19.2	13	7.2	1	66.6	31.8						7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:20:00		7.6		19.2			1	66.6	31.8						0					1.4	3.2		0.2
23:30:00		7.6		19.2	13		1		31.8		3.2	30.6			0								0.2
23:40:00		7.6		19.2		7.2	1	66.6							0								0.2
23:50:00		7.6		19.2	13	7.2		66.6	32	21.6	3.2		4.6	1.4	0								0.2
	X	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	X	X

Gambar 2. Sampel Data Curah Hujan di ARG Kapontori dalam Milimeter; Baris Atas Bulan/Tanggal; Baris Bawah X Tidak Dapat Dipulihkan dan V Dapat Dipulihkan; Merah Muda Berarti Data Tidak Ada (Sumber: data diolah)

menentukan akumulasi hujan harian pada Kecamatan Kapontori (Zona waktu WITA) adalah jam 00.00 dan 23.00 UTC maka data harus tersedia pada waktu tersebut. Gambar 2 telah mengkategorikan hari-hari yang datanya bisa dipulihkan dan yang tidak bisa. Baris berwarna biru yang ditandai dengan tanda silang 'X' yakni tanggal 21 Januari jam 23.00, 22 Januari jam 00.00, 23 September jam 23.00 dan 24 September jam 00.00 tidak dapat dipulihkan datanya karena tidak ada data sama sekali sepanjang jam 22.00 hingga 00.00 UTC sehingga data pada hari tersebut dianggap hilang atau 9999. Sebaliknya pada kolom yang diberi tanda ceklis 'V' berarti datanya masih dapat dipulihkan. Contohnya *missing data* jam

23.00 UTC pada tanggal 3 Februari dapat diisi dengan nilai 12.2 mm, tanggal 10 Maret 13.0 mm, tanggal 29 Juni 21.6 mm, tanggal 2 Juli 30.5 mm, 5 Juli 1.4 mm, 26 Juli 0.0 mm, dan 27 Juli 0.0 mm.

Pengisian Data Kosong Tahap I. Tahap awal pengisian data kosong adalah pengisian pada jam 23.00 UTC berdasarkan data hujan antara jam 22.00 s.d 23.50 UTC menggunakan sintaks *interpolate*. Beberapa data dapat dipulihkan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3 pada kolom yang berwarna hijau. Dapat dilihat nilai pemulihan pada Gambar 3 sama dengan nilai dugaan seperti pada penjelasan sebelumnya (analisis pada Gambar 2).

Time	1/21	1/22	2/3	2/4	3/10	3/18	6/13	6/21	6/26	6/29	7/1	7/2	7/3	7/5	7/15	7/16	7/26	7/27	7/28	8/10	8/11	9/23	9/24
22:00:00		7.6	12	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:10:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:20:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.8	0				1.2	3.2		0.2
22:30:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6	21.6	3.2	30.4	4.6		7	0				1.2	3.2		0.2
22:40:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.4	4.6		7	0				1.4	3.2		0.2
22:50:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7	0				1.4	3.2		0.2
23:00:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7.2	0				1.4	3.2		0.2
23:10:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:20:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:30:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:40:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.9	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:50:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	32	21.6	3.2	30.6	4.6	1.4	7.4	0				1.4	3.2		0.2

Gambar 3. Sampel Data Curah Hujan yang Telah Mengalami Pengisian Data Kosong Tahap I (Merah Muda: Data Belum Dapat Dipulihkan, Hijau: Data Hasil Pemulihan) (Sumber: data diolah)

Time	1/21	1/22	2/3	2/4	3/10	3/18	6/13	6/21	6/26	6/29	7/1	7/2	7/3	7/5	7/15	7/16	7/26	7/27	7/28	8/10	8/11	9/23	9/24
0:00:00	3		7.4	12.2	1.4	0	10.6	37.6	2.8	18.6	0.8	3.2	30.6	0.6	5.6	7.4	0	0	0	0.2	1.8	18	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22:00:00		7.6	12	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:10:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:20:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.8	0				1.2	3.2		0.2
22:30:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6	21.6	3.2	30.4	4.6		7	0				1.2	3.2		0.2
22:40:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.4	4.6		7	0				1.4	3.2		0.2
22:50:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7	0				1.4	3.2		0.2
23:00:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7.2	0				1.4	3.2		0.2
23:10:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:20:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:30:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:40:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.9	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:50:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	32	21.6	3.2	30.6	4.6	1.4	7.4	0	0	0	10	1.4	3.2		0.2

Gambar 4. Sampel Data Curah Hujan yang Telah Mengalami Pengisian Data Kosong Tahap II (Merah Muda: Data Belum Dapat Dipulihkan, Hijau: Data Hasil Pemulihan) (Sumber: data diolah)

Pengisian Data Kosong Tahap II. Pengisian data kosong tahap II adalah pengisian data kosong pada jam 00.00 UTC berdasarkan data hujan sebelumnya antara jam 22.00 s.d 23.50 UTC menggunakan sintaks *ffill* dan pengisian data kosong pada jam 23.50 UTC berdasarkan data hujan 00.00 UTC hari selanjutnya menggunakan sintaks *bfill*. Beberapa data dapat dipulihkan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4 pada kolom yang berwarna hijau.

Pengisian Data Kosong Tahap III. Tahap akhir pengisian data kosong adalah pengisian kembali pada jam 23.00 UTC berdasarkan data hujan pada jam 23.50 UTC yang telah dipulihkan pada tahap II sebelumnya menggunakan sintaks *bfill*. Beberapa data dapat dipulihkan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5 pada kolom yang berwarna hijau.

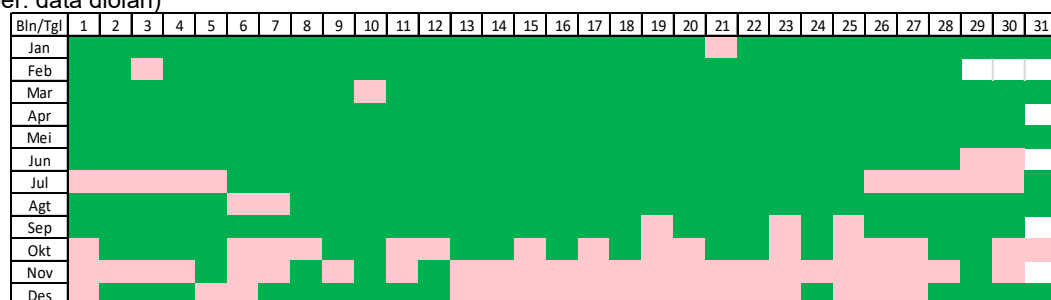
Analisis Sebelum dan Sesudah Pengisian Data Kosong. Sejauh ini pengisian data kosong telah berhasil dilakukan dan menyisakan beberapa data yang tidak dapat dipulihkan. Gambar 6 menampilkan kondisi data mentah sebelum dilakukannya pengolahan menggunakan Python. Dapat dilihat kondisi data awal menunjukkan ada banyak data yang hilang secara kontinyu. Terutama pada November dan Desember secara berturut-turut data pada jam utama (23.00 UTC) tidak terekam. Jika berdasarkan pada kriteria yang ditetapkan Zhang dkk dalam Ocampo-

Marulanda dkk (2021) [9] maka data bulanan Juli, Oktober, November dan Desember tidak akan dihitung sehingga data tahun 2021 pun tidak akan digunakan. Jika berdasarkan aturan WMO [10] maka hanya bulan April dan Mei saja yang dapat digunakan. Hal ini sangat disayangkan mengingat kekosongan data terjadi hanya pada jam penentu yakni 23.00 UTC saja namun masih terdapat data pada rentang waktu 1 jam sebelum dan setelahnya. Setelah dilakukan pengolahan dan pemulihan data, kuantitas data menjadi semakin membaik seperti yang ditampilkan Gambar 7.

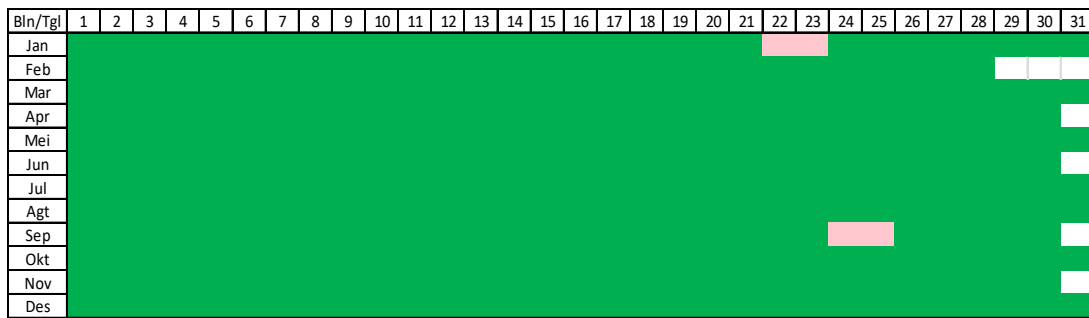
Gambar 7 membuktikan data hilang pada jam 23.00 UTC dapat dipulihkan secara maksimal dengan keberadaan data pada rentang 22.00 s.d 00.00 UTC. Dalam perhitungan total harian, kehilangan data di jam 23.00 UTC dalam 1 hari akan menyebabkan kehilangan data curah hujan harian dalam 2 hari. Contoh kasus pada tanggal 21 Januari 2021 (Gambar 6) hilang 1 hari saja akan tetapi setelah dipulihkan (Gambar 7) data *missing* menjadi 2 hari yakni tanggal 22 dan 23 Januari. Hal ini disebabkan oleh total harian dihitung berdasarkan data jam 23.00 UTC ditambah dengan selisih hujan 23.00 UTC dan 00.00 UTC hari sebelumnya dan dicatat di hari pengukuran. Oleh sebab itu dalam mengkonversi hujan ARG dari zona waktu standar UTC menjadi zona waktu lokal WITA ada pergeseran tanggal selama 1 hari.

Time	1/21	1/22	2/3	2/4	3/10	3/18	6/13	6/21	6/26	6/29	7/1	7/2	7/3	7/5	7/15	7/16	7/26	7/27	7/28	8/10	8/11	9/23	9/24
0:00:00	3		7.4	12.2	1.4	0	10.6	37.6	2.8	18.6	0.8	3.2	30.6	0.6	5.6	7.4	0	0	0	0.2	1.8	18	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
22:00:00		7.6	12	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:10:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.6	0				1.2	3.2		0.2
22:20:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6						6.8	0				1.2	3.2		0.2
22:30:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.6	21.6	3.2	30.4	4.6		7	0				1.2	3.2		0.2
22:40:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.4	4.6		7	0				1.4	3.2		0.2
22:50:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7	0				1.4	3.2		0.2
23:00:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6	1.4	7.2	0	0	0	10	1.4	3.2		0.2
23:10:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.5	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:20:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:30:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.8	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:40:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	31.9	21.6	3.2	30.6	4.6		7.4	0				1.4	3.2		0.2
23:50:00		7.6	12.2	19.2	13	7.2	1	66.6	32	21.6	3.2	30.6	4.6	1.4	7.4	0	0	0	10	1.4	3.2		0.2

Gambar 5. Sampel Data Curah Hujan yang Telah Mengalami Pengisian Data Kosong Tahap III (Merah Muda: Data Tidak Dapat Dipulihkan, Hijau: Data Hasil Pemulihan)
(Sumber: data diolah)



Gambar 6. Kelengkapan Data Curah Hujan ARG Kapontori Tahun 2021 Hasil Unduhan di web www.awscenter.bmkg.go.id (Hijau: Ada Data, Merah Muda: Tidak Ada Data)
(Sumber: data diolah)



Gambar 7. Kelengkapan Data Curah Hujan ARG Kapontori Tahun 2021 Setelah Dilakukan Pengisian Data Kosong (Hijau: Ada Data, Merah Muda: Tidak Ada Data)
(Sumber: data diolah)

Metode imputasi tunggal walaupun sederhana tetapi sangat efektif digunakan untuk mengisi celah pada rangkaian data curah hujan ARG. Tabel 2 menunjukkan setelah proses imputasi tunggal pada *missing value*, kini hanya tersisa 4 data saja yang kosong atau sebesar 1.1% dari 21.4% *missing value* di awal. Hal ini berarti data ARG dapat dipulihkan hingga 20.3% atau dengan kata lain kelengkapan data curah hujan harian ARG Kapontori tahun 2021 naik menjadi 98.9%. Empat data yang tidak dapat dipulihkan ini memang sama sekali tidak memiliki data sepanjang jam 22.00 hingga 00.00 UTC hari berikutnya sehingga tidak ada data yang dapat digunakan untuk mengestimasi curah hujan hariannya.

Verifikasi Data Curah Hujan ARG. Untuk menunjukkan keakuratan pengisian data kosong yang dilakukan pada alat penakar hujan otomatis maka perlu dibandingkan dengan data dari alat penakar hujan konvensional. Gambar 8 memvisualisasikan data curah hujan alat otomatis dan konvensional dalam diagram kartesian sumbu x dan sumbu y. Gambar 8 menunjukkan titik-titik data membentuk pola garis lurus dari kiri bawah naik ke kanan atas yang berarti adanya hubungan yang linear dan positif antara kedua data sehingga jika data dari

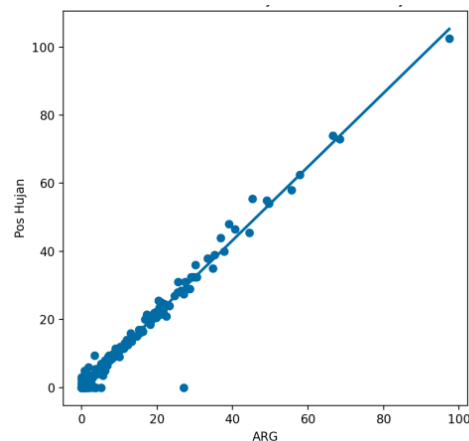
alat otomatis mengalami peningkatan maka data dari alat manual akan meningkat pula. Hal ini sudah sesuai mengingat kedua data adalah variabel yang sama jadi nilainya harus berkorelasi positif.

Tabel 3 menunjukkan keberhasilan proses pengolahan dan pemulihan data curah hujan harian ARG menggunakan bahasa pemrograman Python. Secara statistik, performa ARG dalam mengukur curah hujan di Kapontori sangat baik dengan nilai rata-rata eror (MAE) dan RMSE yang sangat rendah, sebaliknya nilai koefisien korelasi sangat tinggi dimana masing-masing bernilai 0.998 mm, 2.253 mm, dan 0.966. Nilai ini lebih baik dibandingkan sebelum dilakukannya pemulihan data. Dapat dilihat pada Tabel 3 sebelum pemulihan data, nilai MAE dan RMSE lebih tinggi sedangkan nilai koefisien korelasi sedikit

Tabel 2. Statistik Data Kosong Sebelum dan Setelah Dilakukan Pemulihan

Bulan	Sebelum Pemulihan		Setelah Pemulihan	
	Jumlah	%	Jumlah	%
Jan	1	3.2	2	6.5
Feb	1	3.6	-	-
Mar	1	3.2	-	-
Apr	-	-	-	-
Mei	-	-	-	-
Jun	2	6.7	-	-
Jul	10	32.3	-	-
Agt	2	6.5	-	-
Sep	3	10.0	2	6.7
Okt	16	51.6	-	-
Nov	25	83.3	-	-
Des	17	54.8	-	-
Total	78	21.4	4	1.1

Sumber: data diolah



Gambar 8. Diagram *Scatterplot* Curah Hujan ARG vs Pos Hujan Kerjasama di Kapontori
(Sumber: data diolah)

Tabel 3. Hubungan Statistik Data Curah Hujan ARG dan Pos Hujan Kerjasama

Parameter Statistik	Sebelum Pemulihan	Setelah Pemulihan
MAE	1.141 mm	0.999 mm
RMSE	2.548 mm	2.254 mm
r	0.986	0.989
Slope	1.0906	1.0806

Sumber: data diolah

lebih rendah. Membaiknya akurasi setelah pemulihan sejalan dengan penelitian sebelumnya [12]. Rendahnya nilai eror dan tingginya korelasi mendukung klaim bahwa alat otomatis dapat dengan sangat baik dan memberikan kualitas data yang akurat dalam mengukur curah hujan [19, 20] sekalipun data tersebut telah direkonstruksi dengan metode pengisian data kosong.

Perlu dipahami bahwa adanya selisih dari perbandingan dua parameter yang sama adalah hal yang wajar dan tidak bisa dihindari karena berbeda jenis alat, metode pengukuran, dan lokasi yang juga tidak sama persis [21]. Selisih rata-rata (MAE) <1 mm yang diperoleh paska pemulihan data menandakan hasil yang sangat signifikan. Ditambah lagi nilai koefisien korelasi yang mendekati 1 semakin menguatkan hubungan linier data otomatis dan manual. Nilai ini mengungguli beberapa metode pengisian *missing data* yang dilakukan pada kajian-kajian terdahulu [22, 23, 24]. Keunggulan ini diyakini karena nilai-nilai yang hilang pada penelitian ini dibangun dari hasil rekaman datanya sendiri sementara penelitian lain dibangun melalui masukan data dari tempat lain [22, 23] ataupun dari alat pengukuran jenis lain [24].

Curah hujan ARG pada umumnya lebih rendah (*underestimate*) dari alat manualnya sebagai representasi nilai slope yang positif (lihat Tabel 3). Penelitian lain menemukan hal yang sama bahwa alat penakar hujan otomatis cenderung lebih *underestimate* [25]. Alat penakar hujan yang menggunakan *tipping bucket* seperti ARG rentan kehilangan besaran hujan karena bejana *tipping bucket* tidak berjungkit dengan baik terutama saat kejadian hujan lebat [20].

Keberhasilan pemulihan data kosong ini membuktikan bahwa data ARG dengan format akumulasi pada menit berikutnya sangat baik dan cocok karena memungkinkan penanganan sederhana pada data hilang dengan akurasi yang tinggi. Permasalahan jaringan yang bersifat sementara tidak akan menjadi permasalahan besar. Apalagi beberapa kasus jaringan bermasalah sering terjadi pada kondisi hujan lebat. Jika terjadi hujan lebat lalu jaringan eror maka ketika hujan telah berkurang atau reda, dan jaringan kembali membaik, data yang sebelumnya tidak terekam di web akan kembali merekam dengan nilai yang telah terakumulasi. Berbeda dengan tipe ARG yang menampilkan data *real* setiap 10 menit akan cenderung lebih rentan menghasilkan nilai harian yang jauh lebih rendah dari sebenarnya. Curah hujan harian ARG dengan tipe tersebut diperoleh dari

akumulasi curah hujan selama 24 jam penuh (dari jam 23.00 UTC s.d 23.00 UTC hari berikutnya). Gangguan 10 menit saja selama kejadian hujan maka akan kehilangan data *real* 10 menit tersebut. Apalagi kehilangan data yang lebih lama lagi maka nilai hariannya benar-benar tidak dapat digunakan.

Tipe ARG yang mengakumulasi curah hujannya ke menit berikutnya membutuhkan koneksi yang baik pada pukul 22.00 hingga 00.00 UTC (untuk wilayah zona waktu WITA) setiap harinya. Oleh karenanya perlu diperhatikan pemasangan alat penakar hujan otomatis ARG di lokasi yang selama rentang waktu tersebut memiliki jaringan yang baik. Telah diketahui bahwa banyak wilayah di Sulawesi Tenggara yang seringkali mengalami gangguan jaringan di waktu-waktu seragam setiap hari. Misalnya jaringan jelek setiap malam hari dan kembali membaik di pagi hari. Pemilihan lokasi yang pas akan menentukan ketersediaan data curah hujan itu sendiri.

4. Kesimpulan

Mengubah data curah hujan ARG dari periode 10 menit menjadi harian dan memulihkan kembali data curah hujan harian kosong menggunakan bahasa pemrograman Python telah berhasil dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan persentase *missing data* yang mulanya 21.4% kini tersisa 1.1% saja. Hasil uji validasi data setelah dipulihkan dibandingkan dengan data dari alat manual di lokasi yang sama menunjukkan nilai eror yang rendah (MAE=0.998 mm, RMSE=2.253 mm) dan korelasi yang sangat tinggi ($r=0.966$). Nilai-nilai ini lebih baik dibandingkan sebelum dilakukan pengisian data kosong. Keberhasilan ini secara tidak langsung membuktikan beberapa hal. Yang pertama bahwa alat otomatis dapat menghasilkan data yang akurat sehingga layak digunakan untuk menggantikan alat manual. Kedua bahwa pengisian data kosong dapat meningkatkan akurasi dan daya guna data. Ketiga bahwa data ARG dengan format akumulasi pada menit berikutnya sangat baik dan cocok karena memungkinkan penanganan sederhana pada data hilang dengan akurasi yang tinggi. Terakhir bahwa perlu diperhatikan pemasangan alat penakar hujan otomatis ARG di lokasi yang selama rentang waktu 22.00 s.d 00.00 UTC memiliki jaringan yang baik. Dengan semakin tingginya persentase kelengkapan data maka penggunaannya akan menjadi semakin luas sehingga memberikan lebih banyak manfaat terutama untuk kebutuhan analisis, prakiraan, pelayanan data, maupun penelitian.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada Pusdiklat BMKG atas diklat yang diberikan terkait bahasa pemrograman python dan bpk. Marjuki, M.Si selaku *coach* selama penyusunan laporan implementasi diklat tersebut.

Daftar Pustaka

- [1] BMKG. (2016). *Peraturan Kepala Badan Meteorologi Klimatologi Geofisika No. 4 Tahun 2016 tentang Pengamatan dan Pengelolaan Data Iklim di Lingkungan BMKG*. Retrieved from https://gawbkt.id/assets/jdih/Perka_nomor_4_2016.PDF.
- [2] Muita, R., Kucera, P., Aura, S., Muchemi, D., Gikungu, D., Mwangi, S., ... & Kamau, M. (2021). Towards Increasing Data Availability for Meteorological Services: Inter-Comparison of Meteorological Data from a Synoptic Weather Station and Two Automatic Weather Stations in Kenya. *American Journal of Climate Change*, 10(3), 300-316.
- [3] Salsabila, S. (2020). *Materi Modul Online Data Mining Praproses Data Sesi Online 6*. Retrieved from <https://lms-paralel.esaunggul.ac.id>.
- [4] Dong, Y., & Peng, C. Y. J. (2013). Principled missing data methods for researchers. *SpringerPlus*, 2, 1-17.
- [5] Jakobsen, J. C., Gluud, C., Wetterslev, J., & Winkel, P. (2017). When and how should multiple imputation be used for handling missing data in randomised clinical trials—a practical guide with flowcharts. *BMC medical research methodology*, 17(1), 1-10.
- [6] Alice, M. (2018). *Imputing missing data with R; MICE package*. Retrieved from <https://datascienceplus.com/imputing-missing-data-with-r-mice-package/>.
- [7] Scheffer, J. (2002). Dealing with missing data. *Research Letters in the information and Mathematical Sciences*, 3 (1), 153-160
- [8] Madley-Dowd, P., Hughes, R., Tilling, K., & Heron, J. (2019). The proportion of missing data should not be used to guide decisions on multiple imputation. *Journal of clinical epidemiology*, 110, 63-73.
- [9] Ocampo-Marulanda, C., Cerón, W. L., Avila-Diaz, A., Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Kayano, M. T., & Torres, R. R. (2021). Missing data estimation in extreme rainfall indices for the Metropolitan area of Cali-Colombia: An approach based on artificial neural networks. *Data in Brief*, 39, 107592.
- [10] World Meteorological Organization. (2017). *WMO guidelines on the calculation of climate normals*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization
- [11] Miró, J. J., Caselles, V., & Estrela, M. J. (2017). Multiple imputation of rainfall missing data in the Iberian Mediterranean context. *Atmospheric research*, 197, 313-330.
- [12] Mufliah, Pahlawan, R.Y. (2017). Perbandingan Teknik Interpolasi Berbasis R dalam Estimasi Data Curah Hujan Bulanan yang Hilang di Sulawesi. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 18(3), 107-111.
- [13] Papailiou, I., Spyropoulos, F., Trichakis, I., & Karatzas, G. P. (2022). Artificial Neural Networks and Multiple Linear Regression for Filling in Missing Daily Rainfall Data. *Water*, 14(18), 2892.
- [14] Van Buuren, S. (2018). *Flexible imputation of missing data second edition*. Vancouver, Canada :CRC press Taylor & Francis Group.
- [15] Zhang, Z. (2016). Missing data imputation: focusing on single imputation. *Annals of translational medicine*, 4(1), 1 - 8
- [16] Koop, D. (2021). *Advanced Data Management (CSCI 490/680)*. Retrieved from <https://faculty.cs.niu.edu/~dakoop/>
- [17] Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79-82.
- [18] Kurniawan, D. (2008). *Regresi Linier*. Retrieved from https://ineddeni.files.wordpress.com/2008/07/regresi_linier.pdf.
- [19] Risnayah, S. (2022). Uji Keakuratan Data Suhu Udara, Kelembaban Udara, Tekanan Udara, dan Curah Hujan dari Alat Automatic Weather Station terhadap Pengukuran Manualnya. *Megasains*, 13(2), 18-25
- [20] Wicaksana, H. S., & Putra, M. (2021). *Evaluasi Kinerja Automatic Weather Station Berdasarkan Pengamatan Paralel di Stasiun Meteorologi Kemayoran*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro (pp.59-64). Politeknik Negeri Jakarta, Indonesia
- [21] Xiaohui, W. Y. L. X. J. (2006). *Differences between automatic and manual meteorological observation*. TECO-2006-WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation. Geneva, Switzerland
- [22] Prawaka, F., Zakaria, A., & Tugiono, S. (2016). Analisis Data Curah Hujan yang Hilang Dengan Menggunakan Metode Normal Ratio, Inversed Square Distance, dan Rata-Rata Aljabar (Studi Kasus Curah Hujan Beberapa Stasiun Hujan Daerah Bandar Lampung). *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain* 4(3), 397-406.
- [23] Kurniawan, R. D. (2017). *Mengisi Data Hujan yang Hilang dengan Metode Autoregressive dan Metode Reciprocal dengan Pengujian Debit Kala Ulang (Studi Kasus di DAS Bakalan)*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- [24] Duarte, L. V., Formiga, K. T. M., & Costa, V. A. F. (2022). Comparison of Methods for Filling Daily and Monthly Rainfall Missing Data: Statistical Models or Imputation of Satellite Retrievals?. *Water*, 14(19), 3144.
- [25] Valík, A., Brázdil, R., Zahradníček, P., Tolasz, R., & Fiala, R. (2021). Precipitation measurements by manual and automatic rain gauges and their influence on homogeneity of long-term precipitation series. *International Journal of Climatology*, 41, E2537-E2552.

PREDIKSI KEJADIAN PETIR MENGGUNAKAN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METODE PERCEPTRON DENGAN INDEKS RADIOSONDE DI WILAYAH KABUPATEN KEPULAUAN TANIMBAR

THUNDERSTORM PREDICTIONS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK PERCEPTRON METHOD WITH RADIOSONDE INDICES IN TANIMBAR ISLAND REGENCY AREA

Indra^{1*}

¹Stasiun Meteorologi Mathilda Batlayeri, Jl. Harapan Saumlaki, Kabupaten Kepulauan Tanimbar, Maluku

^{*}E-mail: satinbrada@gmail.com

Naskah masuk: 1 Oktober 2023

Naskah diperbaiki: 15 Oktober 2023

Naskah diterima: 20 Oktober 2023

ABSTRAK

Berbagai penelitian diusahakan dalam menentukan metode prediksi kejadian petir, salah satunya dengan menggunakan data udara atas. Meskipun demikian, pemanfaatan nilai ambang batas stabilitas atmosfer sebagai patokan tidak selamanya berlaku sama untuk semua lokasi karena perbedaan karakteristik masing-masing wilayah. Dengan demikian, pendekatan yang lebih obyektif dan tepat diperlukan dalam melakukan prediksi kejadian petir, termasuk teknik penerapan jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network* / ANN). Dalam penelitian ini, ANN digunakan untuk memprediksi kejadian petir di wilayah Kabupaten Kepulauan Tanimbar. ANN masukan tidak hanya menggunakan data mentah berupa nilai indeks labilitas atmosfer, tetapi juga menggunakan olahan seleksi fitur yang mereduksi dimensi input data multivariat dengan meminimalisir lenyapnya data masukan, sehingga informasi sebagai data input yang baru hanya berfokus pada informasi utama dan menghilangkan ketergantungan linier antar fitur. Teknik ini dikenal sebagai Principal Component Analysis (PCA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa ANN dengan teknik PCA memiliki tingkat akurasi lebih besar dalam memprediksi kejadian petir di KKT.

Kata kunci: petir, akurasi, ANN, PCA

ABSTRACT

Various research efforts have been made to determine thunderstorm prediction methods, one of which involves using upper air data. However, the use of atmospheric stability threshold values as a reference does not always apply uniformly to all locations due to differences in the characteristics of each region. Therefore, a more objective and precise approach is needed in predicting thunderstorm events, including the application of artificial neural network (ANN) techniques. In this study, ANN method, is used to predict thunderstorm events in Tanimbar Island Regency Area. The ANN input not only relies on raw data in the form of atmospheric instability index values but also uses feature selection processing to reduce the dimensionality of multivariate input data, minimizing the loss of input data. This process focuses only on essential information and eliminates linear dependencies between features, a technique known as Principal Component Analysis (PCA). The research results indicate that ANN with PCA technique has a higher level of accuracy in predicting thunderstorm events in the Saumlaki region.

Keywords: *thunderstorm, accuracy, ANN, PCA*

1. Pendahuluan

Kepulauan Tanimbar secara geografis diapit oleh laut Banda dan laut Arafura, dimana kondisi ini menyebabkan pertumbuhan awan konvektif penghasil hujan di wilayah tersebut lebih cenderung dipengaruhi dari interaksi penguapan air laut terhadap fluida dinamis atmosfer. Hal ini menyebabkan wilayah tersebut rentan terkena bencana hidrometeorologi, karena pembentukan sel-sel badai cumulonimbus (Cb) di wilayah perairan laut lebih dominan mempengaruhi pembentukan cuaca berupa hujan dengan intensitas sedang hingga lebat terhadap Kepulauan Tanimbar [1].

Dampak yang ditimbulkan dari sel badai Cb dapat mengakibatkan hujan konvektif yang intens, banjir bandang, hingga angin kencang. Meskipun awan Cb tidak memiliki masa hidup yang lama, besarnya intensitas radiasi matahari yang membuat massa uap air mengalami penguapan lebih cepat di wilayah tropis disertai tingginya kandungan kelembaban relatif mendukung pembentukan sel badai baru yang dapat bertahan beberapa jam [2]. Kombinasi antara tingginya suhu dan kelembaban menciptakan kondisi yang mendukung pembentukan badai petir atau thunderstorm [3]. Kondisi ini menyebabkan badai berlangsung selama beberapa jam [4].

Dalam situasi atmosfer dengan ketinggian per level lapisan dan diikuti dengan laju penurunan suhu Γ yang memenuhi $\Gamma_m < \Gamma < \Gamma_d$, dimana $\Gamma_d = 9.8 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$ dan $\Gamma_m = 6.5 \text{ } ^\circ\text{C.km}^{-1}$ mewakili laju penurunan suhu adiabatik, parcel udara dijadikan acuan sebagai konsep yang merujuk pada suatu volume udara imajiner yang memiliki sifat-sifat tertentu, seperti suhu, tekanan, dan kelembaban [5]. Parcel ini berasal dari lapisan atmosfer yang berhubungan dengan permukaan bumi sekaligus mampu menjelaskan perubahan suhu dan kelembaban yang terjadi saat udara naik atau turun secara vertikal, dan berperan penting dalam perkembangan badai petir jika badai berkembang [5].

Selain itu, perubahan vertikal udara di atmosfer dipengaruhi oleh profil termodinamika suhu. Ketika suhu udara di lapisan atmosfer berbeda, udara yang lebih hangat karena pemanasan radiasi matahari cenderung naik karena menjadi lebih ringan daripada udara yang lebih dingin di sekitarnya. Inilah yang memicu pergerakan udara vertikal [6]. Sewaktu parcel dinaikkan vertikal, parcel mulai mendingin

karena masih dalam kondisi tidak jenuh dengan kelembaban.

Pada tahapan selanjutnya, suhu dalam parcel menjadi lebih rendah daripada lingkungannya. Saat parcel mencapai tingkat tertentu dan mengalami kondensasi, awan mulai terbentuk. Kondensasi ini menghasilkan pelepasan panas laten yang mempengaruhi suhu dan kondisi lingkungan sekitarnya. Parcel ini kemudian menjadi lebih hangat daripada lingkungannya, membuatnya menjadi lebih ringan dan naik dengan sendirinya. Kondisi ini dikenal sebagai ketidakstabilan bersyarat [5].

Kemudian, perlu diperhatikan jika terdapat faktor penting lainnya dalam pembentukan cuaca yaitu adveksi, proses perpindahan massa atau energi dalam fluida, seperti udara, yang terjadi bersamaan dengan aliran fluida itu sendiri. Dalam konteks cuaca, adveksi dapat mempengaruhi perubahan profil termodinamika antara awan (atau sistem cuaca) dan lingkungan sekitarnya. Ini berarti bahwa sifat-sifat seperti suhu dan kelembaban dapat berubah di daerah sekitar awan atau sistem cuaca karena perpindahan udara yang mengandung sifat-sifat tersebut, dan merupakan faktor kunci dalam proses terbentuknya badai petir [7].

Meninjau dari pernyataan-pernyataan tersebut, analisis terkait data indeks labilitas udara atas dari hasil pengamatan radiosonde menjadi hal utama dalam menjelaskan bagaimana kondisi cuaca di atmosfer, termasuk fenomena pembentukan badai petir. Berbagai indeks labilitas atmosfer yang sering digunakan sebagai acuan dalam memprediksi potensi terjadinya badai petir sebagian besar adalah parameter-parameter berupa KI, LI, SI, TT, CAPE menurut berbagai sumber referensi penelitian terkait indeks yang umum cenderung lebih banyak dipakai di wilayah Indonesia [6,8,9,10]. Selain itu, downdraft (angin yang bertiup turun dari awan badai) juga berpengaruh signifikan. Jika downdraft lemah, maka kondisi di atmosfer menjadi tidak stabil yang mendorong proses terbentuknya sel badai penghasil thunderstorm. Potensi hambatan untuk mengukur potensi energi yang digunakan udara panas dan lembab agar naik secara vertikal digunakan dalam pengukuran instabilitas atmosfer [11], yang merupakan kategori indeks dari parameter *convective inhibition* (CIN).

Pada penelitian yang dilakukan Richard, prediksi probabilitas terjadinya thunderstorm dari data indeks rason diimplementasikan

dengan pendekatan jaringan syaraf tiruan [9]. Jaringan syaraf tiruan (*Artificial Neural Network* / ANN) adalah sebuah model komputasi yang terinspirasi oleh struktur dan fungsi otak manusia. Sedangkan, penelitian Ajina menjelaskan pemodelan dengan pendekatan ANN yang digunakan pada beberapa parameter cuaca terbukti dapat meningkatkan keakuratan hasil prediksi [12]. Salah satu pendekatan metode jaringan syaraf tiruan yang digunakannya yaitu metode Perceptron. Perceptron adalah salah satu bentuk dasar jaringan syaraf tiruan yang dipakai untuk memodelkan masalah klasifikasi biner (ada atau tidak terjadinya suatu event yang diprediksi) [5]. Merujuk dari keenam parameter indeks rason yang disebutkan sebelumnya, data indeks rason berupa KI, LI, SI, TT, CAPE, dan CIN akan digunakan dalam penelitian ini sebagai data masukan sekaligus data pelatihan untuk model ANNP (*Artificial Neural Network Perceptron*) untuk mendeteksi kemungkinan terjadi atau tidak terjadinya petir.

Dalam hal ini, data masukan untuk pelatihan ANNP tidak hanya menggunakan data mentah berupa nilai indeks labilitas atmosfer, tetapi juga menggunakan olahan seleksi fitur yang mereduksi dimensi input data multivariat dengan meminimalisir lenyapnya data masukan, sehingga informasi sebagai data input yang baru hanya berfokus pada informasi utama dan menghilangkan ketergantungan linier antar fitur. Teknik ini dikenal sebagai *Principal Component Analysis* (PCA) [2]. Dengan demikian, pendekatan lain yang bertujuan untuk bisa lebih memaksimalkan data hasil prediksi dari model ANN metode perceptron yakni melibatkan modifikasi terhadap metode ANNP menggunakan teknik PCA. Tujuan dari modifikasi ini adalah untuk menilai apakah penggunaan PCA dapat meningkatkan tingkat keakuratan prediksi cuaca ekstrim, khususnya dalam memprediksi thunderstorm, berdasarkan data indeks labilitas udara atas di area Kabupaten Kepulauan Tanimbar [2].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan data indeks labilitas udara yang diperoleh dari observasi udara atas Stasiun Meteorologi Mathilda Batlayeri yang berlokasi di kota Saumlaki, Kabupaten Kepulauan Tanimbar selama tiga tahun, yakni dari periode tahun 2020 hingga 2022 pada pukul 00 UTC dan 12 UTC. Menimbang data ini bersumber dari satu lokasi dalam wilayah Kabupaten Kepulauan Tanimbar dan dalam lain hal, pembacaan radiosonde

dapat mencakup wilayah dalam radius 100 km dari lokasi pelepasan balon radiosonde dan sampai ketinggian hingga lapisan troposfer, data radiosonde yang digunakan dalam penelitian ini merupakan representasi dari kondisi atmosferik dalam wilayah Kabupaten Kepulauan Tanimbar. Kemudian, pengumpulan data dilakukan secara otomatis menggunakan skrip Python yang mampu menghasilkan data indeks labilitas udara atas ke dalam bentuk dataframe dari website Wyoming, yang dapat diakses melalui: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> menggunakan WMO ID Stasiun Meteorologi Mathilda Batlayeri, 97900. Data-data indeks radiosonde yang diakses meliputi parameter indeks KI, LI, SI, TT, CAPE, dan CIN dari observasi data udara atas Stasiun Meteorologi Mathilda Batlayeri sebagai data pelatihan. Untuk lebih jelasnya, perhitungan dari masing-masing indeks parameter dapat dilihat sebagai berikut :

Indeks K (KI) adalah ukuran untuk memprediksi potensi awan badai atau awan Cumulonimbus [10]. Indeks K mengukur potensi peristiwa badai petir berdasarkan penyusutan suhu vertikal lingkungan, kandungan uap air yang terdapat dalam lapisan rendah, dan kandungan uap air yang merambat secara vertikal. Nilai KI dihitung berdasarkan nilai suhu lapisan 850, 700, dan 500 mb, serta titik embun untuk lapisan 850 dan 700 mb. Semakin tinggi kelembaban dan perbedaan suhu yang lebih besar dari 850 - 500, semakin tinggi KI dan potensi konveksinya. Selain untuk memprediksi peristiwa badai petir potensial, nilai indeks K juga penting untuk memprediksi peristiwa hujan deras. Nilai indeks K diwakili oleh persamaan :

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + (Td_{850} - \Delta_{700})$$

Di mana T_{850} adalah suhu pada level 850 mb ($^{\circ}\text{C}$); T_{500} adalah suhu pada level 500 mb ($^{\circ}\text{C}$); Td_{850} adalah suhu titik embun pada level 850 mb ($^{\circ}\text{C}$); Δ_{700} adalah perbedaan antara suhu udara dan suhu titik embun pada level 700 mb ($^{\circ}\text{C}$).

Lifted Index adalah nilai yang diperoleh dari selisih antara suhu parsel udara yang diangkat secara adiabatik dan suhu udara lingkungan pada lapisan 500 mb pada tinggi tekanan p dalam troposfer [6,8,9,10]. LI dapat dihitung dengan persamaan :

$$LI = T_{lp} - T_{gp}$$

Di mana T_{lp} adalah suhu udara lingkungan pada lapisan 500 hPa (dalam $^{\circ}\text{C}$) dan T_{gp}

adalah suhu parsel udara pada lapisan 500 hPa yang mengalami proses adiabatik jenuh (dalam °C).

Indeks Showalter digunakan untuk menggambarkan ketidakstabilan udara di troposfer tengah, yang berada antara tingkat 850 dan 500 hPa [6,8,9]. Nilai indeks didasarkan pada jumlah uap air dan energi yang terkandung dalam lapisan 850 dan 500 hPa. Indeks SI dituliskan dalam persamaan :

$$SI = T_{500} - T_X$$

Di mana T_{500} adalah suhu udara lingkungan pada lapisan 500 hPa (dalam °C), dan T_X adalah suhu parsel udara pada lapisan 500 hPa yang mengalami proses adiabatik jenuh (dalam °C). Nilai indeks negatif mengindikasikan stabilitas dan nilai indeks positif mengindikasikan ketidakstabilan.

Indeks Total-Totals digunakan untuk mengidentifikasi area potensial perkembangan badai petir. Total-Totals adalah jumlah Vertikal Total (VT) dan Cross Total (CT) [6, 9, 10]. VT menggambarkan laju penyusutan suhu antara dua permukaan tekanan konstan, yaitu selisih antara suhu pada lapisan 850 dan 500 hPa. CT menggambarkan kombinasi perhitungan antara kelembaban di lapisan bawah dan suhu, yaitu selisih antara suhu titik embun pada lapisan 850 hPa dan suhu pada lapisan 500 hPa. Indeks TT dapat ditentukan seperti dalam persamaan :

$$TT = (T_{850} - T_{500}) + (Td_{850} - T_{500})$$

Di mana T_{850} adalah suhu udara yang diukur oleh radiosonde pada ketinggian 850 hPa (°C); T_{500} adalah suhu udara yang diukur oleh radiosonde pada ketinggian 500 hPa (°C); Td_{850} adalah suhu titik embun pada ketinggian 850 hPa (°C)

CAPE (*Convective Available Potential Energy*) adalah energi total dari gaya apungan dalam kolom udara yang tersedia untuk mengangkat paket udara [9,10,11]. CAPE terkait dengan kecepatan vertikal potensial maksimum dalam updraft. Jadi CAPE cukup baik untuk menandai ketidakstabilan potensial atmosfer. Nilai CAPE dihitung dengan persamaan :

$$CAPE = \int_{z_f}^{z_n} g \left(\frac{T_{parcel} - T_{env}}{T_{env}} \right) dz$$

Di mana z_f adalah tingkat Konveksi Bebas (LFC) dalam meter (m) dan z_n adalah tingkat

keseimbangan dalam meter (m). T_{parcel} adalah suhu udara parsel (°C) dan T_{env} adalah suhu udara lingkungan (°C). g adalah gravitasi bumi (m/s^2) dan dz adalah selisih ketinggian (m).

Untuk parsel udara yang memiliki CAPE positif, *Convective Inhibition* (CIN) mewakili area negatif pada diagram termodinamika. Area negatif ini biasanya muncul karena adanya penutup, atau jumlah energi kinetik yang harus ditambahkan pada parsel untuk memungkinkannya mencapai *Level of Free Convection* (LFC) [5,11]. Meskipun faktor lain mendukung perkembangan konveksi, jika hambatan konvektif cukup besar, konveksi dalam skala besar tidak akan terbentuk. Hambatan konvektif dinyatakan (analog dengan CAPE) sebagai berikut:

$$CIN = - \int_{p_i}^{p_f} Rd(T_{vp} - T_{ve}) d \ln p$$

Di mana p_i adalah tekanan pada tingkat di mana parsel berasal, p_f adalah tekanan pada LFC, Rd adalah konstanta gas khusus untuk udara kering, T_{vp} adalah suhu virtual parsel terangkat, dan T_{ve} adalah suhu virtual lingkungan. Diasumsikan bahwa lingkungan berada dalam keseimbangan hidrostatik dan tekanan parsel sama dengan tekanan lingkungan. Suhu virtual digunakan untuk parsel dan lingkungan untuk memperhitungkan efek kelembaban pada kerapatan udara.

Sebagai informasi, jaringan syaraf tiruan dengan pendekatan perceptron menerima input numerik dan menghasilkan output berdasarkan pembobotan input dan pengaktifan menggunakan fungsi tertentu, dengan perhitungan :

1. Perhitungan input bobot : Setiap input (x) dikalikan dengan bobot yang sesuai (w), kemudian hasilnya dijumlahkan untuk semua input. Ini memberikan nilai hasil penjumlahan yang akan digunakan untuk mengaktifkan fungsi aktivasi.

$$z = \sum_{i=1}^n (x_i \times w_i) + b$$

2. Fungsi aktivasi : Setelah menghitung nilai hasil penjumlahan, hasilnya diteruskan ke fungsi aktivasi (f) untuk menghasilkan output. Fungsi aktivasi mengubah nilai hasil

penjumlahan menjadi bentuk yang lebih terstruktur.

$$y = f(z)$$

Contoh fungsi aktivasi yang umum digunakan adalah fungsi sigmoid yang dinyatakan ke dalam bentuk persamaan :

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

Fungsi Heaviside (Step Function) juga dapat digunakan sebagai fungsi aktivasi yang sederhana :

$$f(z) = \begin{cases} 1, & \text{jika } z > \text{ambang aktivasi} \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases}$$

Selain itu, pengurangan dimensi fitur adalah langkah umum dalam pra-pemrosesan data untuk pengenalan pola, klasifikasi, dan kompresi. Salah satu metode terkenal dalam hal ini adalah Analisis Komponen Utama (*Principal Component Analysis* / PCA). Namun, PCA memiliki kelemahan karena menggunakan semua fitur dalam proyeksi ke ruang dimensi yang lebih rendah. Untuk mengatasi hal ini, diperkenalkanlah metode baru bernama Analisis Fitur Utama (*Principal Feature Analysis* / PFA), yang memilih subset fitur penting dengan kriteria serupa PCA. PFA digunakan dalam pemilihan fitur utama dari indeks Instabilitas Radiosonde di area tertentu. Dalam pemanfaatan matriks korelasi R dari vektor acak x berdimensi N , dimensi data bisa dikurangi menjadi M (dengan $M < N$) melalui enam langkah Analisis Komponen Utama. Dengan demikian, konsep pengurangan dimensi dalam pemrosesan data dapat diterapkan dalam pemodelan jaringan syaraf tiruan seperti perceptron dengan pendekatan yang lebih canggih seperti PCA atau PFA [2].

Dengan matriks korelasi R dari vektor acak x berdimensi N , dimensi bisa dikurangi menjadi M (dengan $M < N$) melalui enam langkah Analisis Komponen Utama :

1. Menghitung Mean : Hitung mean dari setiap fitur dalam dataset.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}$$

2. Normalisasi Data : Normalisasi data dengan mengurangi nilai rata-rata dari setiap fitur, sehingga data memiliki mean nol.

$$x_{ij}^* = x_{ij} - \mu_i$$

3. Menghitung Matriks Kovariansi : Hitung matriks kovariansi dari data yang dinormalisasi. Matriks kovariansi memberikan informasi tentang hubungan antara setiap pasangan fitur.

$$C = \frac{1}{N-1} X^* X^{*T}$$

4. Menghitung Nilai Eigen dan Vektor Eigen : Hitung nilai eigen (nilai yang mengukur variasi) dan vektor eigen (arah dari variasi) dari matriks kovariansi. Nilai eigen menggambarkan seberapa besar variasi yang dijelaskan oleh setiap komponen utama.

$$C v_i = \lambda_i v_i$$

5. Pilih Komponen Utama : Pilih M komponen utama dengan nilai eigen terbesar. Ini akan memungkinkan pemeliharaan sebagian besar variasi dalam dataset asli dengan dimensi yang lebih rendah.

$$\text{Variansi} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i}$$

6. Proyeksi Data : Proyeksikan data ke ruang yang didefinisikan oleh komponen utama yang dipilih. Ini melibatkan perhitungan produk skalar antara data dan vektor eigen.

$$y_{ij} = x_{ij}^* \cdot v_i$$

Dimana N adalah jumlah sampel dalam dataset; M adalah jumlah komponen utama yang dipilih; x_{ij} adalah nilai fitur ke- i dari sampel ke- j ; μ_i adalah rata-rata dari nilai fitur ke- i dalam seluruh dataset; x_{ij}^* adalah nilai fitur yang dinormalisasi ke- i dari sampel ke- j ; C adalah matriks kovariansi dari data yang dinormalisasi; v_i adalah vektor eigen ke- i dari matriks kovariansi; λ_i adalah nilai eigen ke- i yang mengukur variasi yang dijelaskan oleh komponen eigen tersebut; dan y_{ij} adalah nilai fitur terproyeksi ke- i dari sampel ke- j dalam ruang komponen utama.

PCA membantu dalam mengurangi dimensi data dan mengidentifikasi pola-pola penting dalam data dengan menghitung nilai eigen dan vektor eigen dari matriks kovariansi. Variabel dan rumus di atas digunakan dalam perhitungan PCA untuk menghasilkan komponen utama yang menggambarkan variasi dalam data.

Masuk pada tahapan selanjutnya, data yang dikumpulkan akan tersimpan ke dalam format file Excel, yang nantinya digunakan sebagai data input dan data pelatihan dalam model ANNP. Pembentukan model ANNP melibatkan pendekatan perhitungan perceptron, dimana skrip penyusun model telah terintegrasi dengan metode PCA dan menggunakan enam komponen analisis sesuai jumlah parameter indeks yang diperlatih dengan data target thunderstorm sesuai waktu kejadian. Model ANNP ini menggunakan Python versi 3.11, dengan melibatkan algoritma skrip untuk pelatihan data, serta memanfaatkan library `sklearn` `decompose` PCA sebagai perbandingan antara data tunggal dengan data yang dimodifikasi menggunakan metode PCA.

Mengacu pada pembacaan data pada pukul 00 dan 12 UTC, pengelompokan data terbagi dua, merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Habib dan Bhattacharya, jaringan saraf tiruan telah digunakan untuk mendeteksi probabilitas terjadinya badai petir (thunderstorm) berdasarkan data indeks labilitas udara dari radiosonde untuk jangka waktu 10 hingga 12 jam ke depan [4,8]. Kedua bagian menjalani proses perhitungan ANNP dan ANNP-PCA (ANNP yang sudah dimodifikasi pelatihan data trainingnya dengan teknik PCA). Setelah melalui fase pelatihan data training, pendekatan yang sama diterapkan untuk menguji akurasi data selama tiga bulan di tahun terakhir (Oktober sampai Desember tahun 2020), baik pada pembagian ANNP maupun ANNP-PCA. Tingkat akurasi data akan dianalisis guna menilai sejauh mana persentase keakuratan ANNP dan ANNP-PCA dalam mendeteksi keberadaan dan ketiadaan thunderstorm.

Dari berbagai penjelasan yang telah dibahas, perumusan masalah dalam penelitian ini mencakup dua aspek yang berfokus pada evaluasi dan perbaikan prediksi cuaca ekstrem berupa kejadian thunderstorm di wilayah Kabupaten Kepulauan Tanimbar. Pertama, masalah terkait sejauh mana tingkat akurasi model ANNP dengan data indeks radiosonde terhadap kejadian thunderstorm di wilayah Kabupaten Kepulauan Tanimbar. Kedua, bagaimana perbandingan tingkat akurasi antara ANNP tunggal dan modifikasi ANNP-PCA dalam memprediksi data indeks radiosonde di wilayah Kabupaten Kepulauan Tanimbar. Dengan demikian, tujuan penelitian adalah untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang potensi peningkatan prediksi cuaca ekstrem dengan menerapkan modifikasi teknik analisis pada metode prediksi yang ada.

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 1. Perbandingan Tingkat Akurasi Performa ANNP dan ANNP-PCA

	ANNP	ANNP-PCA
00 UTC	46.9697 %	78.7879 %
12 UTC	86.7647 %	57.3529 %
Overall	66.8672 %	68.0704 %

Sumber : data diolah

Berdasarkan analisis hasil perhitungan keluaran dari model ANNP dan ANNP-PCA pada jam 00 UTC dan 12 UTC dalam menentukan probabilitas terjadinya atau tidak terjadinya petir pada tabel di atas, terlihat bahwa hasil pembacaan ANNP yang dimodifikasi dengan PCA (ANNP-PCA) menunjukkan tingkat akurasi yang lebih unggul dibandingkan dengan model ANNP tunggal. Meskipun selisih akurasi tidak sangat mencolok, namun pada rentang persentase akurasi antara 66 hingga 68%, ANNP-PCA berhasil menunjukkan performa lebih baik.

Dalam konteks yang lebih spesifik, ketika merujuk pada pembacaan ANNP pada jam 00 UTC, tingkat akurasi hanya mencapai 47%, sedangkan ANNP-PCA mencapai 79%. Namun, pola ini memiliki hubungan yang berbanding terbalik pada jam 12 UTC, dimana ANNP tunggal memiliki akurasi sebesar 87%, sedangkan ANNP-PCA memiliki akurasi 57%. Secara sekilas, terlihat bahwa pendekatan modifikasi ANNP-PCA lebih efektif saat diterapkan pada waktu pagi, sedangkan ANNP tunggal lebih cocok digunakan pada malam hari. Informasi lebih rinci tentang klasifikasi kejadian terjadinya atau tidak terjadinya petir pada tiap jam akan diulas lebih mendalam melalui tabel yang akan disajikan berikut ini :

Tabel 2. Perbandingan Tingkat Akurasi Berdasarkan Klasifikasi Terjadi atau Tidak Terjadinya Petir pada Performa ANNP dan ANNP-PCA

		ANNP	ANNP-PCA
00 UTC	Ada TS	66.6667 %	6.6667 %
	Tanpa TS	41.1764 %	100 %
12 UTC	Ada TS	0 %	66.6667 %
	Tanpa TS	100 %	55.9322 %

Sumber : data diolah

Ketika melihat hasil pada jam 00 UTC, terungkap bahwa model ANNP tunggal mampu memprediksi terjadinya petir dengan akurasi hingga 67%. Di sisi lain, model ANNP-PCA memiliki tingkat akurasi yang jauh lebih rendah hanya sebesar 6 hingga 7 % dalam memprediksi terjadinya petir, tetapi berhasil mencapai akurasi 100% dalam memprediksi ketiadaan petir, masih lebih tinggi dibandingkan

ANNP tunggal yang persentase akurasi lebih rendah senilai 42%.

Namun, hasil pada jam 12 UTC menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik dengan data output pada jam 00 UTC sebelumnya. ANNP-PCA mencapai tingkat akurasi hingga 67% dalam memprediksi terjadinya petir, sementara ANNP biasa tidak mampu menunjukkan potensi terjadinya petir. Dalam memprediksi ketiadaan petir, ANNP menunjukkan akurasi yang lebih besar hingga 100%, dibandingkan ANNP-PCA dengan tingkat akurasi 56%.

4. Kesimpulan

Dari perbandingan performa antara model Artificial Neural Network Perceptron (ANNP) dan model ANNP yang dimodifikasi dengan Principal Component Analysis (ANNP-PCA), dapat disimpulkan bahwa di wilayah Kabupaten Kepulauan Tanimbar pada pagi hari, ANNP-PCA menunjukkan performa yang lebih baik dalam memprediksi ketiadaan terjadinya petir daripada ANNP, meskipun ANNP biasa lebih baik digunakan untuk memprediksi terjadinya petir dengan tingkat akurasi yang jauh lebih signifikan dibandingkan ANNP-PCA.

Selain itu, sewaktu malam hari, model ANNP-PCA dianggap lebih mampu menunjukkan keunggulan dalam memprediksi terjadinya petir dibandingkan kemampuan ANNP tunggal yang bahkan sama sekali tidak mampu menunjukkan potensi terjadinya petir, dengan kemampuan ANNP yang masih mengungguli ANNP-PCA dalam penentuan tidak terjadinya petir. Namun, penting mempertimbangkan faktor-faktor lainnya, baik skala lokal dan regional yang memengaruhi proses atmosferik dalam pembentukan kondisi cuaca di Kepulauan Tanimbar guna meningkatkan akurasi prediksi petir dan peluang keberhasilan yang lebih baik.

Daftar Pustaka

- [1] Indra. (2019). *Analisis Dampak Siklon Tropis Lili pada Kondisi Cuaca di Saumlaki selama 07 – 11 Mei 2019*. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta.
- [2] Putra, A. W., & Lursinsap, C. (2014). *Cumulonimbus Prediction using Artificial Neural Network Back Propagation with Radiosonde Indexes*. Prosiding Seminar Nasional Penginderaan Jauh (pp. 153-165). Jakarta
- [3] Ferdaus, J., Quadir, D. A., Alam, M. S., Panda, S. K., Das, S., Ahasan, M. N., Rabbani, K. M. G., & Shuvo, S. D. (2021). Prediction of Thunderstorms based on Atmospheric Instability Indices over Bangladesh using WRF-ARW Model. *Jalawaayu*, 1(2), 21–37. doi.org/10.3126/jalawaayu.v1i2.41008
- [4] Bhattacharya, S., & Bhattacharyya, H. C. (2023). A comparative study of severe thunderstorm among statistical and ANN methodologies. *Scientific Reports* 13 (1), 12038. doi.org/10.1038/s41598-023-38736-z
- [5] Collins, W. G., & Tisot, P. (2015). *Thunderstorm Predictions Using Artificial Neural Networks*. Sao Paulo, Brazil : Artificial Neural Networks - Models and Applications doi.org/10.5772/63542
- [6] Agroho, F. L., Syahreza, S., & Sugiyanto, D. (2021). Analysis of the rainfall event in 2018-2019 using the air stability index method at the Meteorological Station of Sultan Iskandar Muda Banda Aceh. *Journal of Physics: Conference Series*, 1882 (2021) 012023 doi:10.1088/1742-6596/1882/1/012023
- [7] Savre, J. (2020). Formation and maintenance of subsiding shells around non-precipitating and precipitating cumulus clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(735), 728-745. doi.org/10.1002/qj.3942
- [8] Habib, A.H.A., Bangalino, E., & Ryan, M. (2021). *Rancang Bangun Model Artificial Neural Network untuk Prediksi Probabilistik Kejadian Thunderstorm di Wilayah Manado*. Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer 2020 Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/353654961>
- [9] Putra et al. (2021). *Cumulonimbus cloud prediction based on machine learning approach using radiosonde data in Surabaya, Indonesia*. The 5th Internasional Conference on Climate Change 2020, IOP Conf. Series:Earth Environmental Science 724(2021), 012047. doi.org/10.1088/1755-1315/724/1/012047
- [10] Yasa, I. M. T., Yuliara, I. M., & Sumaja, K. (2023). Correlation of Atmospheric Lability Index to Vertikal Wind Shear at I Gusti Ngurah Rai Airport. *Indonesian Physical Review*, 6(1), 124–131. doi.org/10.29303/ipr.v6i1.188
- [11] Market, P., Grempler, K., Sumrall, P., & Henson, C. (2019). Analysis of Severe Elevated Thunderstorms over Frontal Surfaces Using DCIN and DCAPE. *Atmosphere*, 10(8), 449. doi.org/10.3390/atmos10080449
- [12] Ajina, A., Christiyan, J., Bhat, D., & Saxena, K. (2023). Prediction of weather forecasting using artificial neural networks. *Journal of Applied Research and Technology*, 21(2), 205-211. doi.org/10.22201/icat.24486736e.2023. 21.2.1698

IDENTIFIKASI KONSENTRASI CO, CO₂, NO₂, SO₂, DAN PM₁₀ YANG TERUKUR DI STASIUN GAW BUKIT KOTOTABANG SELAMA MUDIK LEBARAN TAHUN 2019-2023

Identification of CO, CO₂, NO₂, SO₂, and Particulate Matter (PM₁₀) Measured at GAW Bukit Kototabang Station during the Eid Al-Fitr from 2019 to 2023.

Iman Ahmadi Hardiyan^{1*} dan Kiagus Ardi Zulistyan²

^{1,2}Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, Sumatera Barat

*E-mail: iman.hardiyan@bmkgo.id

Naskah masuk: 2 Oktober 2023

Naskah diperbaiki: 12 Oktober 2023

Naskah diterima: 22 Oktober 2023

ABSTRAK

Sumatera Barat merupakan salah satu provinsi yang menjadi tujuan mudik lebaran para perantau di Indonesia. Selain itu, Sumatera Barat juga menjadi tujuan liburan para turis dan wisatawan saat libur lebaran. Sehingga, aktivitas penduduk dan volume kendaraan akan meningkat yang berdampak pada meningkatnya kondisi polusi udara yang ada. Terlebih lagi, dampak polusi udara sangat signifikan terhadap kondisi kesehatan pernapasan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan kondisi konsentrasi gas Karbon monoksida (CO), Karbon dioksida (CO₂), Nitrogen dioksida (NO₂), Sulfur dioksida (SO₂), dan polutan PM₁₀ di udara selama periode lebaran tahun 2019-2023 di Sumatera Barat. Waktu yang digunakan adalah H-10 setelah lebaran dan H+10. Data yang digunakan hasil dari observasi Stasiun GAW Bukit Kototabang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa aktivitas lebaran berpengaruh terhadap kenaikan konsentrasi CO. Konsentrasi CO₂ selalu mengalami kenaikan namun tidak hanya dipengaruhi oleh pemudik pada periode penelitian. Sedangkan untuk konsentrasi PM₁₀ cenderung dipengaruhi oleh faktor ENSO. Namun, untuk parameter SO₂ dan NO₂ tidak mengalami perubahan sama sekali selama periode tersebut. Kondisi dari seluruh parameter selama periode 2019-2023 masih dalam kategori baik.

Kata Kunci : Mudik Lebaran, Konsentrasi polutan, Sumatera Barat

ABSTRACT

West Sumatra is a province that serves as a location for the Eid homecoming among migrants in Indonesia. In addition, West Sumatra also serves as a popular tourist destination during the Eid holidays. Therefore, the rise in population activity and vehicle volume is expected to result in air pollution escalation levels. Furthermore, the influence of air pollution on respiratory health disorders is also substantial. Hence, the primary objective of this study is to ascertain alterations in the atmospheric concentrations of Carbon monoxide, Carbon dioxide, Nitrogen dioxide, Sulphur dioxide, and PM₁₀ pollutants over the Eid period from 2019 to 2023 in the region of West Sumatra. The designated time intervals are from 10 days before until 10 days after the Eid. The data utilized in this study is derived from observations conducted at the Global Atmosphere Watch Bukit Kototabang Station. The findings of this study indicate that the observance of Eid activities has a discernible impact on the elevation of concentrations of Carbon monoxide. The concentration of CO₂ consistently increases but is not solely influenced by travelers during the research period. Meanwhile, the PM₁₀ concentrations tend to be altered by ENSO conditions. However, there was no significant change seen in the SO₂ and NO₂ parameter within the specified time frame. The parameters conditions during 2019-2023 remain within the favourable category.

Keywords: Eid Homecoming, Pollutant Concentrations, West Sumatra

1. Pendahuluan

Mudik merupakan fenomena sosial di Indonesia yang terjadi setiap tahun. Mudik pada dasarnya dimaknai sebagai pulang ke kampung halaman, khususnya pada hari-hari besar seperti hari Lebaran. Sejak tahun 70-an, kota-kota berkembang sebagai simpul sumber penghidupan sekaligus tempat singgah bagi para pendatang yang berasal dari berbagai daerah [1]. Jangka waktu kepulangan sampai kembali ketempat asal setiap orang sangat berbeda tergantung pada masa liburan yang diberikan oleh majikan atau tempat mereka bekerja di kota. Jangka waktu seminggu sebelum hingga seminggu sesudahnya itu adalah waktu terlalu lama yang dipergunakan oleh mereka yang melakukan perjalanan mudik lebaran tersebut berdasarkan cuti bersama dari pemerintah.

Setiap mudik lebaran ditandai oleh peningkatan arus masuk kendaraan menuju suatu wilayah yang menjadi tujuan mudik lebaran. Hal ini juga terjadi pada wilayah Sumatera Barat yang ditandai dengan meningkatnya kemacetan lalu lintas selama periode mudik hingga kemudian berakhir pada saat terjadinya arus balik [2].

Secara umum kendaraan yang masuk ke wilayah Sumatera Barat berasal dari arah selatan untuk jalur dari Jambi hingga Jawa. Kemudian dari arah Riau sebelah timur dan dari Sumatera Utara di bagian utara Sumatera Barat. Dalam berita yang dirilis disebutkan bahwa pada mudik lebaran tahun 2019, peningkatan kendaraan yang masuk menuju Sumatera Barat diprediksi mencapai 20% dari hari biasa [3].

Volume kendaraan arus mudik Lebaran Idul Fitri 2023 yang masuk ke wilayah Sumbar diprediksi meningkat tiga kali lipat dibandingkan tahun lalu yang disebabkan oleh pengurangan aktivitas mudik selama dua atau tiga tahun akibat adanya pandemi Covid-19, sehingga tahun ini diprediksi akan terjadi peningkatan arus mudik yang begitu signifikan [4].

Terjadinya peningkatan jumlah kendaraan tentunya meningkatkan juga jumlah buangan polutan ke lapisan udara ambien [6]. Hal tersebut diperparah lagi karena peningkatan jumlah kendaraan bersifat eksponensial sementara daya dukung lingkungan cenderung tetap. beberapa jenis polutan yang dilepaskan oleh kendaraan bermotor yang memberi dampak pada kesehatan manusia [8]. Beberapa jenis gas yang diemisikan oleh kendaraan bermotor, diantaranya adalah Karbon

monoksida (CO), Sulfur dioksida (SO₂) dan Nitrogen dioksida (NO₂) dan partikulat (*Particulate Matter*/PM). CO dan partikulat debu merupakan hasil kendaraan tentunya meningkatkan juga jumlah buangan polutan ke lapisan udara ambien. Lebih lanjut, peningkatan jumlah kendaraan bermotor pada perkotaan dengan tingkat polusi udara. Adapun SO₂ dan NO₂ merupakan gas hasil senyawa dari gas buangan SO_x dan NO_x [7]. SO₂ juga berasal dari letusan gunung berapi, sedangkan NO₂ juga dapat berasal dari aktivitas industri [4,5]. Selain itu juga terdapat emisi gas rumah kaca berupa gas CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran sempurna bahan bakar fosil [8].

Adanya gangguan yang umum terjadi bagi kesehatan karena masuknya polutan ke atmosfer antara lain berupa munculnya gangguan saluran pernafasan, sakit kepala, iritasi pada mata, potensi terjadinya serangan asma, ISPA, gangguan fungsi paru serta peningkatan resiko penyakit jantung [10]. Gangguan kesehatan tersebut akan berbeda tingkatan dan jenisnya karena bergantung pada macam, ukuran dan komposisi kimiawi polutan yang ada saat itu. Semakin lama hewan percobaan terpapar asap kendaraan maka tingkat kerusakan ginjalnya juga semakin besar [11].

Ambang konsentrasi gas karbon monoksida (CO) untuk batas aman berada pada <70 ppm, untuk batas berbahaya pada 70-150 ppm, dan batas mematikan >150 ppm. Sedangkan untuk gas karbon dioksida (CO₂), untuk batas aman berada pada <5.000 ppm, untuk batas berbahaya berada pada 5.000 – 40.000 ppm, dan batas mematikan >40.000 ppm [9]. Untuk standar baku mutu berdasarkan situs bmk.go.id konsentrasi gas NO₂ dan SO₂ berturut-turut sebesar 0.08 ppm dan 0.14 ppm, dan untuk konsentrasi PM₁₀ untuk nilai aman adalah <50 µg/m³, nilai sedang sebesar 51-150 µg/m³, dan nilai tidak sehat sebesar 151-350 µg/m³.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dari perubahan konsentrasi gas CO, CO₂, NO₂, SO₂, dan polutan PM₁₀ selama periode Idul Fitri. Hal ini dilakukan untuk melihat apakah pada waktu tersebut memiliki dampak terhadap perubahan terhadap konsentrasi dari gas dan polutan tersebut.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data harian hasil pengukuran pada parameter gas CO, CO₂,

NO₂, SO₂, dan *particulate matter* (PM₁₀) di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang selama rentang periode lebaran H-10 sampai dengan H+10. Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang merupakan stasiun khusus yang menjadi standar referensi udara bersih di Indonesia yang merupakan bagian dari program *Global Atmosphere Watch* (GAW) dari Organisasi Meteorologi Dunia. Terletak pada ketinggian 864 meter di atas permukaan laut dengan koordinat 0° 12' 07" LS – 100° 19' 05" BT memaparkan pemilihan lokasi SPAG Bukit Kototabang guna merepresentasikan pengukuran kualitas udara pada kawasan tropis dengan ciri iklim benua maritim. Lokasi stasiun juga berada pada bukit yang jauh dari jangkauan polusi antropogenik [13].

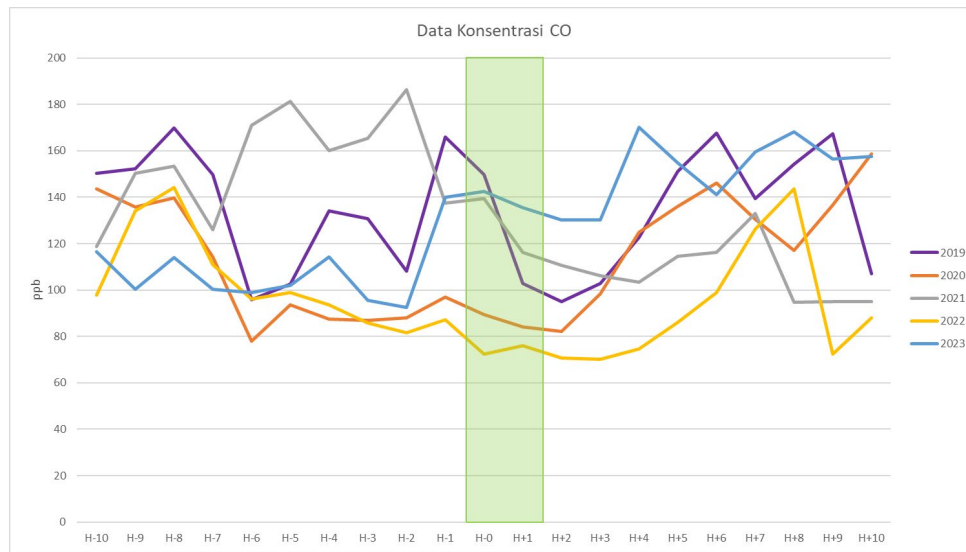
Hujan merupakan salah satu parameter cuaca yang bersifat mencuci atmosfer karena dapat menghilangkan polutan di udara hingga batas tertentu. Tetapi pada sisi lain, terjadinya hujan menyebabkan kendaraan di jalan raya akan melambat yang justru akan memberi dampak peningkatan emisi polutan ke atmosfer [14]. Selanjutnya angin juga berpengaruh pada pengenceran polutan meliputi arah dan kecepatan angin. Arah angin mempengaruhi arah transport dan migrasi polutan [15]. Adapun kecepatan angin mempengaruhi kecepatan sebaran konsentrasi polutan dari sumbernya. Kelembapan udara dan polutan juga memiliki korelasi negatif seperti juga pengaruh curah hujan terhadap konsentrasi polutan [16].

Peralatan yang digunakan dalam menghasilkan data kualitas udara seperti tersaji pada tabel 1.

Tabel 1. Daftar parameter dan peralatannya

No	Parameter	Instrumen	Ket
1	CO	Piccaro Type: G2401	Data Picarro 2019-2023
2	CO ₂	Piccaro Type: G2401	Data Picarro 2019-2023
3	NO ₂	Thermo Scientific Model 42i-TLE	Data Thermo Scientific 2019-2023
4	SO ₂	Thermo Scientific Model 43i-TLE	Data Thermo Scientific 2019-2023
5	PM ₁₀	Met One Instrument BAM 1020	Data BAM 1020 tahun 2019-2023

3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 1. Grafik Konsentrasi gas CO periode Hari Raya Idul Fitri tahun 2019-2023

3.1. Gas Karbon monoksida (CO)

Berdasarkan data grafik pada gambar 1, dapat dilihat secara keseluruhan bahwa tidak terdapat tren peningkatan ataupun penurunan dari tahun ke tahun. Akan tetapi, pada setiap tahunnya memiliki pola yang berbeda yang menunjukkan perbedaan pola arus mudik ataupun arus balik dari tahun ke tahun.

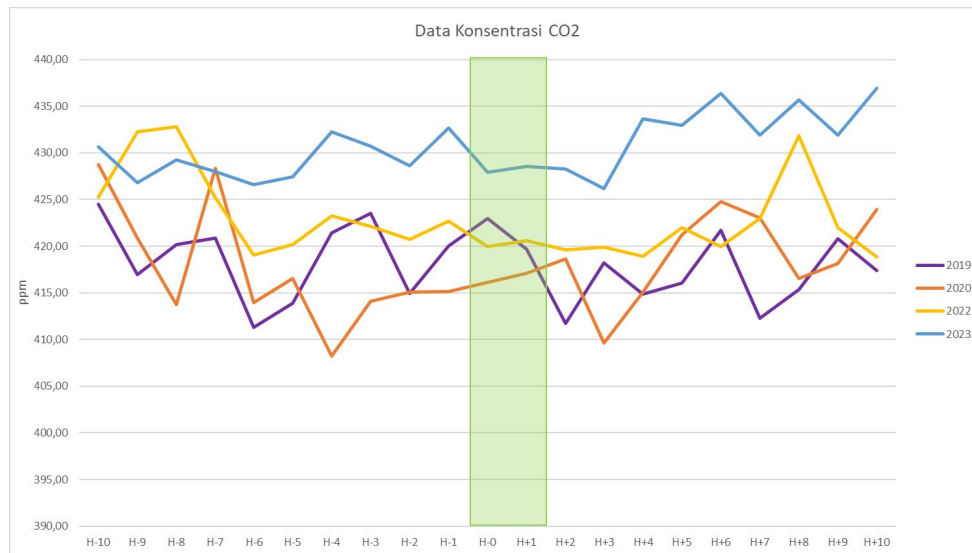
Data konsentrasi gas CO tahun 2019 menunjukkan peningkatan konsentrasi sejak H-10 hingga H-8, dimana konsentrasi CO meningkat dari 150.35 ppb menjadi 169.73 ppb atau meningkat sebesar 12.8% dalam 2 hari. Peningkatan juga terjadi pada rentang H-6 hingga H-4 dimana konsentrasi meningkat dari 95.82 ppb menjadi 134.22 ppb atau sebesar 40.0 % dalam 2 hari, serta pada rentang H-2 hingga H-1 dimana konsentrasi CO meningkat dari 108.18 ppb menjadi 165.88 ppb atau meningkat sebesar 53.3% dalam sehari.

Sementara itu konsentrasi gas CO yang terukur selama periode arus mudik tahun 2020 menunjukkan konsentrasi rata rata pada H-10 hingga H-8 dengan rasio 57.7% lebih tinggi dibandingkan pada H-6 hingga H-1. Sedangkan selama arus balik konsentrasi gas CO mengalami peningkatan konsentrasi sejak H+2 hingga H+6, konsentrasi meningkat dari 82.09 ppb menjadi 146.19 ppb atau meningkat sebesar 78.1% dalam 4 hari, serta peningkatan yang terjadi sejak

H+8 sebesar 117.16 ppb menjadi 158.53 pada H+10 atau meningkat sebesar 35.3%.

Konsentrasi gas CO yang terukur selama arus mudik tahun 2021 cenderung mengalami peningkatan secara berkala sejak H-10 hingga H-2 dengan nilai konsentrasi 118.71 ppb menjadi 186.25 ppb atau meningkat sebesar 56.9% selama 8 hari, dimana pada rentang H-10 hingga H-8 konsentrasi meningkat sebesar 29.1%, rentang H-7 hingga H-5 sebesar 43.8%, dan rentang H-4 hingga H-2 sebesar 16.4%. Sedangkan untuk arus balik tahun 2021 peningkatan konsentrasi terjadi sejak H+4 hingga H+7, dimana konsentrasi meningkat dari 103.33 ppb menjadi 132.85 ppb atau meningkat sebesar 28.6% dalam waktu 3 hari.

Data nilai konsentrasi gas CO selama arus mudik tahun 2022 memiliki kemiripan dengan data nilai konsentrasi gas CO tahun 2020 dimana konsentrasi cenderung meningkat pada rentang H-10 hingga H-8 dan dilanjutkan penurunan konsentrasi pada rentang H-6 hingga H-1. Konsentrasi gas CO meningkat dari 97.84 ppb pada H-10 menjadi 144.01 ppb pada H-8 atau meningkat sebesar 47.2% selama 2 hari. Sedangkan selama arus balik peningkatan konsentrasi terjadi dari 70.04 ppb pada H+3 menjadi 143.53 pada H+8 atau meningkat sebesar 104.9% dalam 5 hari. Sementara itu data konsentrasi gas CO arus mudik tahun 2023 tidak menunjukkan terjadinya peningkatan konsentrasi yang signifikan pada rentang H-9 hingga H-8 dan



Gambar 2. Grafik Konsentrasi gas CO₂ periode lebaran tahun 2019-2023

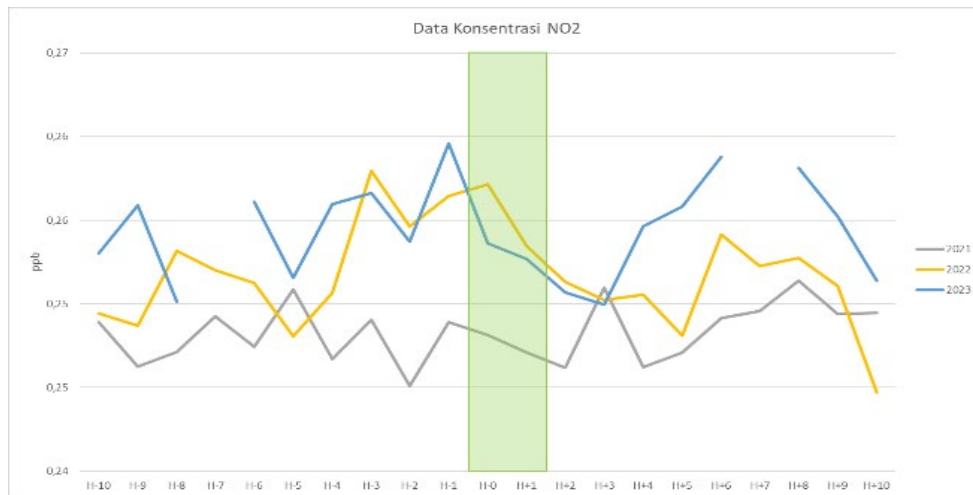
rentang H-6 hingga H-4. Peningkatan konsentrasi yang terjadi pada rentang tersebut masing-masing hanya sebesar 13.7% dalam sehari dan 15.7% dalam 2 hari. Peningkatan yang signifikan baru terjadi pada rentang H-2 hingga H-1, dimana konsentrasi meningkat dari 92.53 ppb menjadi 139.84 ppb atau sebesar 51.1% dalam sehari. Sedangkan selama arus balik tahun 2023 menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi yang terjadi pada rentang H+3 hingga H+4, dari 130.07 ppb menjadi 170.17 ppb atau sebesar 30.8% dalam sehari, serta pada rentang H+6 hingga H+8, dari 141.1 ppb menjadi 168.30 ppb atau sebesar 19.3% dalam 2 hari.

3.2. Gas Karbon dioksida (CO₂)

Data tahun 2019 dan 2020 cenderung lebih fluktuatif dibandingkan data tahun 2022 dan 2023, baik selama periode arus mudik ataupun arus balik. Data konsentrasi gas CO₂ selama arus mudik tahun 2019 berfluktuasi pada rentang 411.32 ppm hingga 424.49 ppm atau mengalami fluktuasi sebesar $\pm 3.2\%$, dan arus balik berfluktuasi sekitar 411.70 ppm hingga 421.74 ppm atau sebesar $\pm 2.4\%$. Sedangkan

data konsentrasi gas CO₂ selama arus mudik tahun 2020 menunjukkan nilai fluktuasi antara 428.79 ppm hingga 408.27 ppm atau sebesar $\pm 5.0\%$, dan data konsentrasi selama arus balik berfluktuasi sekitar 409.64 ppm hingga 424.77 ppm atau sebesar $\pm 3.7\%$.

Sementara itu, data konsentrasi gas CO₂ pada periode arus mudik tahun 2022 sempat melonjak pada rentang H-10 hingga H-8, dari 425.25 ppm menjadi 432.79 ppm atau sebesar 1.7% dalam 2 hari, lalu kembali turun dan stabil sejak H-6 hingga H-1 pada kisaran 419.08 ppm hingga 423.27 ppm atau mengalami penurunan konsentrasi sebesar 3.2% pada rentang H-8 hingga H-6. Sedangkan selama periode arus balik tahun 2022, konsentrasi berfluktuasi pada kisaran 418.92 ppm hingga 422.02 ppm atau sebesar $\pm 0.7\%$, konsentrasi gas CO₂ mengalami peningkatan pada rentang H+6 hingga H+8, dari 419.97 ppm menjadi 431.85 ppm atau sebesar 2.8%. Untuk konsentrasi gas CO₂ selama arus mudik tahun 2023 berfluktuasi pada 426.59 ppm hingga 432.68 ppm atau sebesar $\pm 1.4\%$, dan arus balik pada 426.20 ppm hingga 436.95 ppm atau sebesar $\pm 2.5\%$, dimana konsentrasi memiliki tren meningkat.



Gambar 3. Grafik Konsentrasi gas NO₂ periode lebaran tahun 2019-2023

3.3 Gas Nitrogen dioksida (NO₂)

Berdasarkan data grafik pada gambar 3, dapat dilihat secara keseluruhan bahwa terdapat tren peningkatan tahun ke tahun. Masing masing garis memiliki tren yang fluktuatif dalam skala konsentrasi yang sangat kecil pada rentang 0,245 ppb hingga 0,260 ppb.

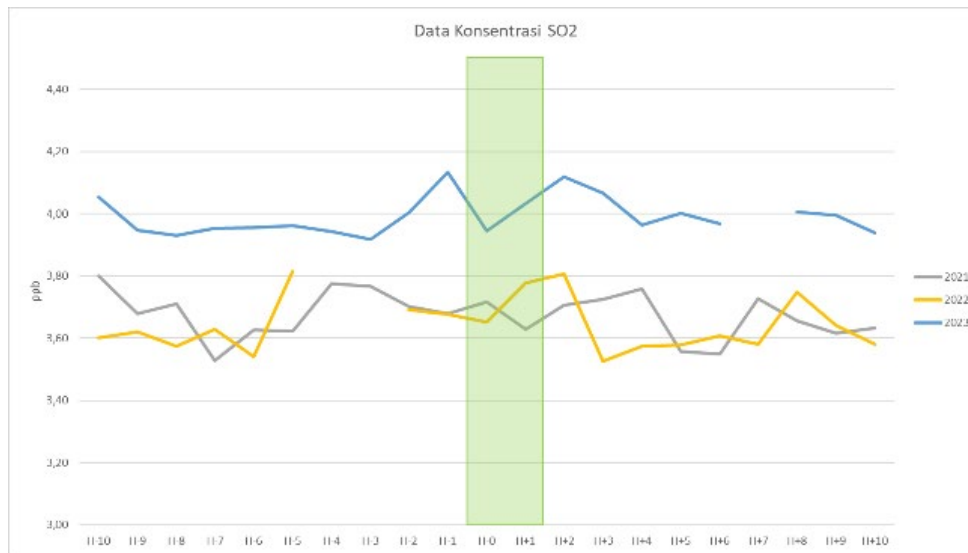
Data konsentrasi gas NO₂ selama arus mudik lebaran tahun 2021 menunjukkan adanya fluktuasi pada rentang 0.245 ppb hingga 0.251 ppb atau sebesar $\pm 2.4\%$. Sedangkan selama arus balik lebaran tahun 2021, konsentrasi gas NO₂ berfluktuasi pada rentang 0.246 ppb hingga 0.251 ppb atau sebesar $\pm 2.0\%$. Sementara itu, konsentrasi NO₂ yang terukur selama arus mudik dan arus balik tahun 2022 dan 2023 memiliki fluktuasi yang sedikit lebih lebar.

dibandingkan tahun 2021. Selama arus mudik tahun 2022 konsentrasi NO₂ berfluktuasi pada rentang 0.248 ppb hingga 0.258 ppb atau sebesar $\pm 4.0\%$, dan selama arus balik konsentrasi NO₂ berfluktuasi pada rentang 0.245 ppb hingga 0.251 ppb atau sebesar $\pm 2.4\%$. Sedangkan konsentrasi yang terukur selama arus mudik tahun 2023 berfluktuasi pada rentang 0.250 ppb hingga 0.260 ppb atau sebesar $\pm 4.0\%$, dan selama arus balik konsentrasi NO₂ berfluktuasi pada rentang 0.250 ppb hingga 0.259 ppb atau sebesar $\pm 3.6\%$.

3.4. Gas Sulfur Dioksida (SO₂)

Konsentrasi SO₂ tahun 2021 pada gambar 4 menunjukkan fluktuasi baik selama arus mudik yang berkisar pada nilai 3.527 ppb hingga 3.800 ppb atau sebesar $\pm 7.7\%$, dan arus balik yang berkisar pada nilai 3.549 ppb hingga 3.759 ppb atau sebesar $\pm 5.9\%$. Peningkatan konsentrasi gas SO₂ selama arus mudik dan arus balik lebaran tahun 2021 terjadi pada rentang H-7 dengan nilai 3.527 ppb menjadi 3.776 ppb pada H-4 atau sebesar 7% selama 3 hari, rentang H+1 dengan nilai 3.628 ppb menjadi 3.759 ppb pada H+4 atau sebesar 3.6% selama 3 hari, dan rentang H+6 dengan nilai 3.549 ppb menjadi 3.728 ppb pada H+7 atau sebesar 5% dalam sehari.

Data konsentrasi SO₂ tahun 2022 juga menunjukkan fluktuasi pada arus mudik dengan rentang 3.541 ppb hingga 3.815 ppb atau sebesar $\pm 7.7\%$, dan arus balik dengan rentang 3.525 ppb hingga 3.807 ppb atau sebesar $\pm 8.0\%$. Peningkatan konsentrasi gas SO₂ selama arus mudik dan arus balik lebaran tahun 2021 terjadi pada rentang H-6 dengan nilai 3.541 ppb menjadi 3.815 ppb pada H-5 atau sebesar 7.7% dalam sehari, rentang H+0 dengan nilai 3.651 ppb menjadi 3.807 ppb pada H+2 atau sebesar 4.3% dalam 2 hari, dan rentang H+7 dengan nilai 3.580 ppb menjadi 3.747 ppb pada H+8 atau sebesar 4.7% dalam sehari.



Gambar 4. Grafik Konsentrasi gas SO₂ periode lebaran tahun 2019-2023

Sementara itu data konsentrasi gas SO₂ tahun 2023 menunjukkan nilai yang stabil selama arus mudik H-9 sampai H-3 dengan nilai konsentrasi di kisaran 3.919 ppb hingga 3.962 ppb atau berfluktuasi sebesar $\pm 1.1\%$. Konsentrasi mengalami peningkatan pada rentang H-3 dari 3.919 ppb menjadi 4.134 ppb pada H-1 atau sebesar 5.5% dalam 2 hari. Sedangkan selama arus balik, terjadi peningkatan konsentrasi SO₂ pada rentang H-0 dengan nilai 3.944 ppb menjadi 4.119 ppb pada H+2 atau sebesar 4.4% dalam 2 hari.

3.5 Particulate Matter 10 μg (PM₁₀)

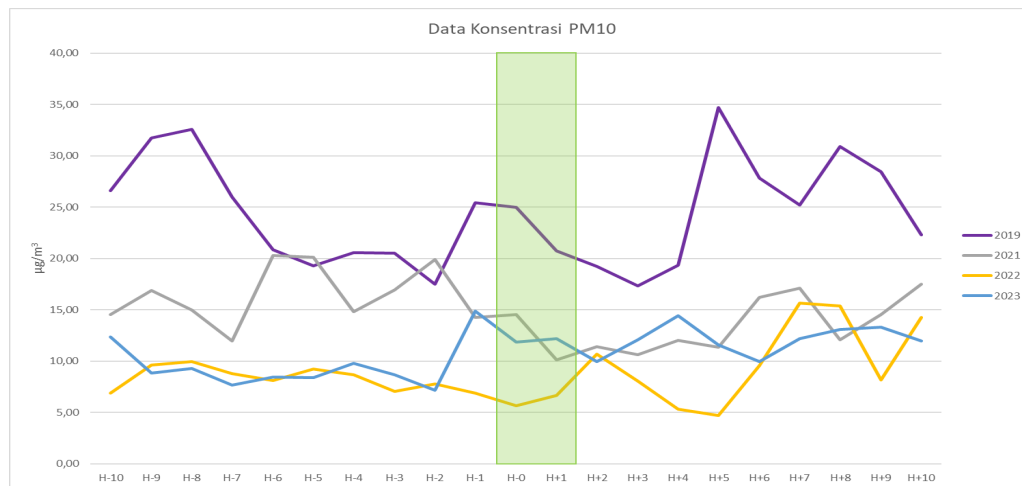
Berdasarkan data grafik pada gambar 5, dapat dilihat secara keseluruhan bahwa terdapat tren penurunan konsentrasi PM₁₀ dari tahun 2019 ke tahun 2022 dan kembali sedikit meningkat di tahun 2023. Kondisi ini disebabkan adanya perbedaan pola cuaca oleh fenomena El Nino yang menyebabkan kondisi cuaca yang terjadi pada tahun 2019 lebih kering dibandingkan dengan pada tahun lainnya.

Berdasarkan data indeks el nino pada website NOAA pada 2019 bulan Mei-Juni memiliki indeks El Nino sebesar +0.5, pada tahun 2020 bulan Mei sebesar -0.1, pada tahun 2021 bulan Mei sebesar -0.5, pada tahun 2022 bulan April-Mei sebesar -1.1, dan pada tahun 2023 bulan April sebesar +0.2. Masing masing garis memiliki tren yang fluktuatif. Secara keseluruhan tren berada pada rentang 4,691 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hingga 20,292 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Secara keseluruhan, konsentrasi

PM₁₀ yang terukur masih berada pada kategori aman dengan konsentrasi $< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Data tahun 2019 menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi PM₁₀ selama arus mudik pada rentang H-10 yang bernilai 26.583 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 32.583 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H-8 atau sebesar 22.6% dalam 2 hari, dan rentang H-2 yang bernilai 17.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 25.417 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H-1 atau sebesar 45.2% dalam sehari. Sedangkan selama arus balik terjadi peningkatan konsentrasi PM₁₀ yang signifikan pada rentang H+4 dengan nilai 19.333 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 34.708 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H+5 atau sebesar 79.5% dalam sehari, dan pada rentang H+7 dengan nilai 25.208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 30.917 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H+8 atau sebesar 22.6% dalam sehari.

Data yang terukur selama arus mudik lebaran tahun 2021 menunjukkan terjadinya peningkatan konsentrasi PM₁₀ pada rentang H-10 dengan nilai 14.542 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 16.875 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H-9 atau sebesar 16.0% dalam sehari, rentang H-7 dengan nilai 11.958 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 20.292 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H-6 atau sebesar 69.7% dalam sehari, dan rentang H-4 dengan nilai 14.792 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 19.953 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H-2 atau sebesar 34.9% dalam 2 hari. Sedangkan selama arus balik terjadi peningkatan konsentrasi PM₁₀ yang signifikan pada rentang H+5 dengan nilai 11.333 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 17.125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H+7 atau sebesar 51.1% dalam 2 hari, dan pada rentang H+8 dengan nilai 12.083 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi 17.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pada H+10 atau sebesar 44.8% dalam 2 hari.



Gambar 5. Grafik Konsentrasi gas PM₁₀ periode lebaran tahun 2019-2023

Data yang terukur selama arus mudik lebaran tahun 2022 hanya menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi PM₁₀ pada rentang H-10 dengan nilai 6.892 µg/m³ menjadi 9.950 µg/m³ pada H-8 atau sebesar 44.4% dalam 2 hari. Sedangkan selama arus balik lebaran 2022 konsentrasi PM₁₀ meningkat pada rentang H-0 dengan nilai 5.661 µg/m³ menjadi 10.650 µg/m³ pada H+2 atau sebesar 88.1% dalam 2 hari, rentang H+5 dengan nilai 4.691 µg/m³ menjadi 15.625 µg/m³ pada H+7 atau sebesar 233.1% dalam 2 hari, dan rentang H+9 dengan nilai 8.183 µg/m³ menjadi 14.243 µg/m³ pada H+10 atau sebesar 74.1% dalam sehari.

Sementara itu, data yang terukur selama arus mudik lebaran tahun 2023 hanya menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi PM₁₀ pada rentang H-2 dengan nilai 7.130 µg/m³ menjadi 14.875 µg/m³ pada H-1 atau sebesar 108.6% dalam sehari. Sedangkan selama arus balik lebaran 2023 konsentrasi PM₁₀ meningkat pada rentang H+2 dengan nilai 9.975 µg/m³ menjadi 14.425 µg/m³ pada H+4 atau sebesar 44.6% dalam 2 hari, dan rentang H+6 dengan nilai 9.945 µg/m³ menjadi 13.325 µg/m³ pada H+9 atau sebesar 34.0% dalam 3 hari.

Peningkatan Konsentrasi CO yang terjadi selama periode penelitian karena disebabkan oleh tingginya polusi udara dari kendaraan bermotor dan aktivitas masyarakat di luar ruangan [18]. Kemudian untuk kondisi dari SO₂ dari hasil penelitian, tidak dipengaruhi oleh aktivitas mudik sehingga nilainya cenderung tidak mengalami kenaikan, karena sumber utama dari gas tersebut lebih banyak disebabkan oleh kondisi fenomena alam seperti Gunung meletus [19]. Pada periode penelitian, tidak ada terjadi letusan gunung berapi.

Konsentrasi CO₂ selalu mengalami peningkatan dari tahun ke tahun berdasarkan data dari periode penelitian, hal tersebut disebabkan bukan karena periode mudik lebaran, melainkan karena deforestasi hutan yang terus terjadi dan pembakaran bahan bakar fosil [20,21]. Untuk parameter PM₁₀, kenaikannya pada periode penelitian lebih banyak disebabkan oleh kondisi fenomena iklim seperti ENSO (El – Nino dan La Nina, bukan karena aktivitas mudik lebaran [22]. Selain itu juga, konsentrasi PM₁₀ dan CO yang tinggi dapat dijumpai pada kondisi kebakaran hutan dan lahan [23,24]. Namun pada periode penelitian ini, tidak terdapat kebakaran hutan dan lahan.

Konsentrasi NO₂ pada periode penelitian tidak mengalami kenaikan sama sekali, walaupun terjadi peningkatan kendaraan dan aktivitas masyarakat, konsentrasinya tetap dalam kondisi normal. Hal tersebut bisa saja disebabkan oleh konsentrasi yang terakumulasi disebabkan oleh angin sehingga tidak terukur konsentrasinya dengan tepat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari pengukuran yang dilaksanakan, dapat disimpulkan bahwa aktivitas mudik yang terjadi pada tahun 2019-2023 berpengaruh terhadap meningkatnya konsentrasi gas CO yang terukur di Stasiun GAW Bukit Kototabang selama arus mudik ataupun arus balik lebaran. Sedangkan pengaruh aktivitas mudik terhadap gas CO₂ tidak terlalu signifikan. meskipun begitu, konsentrasi gas CO₂ selalu mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Lebih lanjut lagi, aktivitas mudik tidak memberikan pengaruh terhadap perubahan konsentrasi gas SO₂. Sedangkan untuk parameter PM₁₀ cenderung dipengaruhi oleh perbedaan kondisi iklim

dimana pada tahun 2019 terjadi El-Nino lemah, sedangkan tahun 2020-2022 terjadi La-Nina, dan tahun 2023 berada pada kondisi netral. Untuk Konsentrasi NO₂ tidak terpengaruh pada periode penelitian. Secara keseluruhan, konsentrasi dari parameter yang diukur masih berada pada kategori aman.

Daftar Pustaka

- [1] Prasajo, A. P. S., Aini, Y. N., & Kusumaningrum, D. (2020). Potensi Pola Aliran Mudik pada Masa Pandemi COVID-19. *Jurnal Kependudukan Indonesia, Edisi Khusus Demografi dan COVID-19*, 21-26.
- [2] Soebyakto, B. B. (2011). Mudik Lebaran. *Jurnal Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi Universitas Sriwijaya*, 9(2), 61-67.
- [3] Hadis, H. (2019). *Info Mudik Sumbar: Padang-Pekanbaru Meningkat 20 Persen, Dilarang Parkir di Kelok 9*. Retrieved from <https://langgam.id/info-mudik-sumbar-padang-pekanbaru-meningkat-20-persen-dilarang-parkir-di-kelok-9/>.
- [4] Graf, H. F., Feichter, J., & Langmann, B. (1997). Volcanic sulfur emissions: Estimates of source strength and its contribution to the global sulfate distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D9), 10727-10738.
- [5] Bhanarkar, A. D., Goyal, S. K., Sivacoumar, R., & Rao, C. C. (2005). Assessment of contribution of SO₂ and NO₂ from different sources in Jamshedpur region, India. *Atmospheric Environment*, 39(40), 7745-7760.
- [6] Simandjuntak, A. G. (2007). Pencemaran udara. *Buletin Limbah*, 11(1), 34-40.
- [7] Suharyono. (2023). *Arus Mudik Lebaran Idul Fitri 2023 ke Sumbar Diprediksi Tiga Kali Lipat dari Tahun Lalu*. Retrieved from <https://www.liputan6.com/regional/read/5263859/arus-mudik-lebaran-idul-fitri-2023-ke-sumbar-diprediksi-tiga-kali-lipat-dari-tahun-lalu>.
- [8] Ismiyati, Marlita, D., & Saidah, D. (2014). Pencemaran Udara Akibat Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Jurnal Manajemen Transportasi & Logistik (JMTransLog)*, 1(3), 241-247.
- [9] Tugaswati, A. T. (2008). Emisi gas buang kendaraan bermotor dan dampaknya terhadap kesehatan. *Komisi Penghapusan Bensin Bertimbel*, 1, 1-11. Retrieved from www.kbpp.org/makalah-Ind/emisi
- [10] Rose, K. D. C., & Tualeka, A. R. (2014). Penilaian Risiko Paparan Asap Kendaraan Bermotor Pada Polantas Polrestabes Surabaya Tahun 2014. *The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health*, 3(1), 46-57.
- [11] Hasnisa, Juswono, U. P., & Wardoyo, A. Y. P. (2014). Pengaruh Paparan Asap Kendaraan Bermotor Terhadap Gambaran Histologi Organ Ginjal Mencit (*Mus musculus*). *Brawijaya Physics Student Journal (PSJ)*. Retrieved from <https://media.neliti.com/media/publications/160211-ID-pengaruh-paparan-asap-kendaraan-bermotor.pdf>
- [12] EPA. (2023). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)*. Retrieved from <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>.
- [13] Kurniawan, A. (2017). Pengukuran Parameter Kualitas Udara (CO, NO₂, SO₂, O₃ dan PM₁₀) Di Bukit Kototabang Berbasis ISPU. *Jurnal Teknosains*, 7(1), 1-13.
- [14] Kwak, H. Y., Ko, J., Lee, S., & Joh, C. H. (2016). *Identifying the correlation between rainfall, traffic flow performance and air pollution concentration in Seoul using a path analysis*. World Conference on Transport Research - WCTR 2016 (10-15). Shanghai, China
- [15] Zhang, H., Xu, T., Zong, Y., Tang, H., Liua, X., & Wanga, Y. (2015). *Influence of Meteorological Conditions on Pollutant Dispersion in Street Canyon*. Proceeding Engineering of 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE) (899 – 905). Tianjin, China
- [16] Jayamurugan, R., Kumaravel, B., Palanivelraja, S. & Chockalingam, M. P. (2013). Influence of Temperature, Relative Humidity and Seasonal Variability on Ambient Air Quality in a Coastal Urban Area. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 1-7
- [17] National Weather Service. (2023). *Cold & Warm Episodes by Season*. Retrieved from https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.
- [18] Tyovenda, A. A., Ayua, T. J., & Sombo, T. (2021). Modeling of gaseous pollutants (CO and NO₂) emission from an industrial stack in Kano city, northwestern Nigeria. *Atmospheric Environment*, 253, 118356.
- [19] Malinconico Jr, L. L. (1987). On the variation of SO₂ emission from volcanoes. *Journal of volcanology and geothermal research*, 33(1), 231-237.
- [20] Woodwell, G. M., Hobbie, J. E., Houghton, R. A., Melillo, J. M., Moore, B., Peterson, B. J., & Shaver, G. R. (1983). Global deforestation: contribution to atmospheric carbon dioxide. *Science*, 222(4628), 1081-1086.
- [21] Guild, L. S., Kauffman, J. B., Cohen, W. B., Hlavka, C. A., & Ward, D. E. (2004). Modeling biomass burning emissions for Amazon forest and pastures in Rondônia, Brazil. *Ecological Applications*, 14(4), 232-246.
- [22] Hassan, H., Latif, M. T., Juneng, L., Amil, N., Khan, M. F., Yik, D. J., & Abdullah, N. A. (2020). Interaction of PM₁₀ concentrations with local and synoptic meteorological conditions at different temporal scales. *Atmospheric Research*, 241, 104975.
- [23] Bravo, J. L., Amador-Munoz, O., Villalobos-Pietrini, R., & Muhlia, A. (2006). Influence of some meteorological parameters and forest fires on PM₁₀ concentrations in a southwest zone of Mexico Valley. *International journal of environment and pollution*, 26(1-3), 142-155.
- [24] Wotawa, G., & Trainer, M. (2000). The influence of Canadian forest fires on pollutant concentrations in the United States. *Science*, 288(5464), 324-328.