



Analisis Prediksi Parameter Signifikansi Siklon Tropis di Wilayah Utara dan Selatan Indonesia

Muhammad Fadhillah*, Kevin Gilbert, Ogi Rahmawan Adi Saputro

Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

Email: muhammadfadhillah111@gmail.com*, stmkg.kevin@gmail.com,

Ogiras13@gmail.com

ABSTRAK

Kata kunci:

Prediksi parameter, siklon tropis, fenomena atmosfer

Siklon tropis merupakan fenomena atmosfer yang terjadi di wilayah lautan hangat, termasuk daerah utara dan selatan Indonesia. Meski jarang terbentuk secara langsung di wilayah Indonesia, siklon tropis dari Samudra Pasifik dan Hindia sering memberikan dampak signifikan terhadap kondisi cuaca di wilayah Indonesia. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature, SST*) terhadap pembentukan dan perkembangan siklon tropis dengan menggunakan pendekatan machine learning dengan model Random Forest. Data yang digunakan berupa reanalysis data SST bersumber dari ECMWF (*European Center for Medium - Range Weather Forecast*) dan dianalisis untuk enam kejadian siklon tropis yang mewakili wilayah utara dan selatan Indonesia. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi efektivitas model prediksi berbasis machine learning dalam memprediksi parameter SST dengan menggunakan metrik evaluasi seperti RMSE, MAE, dan R^2 untuk memastikan akurasi prediksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai SST yang mendukung pembentukan siklon tropis berkisar antara 31–33°C, yang sesuai dengan kriteria minimal suhu untuk pembentukan sistem siklon tropis. Model Random Forest menunjukkan performa yang sangat baik dengan nilai RMSE dan MAE yang rendah, serta nilai R^2 mendekati 1 pada seluruh kasus yang diuji dengan Siklon Tropis Dahlia menjadi kasus terbaik dengan akurasi prediksi tertinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa model Random Forest mampu secara efektif menangkap pola kompleks SST dan memberikan prediksi yang akurat, berpotensi sebagai instrument untuk memahami dan mitigasi resiko yang terkait dengan kejadian siklon tropis di wilayah Indonesia.

Keywords: *Prediction of parameters, tropical cyclones, atmospheric phenomena*

Abstract

Tropical cyclones are atmospheric phenomena that occur in warm ocean areas, including the northern and southern regions of Indonesia. Although rarely formed directly in Indonesia, tropical cyclones from the Pacific and Indian Oceans often have a significant impact on weather conditions in Indonesia. This study was conducted to identify the influence of Sea Surface Temperature (SST) on the formation and development of tropical cyclones using a machine learning approach with a Random Forest model. The data used was in the form of reanalysis of SST data sourced from ECMWF (European Center for Medium - Range Weather Forecast) and analyzed for six tropical cyclone

events representing the northern and southern regions of Indonesia. In addition, this study also aims to evaluate the effectiveness of machine learning-based prediction models in predicting SST parameters by using evaluation metrics such as RMSE, MAE, and R^2 to ensure prediction accuracy. The results showed that the SST values that supported the formation of tropical cyclones ranged from 31–33°C, which corresponds to the minimum temperature criteria for the formation of tropical cyclone systems. The Random Forest model showed excellent performance with low RMSE and MAE scores, and an R^2 value close to 1 in all cases tested with Tropical Cyclone Dahlia being the best case with the highest prediction accuracy. This study shows that the Random Forest model is able to effectively capture complex patterns of SST and provide accurate predictions, potentially as an instrument to understand and mitigate risks associated with tropical cyclone events in Indonesia.

PENDAHULUAN

Siklon tropis adalah sistem tekanan rendah berskala sinoptik dan terjadi di atas perairan hangat. Sistem ini memiliki wilayah konvektif yang luas dan angin maksimum setidaknya mencapai 34 knot (Annada & Kumalawati, 2023). Di Indonesia, jarang terjadi siklon tropis. Namun, karena Indonesia dikelilingi oleh samudra-samudra besar seperti Samudra Pasifik, Samudra Hindia, dan Laut Cina Selatan, siklon tropis dari daerah tersebut dapat mempengaruhi Indonesia secara tidak langsung. Setidaknya, pada tahun 2019, ada 29 siklon tropis yang terbentuk di bagian utara Samudra Pasifik Barat (Fitri et al., 2022) yang juga mencakup wilayah utara Indonesia. Selain itu, terdapat delapan siklon tropis yang terjadi selama musim siklon tropis tahun 2021/2022 di wilayah basin Samudra Hindia selatan, termasuk wilayah selatan Indonesia (Pradita et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia berisiko tinggi terhadap pembentukan siklon tropis di semua belahan bumi khususnya wilayah utara dan selatan Indonesia.

Siklon tropis memiliki beberapa bagian seperti mata, dinding mata, *rainbands* (gugusan hujan), aliran masuk lapisan batas, dan aliran keluar troposfer atas (Wulandari et al., 2024). Siklon tropis terjadi di lautan tropis yang hangat dan lembab dengan membentuk sebuah pusaran angin di daerah tertentu, sehingga membuat massa udara berputar dan angin naik. Angin di dalam pusaran berputar berlawanan arah jarum jam di Belahan Bumi Utara dan searah jarum jam di Belahan Bumi Selatan (Fitriyawita et al., 2020). Untuk dapat terbentuk dan berkembang, siklon tropis memerlukan beberapa kondisi, di antaranya adalah *Sea Surface Temperature* (SST) yang tinggi, atmosfer yang tidak stabil, serta proses konveksi yang lembab dan kuat untuk dapat terbentuk dan berkembang (Pillay & Fitchett, 2021).

SST memainkan peran krusial dalam pembentukan awan dan sistem cuaca berskala besar, termasuk pusaran tropis. Suhu air laut yang tinggi menunjukkan adanya pusat massa udara yang berbeda dengan area perairan yang lebih dingin. Hal ini dapat menyebabkan pertumbuhan awan konvektif (Ariyanti et al., 2019). Dengan SST yang naik, pasokan energi dalam bentuk uap air juga naik, meningkatkan aktivitas konvektif.

Ini membantu dalam pembentukan dan penguatan siklon tropis. Meskipun, SST tidaklah satu-satunya faktor dalam pembentukan siklon tropis, diperlukan faktor lainnya agar siklon tropis dapat terbentuk dan berkembang meliputi: suhu air minimal 26,5 °C dan kedalaman perairan mencapai 50 meter; kelembapan udara harus tinggi hingga mencapai ketinggian sekitar 5 kilometer atmosfer yang tidak stabil, dengan penurunan suhu yang signifikan dan peningkatan ketinggian, juga diperlukan (Suhardi et al., 2020). Selain itu, gaya Coriolis juga dibutuhkan untuk membentuk aliran pusaran, walaupun di sekitar khatulistiwa gaya ini kurang kuat atau bahkan tidak ada, serta memiliki angin vertikal yang rendah, sekitar 10 meter per detik untuk mendukung pembentukan dan perkembangan pusaran tropis (Koba, 2023). Namun, SST adalah faktor yang mendukung pertumbuhan siklon tropis di suatu perairan (Insan et al., 2024). Dalam menganalisis SST, dibutuhkan suatu metode yang mampu memprediksi dengan akurat agar mengetahui kondisi pertumbuhan awal siklon tropis.

Pemanfaatan *machine learning* memiliki potensi yang besar dalam memprediksi *sea surface temperature* (SST) untuk mengkaji dinamika siklon tropis di wilayah BBU dan BBS Indonesia. Menurut (Sarkar et al., 2020), penggunaan metode numerik, seperti *machine learning* dapat dilakukan untuk memprediksi fenomena pemicu pertumbuhan siklon tropis yaitu *sea surface temperature*. Beberapa metode pendekatan berbasis *machine learning* yang digunakan seperti *Random Forest* dan *Neural Network* (Cui et al., 2023), sehingga pemanfaatan *machine learning* tidak hanya berpotensi meningkatkan akurasi prediksi, tetapi juga memberikan kontribusi signifikan dalam memahami dan mengelola risiko yang terkait dengan siklon tropis di wilayah BBU dan BBS Indonesia.

Beberapa penelitian tentang pemanfaatan *machine learning* dalam memprediksi SST telah banyak dilakukan. Berdasarkan penelitian (Cui et al., 2023) yang mengkaji tentang pemanfaatan *machine learning* dalam memprediksi respons SST yang diinduksi oleh siklon tropis menunjukkan bahwa model *Random Forest* yang digunakan memiliki *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.3°C dalam memprediksi SST, menunjukkan efektivitas metode ini dalam menangkap pola kompleks dalam data SST. Penelitian lainnya, (Tan et al., 2018), pemanfaatan metode *Random Forest* dalam memprediksi frekuensi siklon tropis dengan mempertimbangkan parameter SST. Analisisnya menunjukkan model *Random Forest* memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi SST yang diinduksi oleh siklon tropis, dengan akurasi tinggi dalam menangkap pola perubahan SST dan menjelaskan varians signifikan, serta nilai R² (koefisien determinasi) yang tinggi dan nilai Mean Absolute Error (MAE) yang cukup rendah yaitu dengan nilai MAE sebesar 1.14 dan R² sebesar 0.88.

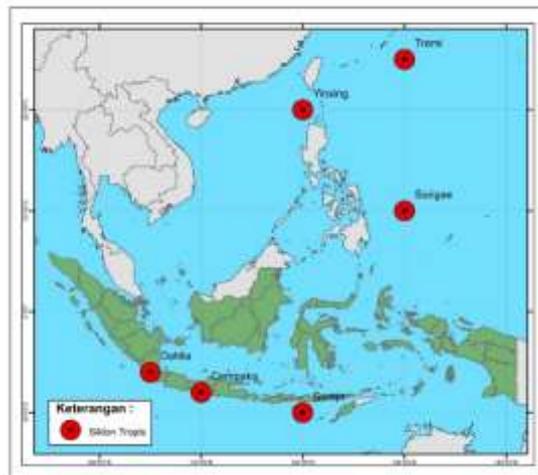
Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, penelitian hanya dilakukan di wilayah perairan yang tidak berdampak terhadap pembentukan siklon tropis di Indonesia. Oleh sebab itu, penelitian ini akan menguji dan menganalisis signifikansi SST terhadap perkembangan dan pembentukan Siklon Tropis Di Wilayah Utara dan Selatan Indonesia menggunakan *machine learning* dengan model *Random Forest*.

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas deteksi aktivitas phishing di jaringan Ethereum dengan mengembangkan model Enhanced Graph Attention

Networks (EGAT) yang mampu mengidentifikasi transaksi mencurigakan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Manfaat dari penelitian ini meliputi peningkatan keamanan ekosistem blockchain dengan mengurangi risiko penipuan berbasis phishing, memberikan solusi yang lebih andal dibandingkan metode tradisional, serta mendukung pengembangan teknologi kecerdasan buatan dalam analisis data keuangan digital.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berfokus pada tiga siklon tropis yang mewakili wilayah utara dan selatan Indonesia, seperti yang dijelaskan dalam Gambar 1. Tujuan utama penelitian adalah menganalisis tren Suhu Permukaan Laut (*Sea Surface Temperature/SST*) yang berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan dan perkembangan siklon tropis. Selain itu, penelitian ini juga mengevaluasi model *Random Forest* untuk menguji data latih (*training data*) dalam menghasilkan prediksi nilai SST. Evaluasi model dilakukan dengan menggunakan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Coefficient Correlation* (R^2) untuk mengetahui signifikansi hubungan antara data uji dan data prediksi (Suryanto & Faisol, 2022). Sebelum proses pelatihan, data yang diunduh dari setiap kejadian siklon tropis digabungkan melalui tahap *pre-processing*, yang mencakup filterisasi data kosong untuk menghindari kesalahan model dalam memahami pola data. Setelah dataset difilterisasi dengan baik, model akan membuat *Data Frame* untuk memudahkan analisis dan visualisasi data prediksi (Praneswara & Cahyono, 2023). Output dari prediksi ini akan dikonversi menjadi grafik dan dievaluasi berdasarkan error serta korelasi antara data uji dan data prediksi.



Gambar 1. Lokasi Penelitian yang Mewakili Wilayah Terjadinya Siklon Tropis di Utara dan Selatan Indonesia

Evaluasi Model

Pada penelitian ini, dilakukan evaluasi model berbasis analisis regresi, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Coefficient Correlation* (R^2). Ketiga metrik ini memberikan pandangan yang berbeda tentang akurasi dan kesesuaian model.

1. *Root Mean Square Error* (RMSE): mengukur akar kuadrat dari rata-rata kuadrat kesalahan antara nilai prediksi dan nilai aktual. Metrik ini memberikan bobot lebih besar pada kesalahan yang lebih besar, sehingga lebih sensitive dan sangat baik dalam prediksi numerik. Nilai RMSE yang lebih rendah menunjukkan kinerja model yang lebih baik (Tatachar, 2021).

Secara matematis, RMSE diberikan sebagai:

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

di mana :

- n = jumlah prediksi
- y_i = nilai yang diamati
- y'_i = nilai prediksi

2. *Mean Absolute Error* (MAE): menghitung rata-rata nilai absolut dari selisih antara nilai yang diprediksi dan nilai aktual. Berbeda dengan RMSE, MAE memberikan bobot yang sama pada semua kesalahan, sehingga kurang sensitif terhadap outlier. Nilai MAE yang lebih rendah menunjukkan akurasi prediksi yang lebih tinggi (Chicco et al., 2021).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|$$

di mana :

- n = jumlah prediksi
- y_i = nilai yang diamati
- y'_i = nilai prediksi

3. *Coefficient Correlation* (R^2): mengukur proporsi variabilitas dalam data dependen yang dapat dijelaskan oleh variable independen. Nilai R^2 berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan model yang lebih baik dalam menjelaskan variabilitas data (Tatachar, 2021).

$$R^2 = \frac{SSR}{TSS}$$

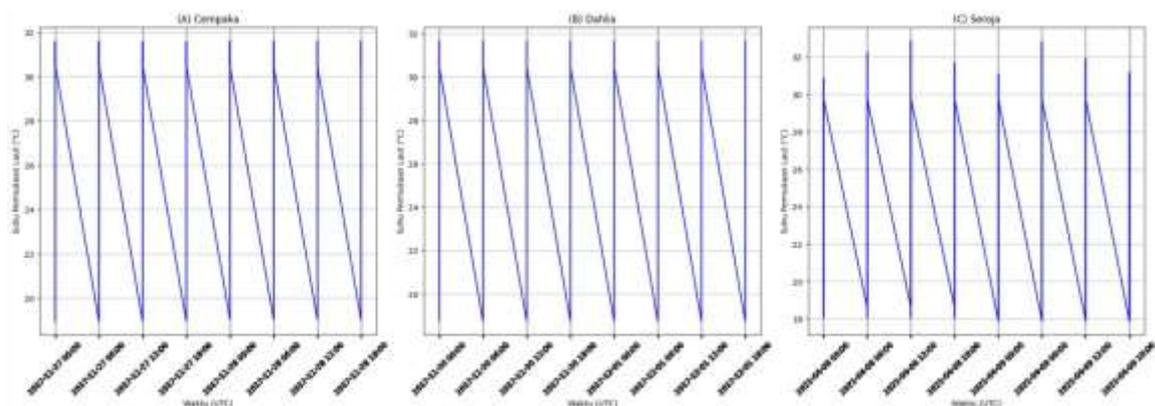
di mana:

- Sum of Squares Regression adalah jumlah perbedaan antara nilai prediksi dan rata-rata variabel dependen.
- Total Sum of Squares perbedaan kuadrat antara variabel dependen yang diamati dengan rata-ratanya.

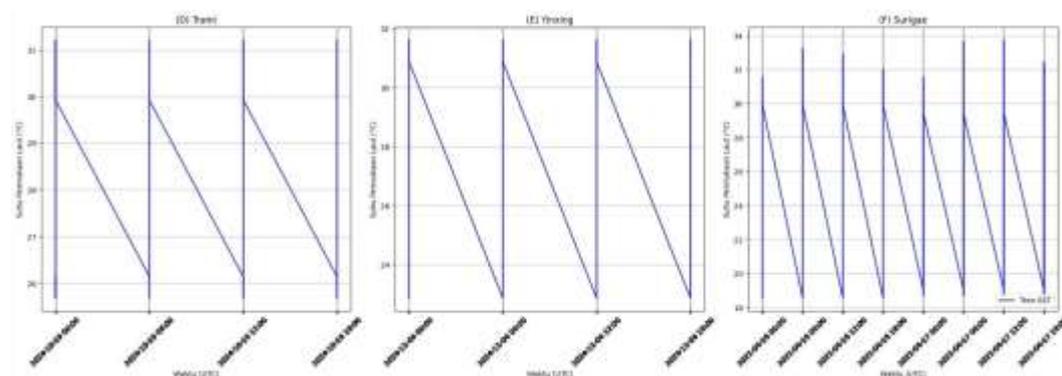
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Dinamika Tren Sea Surface Temperature

Pola grafik Sea Surface Temperature (SST) terhadap waktu (Gambar 2.a dan 2.b) dalam skala diurnal secara umum menunjukkan adanya dinamika yang fluktuatif. Hal ini menunjukkan adanya peran SST yang signifikan terhadap pertumbuhan siklon tropis secara masif.



Gambar 2. Kejadian Siklon Tropis yang Mewakili Wilayah Selatan Indonesia



Gambar 3. Kejadian Siklon Tropis yang Mewakili Wilayah Utara Indonesia

Pada wilayah selatan Indonesia (Gambar 2.a), Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia secara umum tidak menunjukkan aktivitas perubahan atau fluktuasi dari tren *Sea Surface Temperature* (SST). Suhu yang dihasilkan sekitar 31,5°C. Lain halnya dengan Siklon Tropis Seroja yang mengalami fluktuasi tren secara signifikan dalam rentang waktu 00 – 18 UTC. Siklon Seroja mengalami nilai SST minimum pada tanggal 8 dan 9 April pada jam yang sama yaitu pukul 00 UTC dengan nilai sekitar 31°C. Nilai SST maksimum siklon Seroja terjadi pada tanggal 8 April pukul 12 UTC dan tanggal 9 April pukul 06 UTC dengan nilai berkisar > 32°C. Hal ini menunjukkan adanya intensifikasi aktivitas siklon tropis yang sangat masif disebabkan tingginya *Sea Surface Temperature* (Diansyah, 2023).

Secara grafik, wilayah utara Indonesia (Gambar 2.b) menunjukkan adanya nilai SST yang secara signifikan mengalami kestabilan seperti pada kasus Siklon Tropis Trami dan Yinxing dengan suhu berkisar 31°C. Siklon Tropis Surigae mengalami

fluktuasi tren seiring waktu dengan suhu SST minimum terjadi pada 16 dan 17 April dengan jam yang sama yaitu pada pukul 00 UTC. Suhu maksimum SST yang terjadi pada Siklon Surigae yaitu tanggal 17 April pada pukul 06 – 12 UTC dengan suhu berkisar 33°C. Berdasarkan hasil prediksi, secara umum suhu SST berkisar 31 – 33°C. Menurut (Syarifullah, 2015), proses pembentukan siklon tropis membutuhkan setidaknya suhu SST berkisar 26,5 °C sehingga nilai prediksi dari suhu SST ini memberikan kondisi yang representatif terhadap siklon tropis yang terjadi di wilayah Utara dan Selatan Indonesia.

2. Evaluasi Model Dalam Memprediksi Sea Surface Temperature.

Berdasarkan evaluasi model (Tabel 2), model *Random Forest* menunjukkan performa yang sangat baik dalam memprediksi signifikansi parameter SST terhadap pembentukan siklon tropis. Hal ini berdasarkan terhadap nilai R^2 yang mendekati 1 untuk semua kasus yang diuji. Selain itu, berdasarkan metrik RMSE dan MAE, model *Random Forest* menunjukkan performa yang sangat baik dalam memprediksi signifikansi parameter SST. Siklon Dahlia menjadi kasus terbaik dengan nilai RMSE: 0,008040; MAE: 0,000474; dan R^2 : 0,999972 yang unggul, kemudian diikuti dengan Siklon Trami, Yinxing, Cempaka, Seroja, dan Surigae.

Tabel 2. Evaluasi Model Random Forest Dalam Memprediksi Siklon Tropis

Siklon Tropis	RMSE	MAE	R^2
Cempaka	0,079255	0,058910	0,997206
Dahlia	0,008040	0,000474	0,999972
Seroja	0,191486	0,075556	0,995700
Trami	0,019535	0,007845	0,999513
Yinxing	0,021189	0,008369	0,999579
Surigae	0,133256	0,092668	0,991240

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu permukaan laut (Sea Surface Temperature, SST) memainkan peran penting dalam pembentukan dan pengembangan siklon tropis di wilayah utara dan selatan Indonesia. Dengan menggunakan model prediksi berbasis *machine learning* seperti *Random Forest*, hasil analisis mengindikasikan kinerja yang sangat baik dalam memprediksi parameter SST, sebagaimana dibuktikan dengan nilai RMSE dan MAE yang rendah serta nilai R^2 yang mendekati 1. Model *Random Forest* berhasil menangkap pola fluktuasi SST yang memengaruhi intensitas siklon tropis secara signifikan.

Selain itu, prediksi menunjukkan bahwa nilai SST berkisar antara 31–33°C pada berbagai kasus siklon tropis yang diteliti, yang sesuai dengan kebutuhan minimum nilai SST untuk pembentukan siklon tropis sebesar 26,5°C. Evaluasi model menunjukkan bahwa pendekatan berbasis *Random Forest* dapat diandalkan untuk memahami hubungan antara SST dan dinamika siklon tropis, sekaligus memberikan wawasan penting untuk mitigasi risiko dan manajemen siklon tropis di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyanti, R. D., Sugihartati, F. M., Retharanita, W., & Winarso, P. A. (2019). Uji keakuratan data GFS menggunakan model WRF-ARW pada siklon tropis Flamboyan. *JlIF (Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika)*, 3(2), 62–74.
- Annada, A. R., & Kumalawati, R. (2023). Bencana Badai Siklon Tropis Di Indonesia. *Environmental Science Journal (Esjo): Jurnal Ilmu Lingkungan*, 27–31.
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj Computer Science*, 7, e623.
- Cui, H., Tang, D., Mei, W., Liu, H., Sui, Y., & Gu, X. (2023). Predicting tropical cyclone - induced sea surface temperature responses using machine learning. *Geophysical Research Letters*, 50(18), e2023GL104171.
- Diansyah, S. S. (2023). Studi Literatur Analisis Pengaruh Madden Julian Oscillation Terhadap Curah Hujan Ekstrem.
- Fitriyawita, M., Jumarang, M. I., Apriansyah, A., Sulistya, W., & Saepudin, M. (2020). Hubungan Pola Garis Arus Angin (Streamline) dengan Distribusi Hujan di Kalimantan Barat. *Prisma Fisika*, 8(2), 135–146.
- Fitri, N., Muliadi, M., & Adriat, R. (2022). Analisis Dampak Siklon Tropis Pabuk terhadap Unsur Cuaca di Kalimantan Barat. *PRISMA FISIKA*, 10(1), 14–18.
- Insan, K., Patty, W., Manembu, I., & Sumilat, D. (2024). Dampak Siklon Tropis Rai Terhadap Kondisi Oseanografi di Perairan Kepulauan Talaud. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Terapan*, 2(1), 26–36.
- Koba, F. L. A. (2023). *Manajemen Pra Bencana Badai Siklon Tropis Seroja Guna Mewujudkan Daerah Tangguh Bencana di Kabupaten Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur*. IPDN.
- Pradita, N., Ismah, S. F., & Purnama, D. R. (2022). *Pengaruh arlindo terhadap durasi dan intensitas siklon tropis di pasifik barat laut dan samudra hindia selatan*.
- Praneswara, A. O., & Cahyono, N. (2023). Analisis Sentimen Ulasan Aplikasi TikTok Shop Seller Center di Google Playstore Menggunakan Algoritma Naive Bayes. *The Indonesian Journal of Computer Science*, 12(6).
- Pillay, M. T., & Fitchett, J. M. (2021). On the conditions of formation of Southern Hemisphere tropical cyclones. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100376.
- Suhardi, B., Adiputra, A., & Avrian, R. (2020). Kajian Dampak Cuaca Ekstrem Saat Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia di Wilayah Jawa Barat. *J. Geogr. Edukasi Dan Lingkungan*, 4(2), 61–67.
- Sarkar, P. P., Janardhan, P., & Roy, P. (2020). Prediction of sea surface temperatures using deep learning neural networks. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1458.
- Suryanto, J., & Faisol, A. (2022). Validasi Curah Hujan Data TerraClimate dengan Data Pengamatan BMKG di Provinsi Kalimantan Barat. *Jurnal Pertanian Terpadu*, 10(1), 52–63.
- Syaifullah, M. D. (2015). Siklon tropis, karakteristik dan pengaruhnya di wilayah Indonesia pada tahun 2012. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 16(2), 61-â.
- Tan, J., Liu, H., Li, M., & Wang, J. (2018). A prediction scheme of tropical cyclone frequency based on lasso and random forest. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 973–983.
- Tatachar, A. V. (2021). Comparative Assessment of Regression Models Based On Model

Evaluation Metrics. International Research Journal of Engineering and Technology.
www.irjet.net