

Dinamika Kopling Laut-Atmosfer antara Suhu Permukaan Laut, CAPE, dan Curah Hujan di WPPNRI 711 Menggunakan Analisis Korelasi dan Lag Berbasis Data ERA 5 (2004-2023)

Rifki Rionda Arsyandi, Riza Adriat*, Andi Ihwan

Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura
Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak, Kalimantan Barat, Indonesia
Email: rizaadriat@physics.untan.ac.id

Abstrak

WPPNRI 711 sebagai bagian dari Benua Maritim Indonesia memiliki interaksi antara laut dan atmosfer yang kompleks dan berperan penting dalam proses konveksi di perairan tropis. Penelitian ini mengkaji hubungan antara Suhu Permukaan Laut (SPL), *Convective Available Potential Energy* (CAPE), dan curah hujan dengan menggunakan data *reanalysis* ERA5 selama periode tahun 2004 hingga 2023. Metode yang digunakan diawali dengan merata-ratakan bulanan setiap parameter di wilayah kajian, yang selanjutnya dilakukan proses korelasi Pearson, uji signifikansi dengan ukuran sampel efektif, korelasi parsial terhadap indeks Niño 3.4, serta analisis *lag* korelasi setiap parameternya. Hasil menunjukkan hubungan positif yang kuat antara SPL dan CAPE ($r = 0,71$) pada *lag* 0 bulan, yang menunjukkan bahwa respons konvektif terjadi bersamaan dengan meningkatnya energi laten permukaan laut. Setelah mempertimbangkan pengaruh ENSO, hubungan tersebut masih berkorelasi positif ($r = 0,28$; $p < 0,001$). Sebaliknya, hubungan antara CAPE dan curah hujan tidak terlalu kuat karena nilai koefisien korelasi yang lemah ($r = -0,36$) dan koefisien determinasi ($r^2 = 0,12$), dengan korelasi tertinggi terjadi pada *lag* +6 bulan, menunjukkan adanya respons yang tertunda yang dipengaruhi oleh variasi musiman dan perubahan dinamika atmosfer. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun SPL adalah sumber utama energi konvektif, pembentukan hujan di WPPNRI 711 yang merupakan lautan tropis dipengaruhi oleh faktor lokal dan global.

Kata kunci: SPL, CAPE, Curah Hujan, Korelasi

Abstract

Ocean-Atmosphere Coupling Dynamics Among Sea Surface Temperature, CAPE, and Precipitation in WPPNRI 711 Using Correlation and Lag Analysis Based on ERA5 Data (2004–2023)

WPPNRI 711 as part of the Indonesian Maritime Continent, has complex interactions between the ocean and the atmosphere and plays an important role in convective processes in tropical waters. This study examines the relationship between sea surface temperature (SST), Convective Available Potential Energy (CAPE), and rainfall using ERA5 reanalysis data for the period 2004 to 2023. The method used begins with a monthly average for each parameter in the study area, followed by a Pearson correlation analysis, significance testing with an effective sample size, partial correlation with the Niño 3.4 index, and lag analysis of the correlation for each parameter. The results show a strong positive relationship between SST and CAPE ($r = 0.71$) at a lag of 0 months, indicating that convective response occurs simultaneously with an increase in latent energy at the sea surface. After accounting for ENSO, the relationship remained positively correlated ($r = 0.28$; $p < 0.001$). In contrast, the relationship between CAPE and rainfall was not very strong ($r = -0.36$) and determination coefficient ($r^2 = 0.12$), with the highest correlation at a lag of +6 months, indicating a delayed response influenced by seasonal variations and atmospheric dynamics. These results show that although SPL is the main source of convective energy, rainfall formation in WPPNRI 711, which is a tropical ocean, is influenced by local and global factors.

Keywords: SPL, CAPE, Rainfall, Correlation

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai bagian dari Benua Maritim memiliki wilayah laut tropis yang sangat luas dan berperan sebagai pusat pembentukan awan terbesar di dunia. Benua Maritim Indonesia dikenal sangat sensitif terhadap perubahan iklim global yang berkaitan dengan SPL hangat yang berperan sebagai sumber utama energi konvektif (Mahrup et al., 2021). Wilayah ini berperan penting dalam memengaruhi cuaca global, termasuk fenomena *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) dan *Madden-Julian Oscillation* (MJO). Secara regional, karakteristik curah hujan Indonesia sangat dipengaruhi oleh interaksi laut dan atmosfer yang kompleks yang disebabkan oleh dominasi perairan hangat di sekitarnya (Aldrian dan Susanto, 2003). Interaksi antara laut dan atmosfer dipengaruhi oleh hubungan yang saling tergantung antara Suhu Permukaan Laut (SPL) dan energi konvektif di atmosfer. Selain itu, variabilitas curah hujan di wilayah Indonesia juga dipengaruhi oleh fenomena iklim global seperti ENSO dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) yang memengaruhi distribusi SPL dan pola sirkulasi atmosfer (Nur'utami dan Hidayat, 2016).

Peningkatan SPL dapat meningkatkan kelembapan dan memperkuat ketidakstabilan atmosfer karena meningkatnya *Convective Available Potential Energy* (CAPE). Proses konveksi diperkuat oleh peningkatan evaporasi yang disebabkan oleh panas permukaan laut. Variabilitas SPL di Benua Maritim tidak hanya dipengaruhi oleh interaksi laut dan atmosfer, tetapi juga dipengaruhi oleh fenomena global seperti ENSO, IOD, dan monsun Asia-Australia (Zhu et al., 2022). Fenomena global seperti MJO terjadi di tengah Samudra Hindia dan bergerak ke arah timur melintasi Benua Maritim, kemudian kecepatannya melemah di bagian tengah Pasifik (Ling et al., 2019). Pada tahun El Niño terjadi pengurangan kecepatan angin di wilayah lautan Kalimantan. Pelemahan angin tersebut memperkuat siklus diurnal dan konvergensi angin laut, sehingga dapat memicu peningkatan curah hujan akibat *monsoonal damping effect* yang berlawanan dengan efek kekeringan oleh El Niño di wilayah Benua Maritim akibat pengaruh dinamika sirkulasi lokal (Qian et al., 2013). Situasi tersebut menunjukkan bahwa variasi curah hujan di Indonesia dipengaruhi oleh interaksi yang kompleks antara faktor lokal dan global.

Pergerakan semu tahunan Matahari yang melewati ekuator juga memengaruhi pola hujan di

Kalimantan Barat dan sekitarnya. Hal ini meningkatkan radiasi dan aktivitas hujan konvektif. Wilayah WPPNRI 711 adalah tempat yang tepat untuk mempelajari mekanisme hubungan SPL, CAPE, dan curah hujan, karena hubungan yang kompleks antara faktor lokal dan global.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa SPL, curah hujan, dan proses konveksi saling berkaitan secara regional maupun lokal. Nuryanto dan Badriyah (2014) menemukan bahwa pengaruh SPL terhadap curah hujan di daerah daratan bisa lebih kuat jika dipengaruhi oleh faktor topografi, sedangkan Estiningtias et al. (2007) menunjukkan bahwa SPL bisa digunakan sebagai pertanda untuk memprediksi curah hujan di wilayah pesisir Indonesia. Dalam hal ini, dinamika konveksi Ninggar et al. (2023) menyatakan bahwa pembentukan awan konvektif di daerah Banten lebih kuat terjadi pada siang hari, sedangkan Anggreni et al. (2018) menekankan bahwa penting untuk memperhatikan tingkat tutupan awan dalam memahami perubahan radiasi matahari serta dampaknya terhadap jumlah hujan.

Penelitian tersebut telah memberikan pemahaman penting tentang hubungan antara SPL dan curah hujan, namun kebanyakan fokus pada daerah daratan atau pesisir dan belum secara jelas menyertakan CAPE dalam analisisnya. Sementara itu, belum terdapat studi yang mengkaji mekanisme kopling antara SPL dan CAPE di laut terbuka WPPNRI 711 menggunakan data reanalisis jangka panjang. Keterbatasan tersebut membuat pemahaman tentang cara variasi SPL memengaruhi energi konvektif serta bagaimana respons itu terjadi dalam variasi curah hujan di perairan terbuka masih belum lengkap.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji hubungan antara suhu permukaan laut, CAPE, dan curah hujan di wilayah WPPNRI 711. Penelitian didasarkan pada dugaan bahwa peningkatan SPL secara nyata meningkatkan nilai CAPE tanpa adanya jeda waktu, yang berarti sebagai respons langsung terhadap kenaikan energi laten di lapisan batas atmosfer. Penelitian ini juga menguji asumsi bahwa respons curah hujan terhadap peningkatan CAPE tidak terjadi secara langsung, tetapi menunjukkan penundaan yang mencerminkan kompleksitas dari proses konveksi dan dinamika atmosfer di wilayah laut tropis.

MATERI DAN METODE

Lokasi penelitian ini berada di WPPNRI 711 dengan koordinat 4°00'00" LU - 4°00'00"LS dan

105°00'00" - 110°00'00" BT (Gambar 1). Pengolahan data penelitian selama periode Januari 2004–Desember 2023. Data yang digunakan adalah data sekunder bulanan berupa SPL, CAPE, dan curah hujan dengan resolusi spasial 0,25° x 0,25° yang diperoleh dari dataset *reanalysis* ECMWF ERA 5 yang dapat diunduh pada alamat (<https://cds.climate.copernicus.eu/>).

Proses awal meliputi penentuan batas wilayah studi, seleksi rentang waktu, dan *download* data dari dataset dalam format NetCDF. Pengolahan dan analisis data menggunakan bahasa pemrograman Python melalui platform komputasi berbasis *cloud* yaitu Google Colaboratory. Data bulanan SPL, CAPE, dan curah hujan dihitung dengan cara mengambil rata-rata dari seluruh area penelitian untuk setiap *grid*, sehingga mendapatkan data waktu yang mewakili wilayah tersebut. Penelitian ini menggunakan data bulanan yang masih mentah tanpa menghilangkan bagian musiman, sehingga analisis menunjukkan variasi total yang mencakup sinyal musiman serta variasi antartahun.

Tahapan selanjutnya sebelum melakukan analisis korelasi adalah uji normalitas terlebih dahulu pada setiap deret waktu dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Hubungan antara variabel

dianalisis dengan menggunakan koefisien korelasi Pearson untuk mengetahui tingkat kekuatan dan arah hubungan antara SPL dengan CAPE serta CAPE dengan curah hujan. Koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan persamaan:

$$r_{so} = \frac{n(\Sigma s_o) - (\Sigma s)(\Sigma o)}{\sqrt{\{n\Sigma s^2 - (\Sigma s)^2\}\{n\Sigma o^2 - (\Sigma o)^2\}}} \quad (1)$$

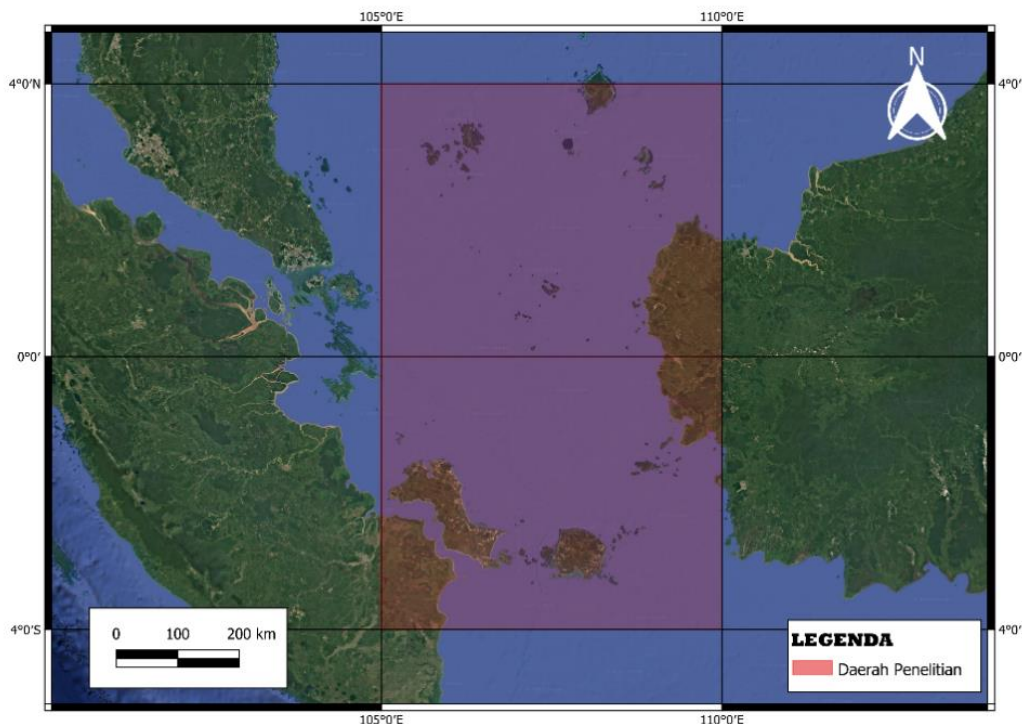
Keterangan: r_{so} = koefisien korelasi (s,o); s = variabel SPL (°C); o = variabel CAPE (J/kg); n = Banyaknya data

Interpretasi hubungan dari korelasi yang kuat ataupun lemah antarvariabel dapat dilihat berdasarkan Tabel 1.

Signifikansi korelasi diuji menggunakan uji t dengan persamaan:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2)$$

Karena data berupa deret waktu bulanan, maka dihitung autokorelasi dengan lag-1 untuk setiap variabelnya. Untuk mencegah pengecekan berlebihan terhadap dampak autokorelasi, dihitung



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

ukuran *effective sample size* (Neff) dengan menggunakan persamaan:

$$N_{eff} = N \frac{1 - \rho_1^X \rho_1^Y}{1 + \rho_1^X \rho_1^Y} \quad (3)$$

Keterangan: N = koefisien korelasi; ρ_1^X = autokorelasi lag-1 variabel X; ρ_1^Y = autokorelasi lag-1 variabel Y

Selain korelasi simultan (lag 0) dilakukan analisis korelasi dengan pergeseran waktu (lag) hingga 3 bulan untuk mengidentifikasi kemungkinan respons tertunda terutama antara CAPE dan curah hujan. Analisis parsial dengan indeks Nino 3.4 untuk mengontrol pengaruh variabilitas iklim global seperti ENSO dengan menggunakan persamaan:

$$r_{xy.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis hubungan spasial bulanan antara SPL dan CAPE selama periode 2004-2023 di wilayah WPPNRI 711 menunjukkan hubungan positif yang dominan di seluruh wilayah penelitian (Gambar 2). Nilai rata-rata SPL dan CAPE disajikan pada Tabel 2, dengan SPL berkisar 28°C dan CAPE 530–1149 J/Kg. Korelasi tertinggi terjadi pada bulan Januari-Februari (>0,8), sesuai dengan musim hujan di Indonesia yang ditandai dengan SPL hangat, kelembapan tinggi dan aktivitas konvektif yang kuat (Fitria dan Pratama, 2013). Pada bulan Maret-April, nilai korelasi menurun menandakan peran faktor atmosfer lain seperti kelembapan dan gerakan vertikal udara dalam pembentukan konveksi (Ayasha, 2022).

Pada bulan Juli–Agustus, sebagian besar wilayah menunjukkan hubungan yang lemah hingga sangat lemah ($r < 0,4$) dan bahkan mendekati nol di beberapa daerah, disebabkan oleh udara kering dari BBU yang membuat atmosfer stabil, menghambat pertumbuhan awan, dan mengurangi curah hujan (Kainama *et al.*, 2014; Kristanto *et al.*, 2017). Puncak korelasi kembali pada bulan Desember ($r > 0,8$) seiring masuknya musim hujan dan peningkatan kelembapan serta pemanasan permukaan laut (Prasetyo *et al.*, 2022).

Korelasi parsial antara SPL dan CAPE yang mengontrol dampak indeks Niño 3.4 menunjukkan nilai $r = 0,28$ ($p < 0,001$), yang menunjukkan

bahwa SPL berpengaruh positif walaupun tidak signifikan terhadap CAPE meskipun variasi ENSO sudah diperhitungkan. Analisis anomali SPL dan CAPE terhadap indeks Niño 3.4 menunjukkan cara ENSO memengaruhi kedua variabel tersebut. ENSO dapat memengaruhi konveksi, distribusi panas laut, anomali SPL *vertical wind shear*, dan kelembapan udara global (Chan, 1985; Ramsay *et al.*, 2008; Boucharel *et al.*, 2016, dalam Yulianti *et al.*, 2025). Pada tahun El Niño, nilai indeks Niño 3.4 mencapai 0,5°C atau lebih, umumnya SPL lebih rendah dibandingkan dengan rata-rata. Sementara pada tahun La Niña ketika nilai indeks Niño 3.4 kurang dari atau sama dengan -0,5°C, SPL dan CAPE cenderung lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa ENSO memengaruhi perubahan jangka pendek dari SPL dan energi konvektif di WPPNRI 711.

Korelasi Temporal SPL dengan CAPE

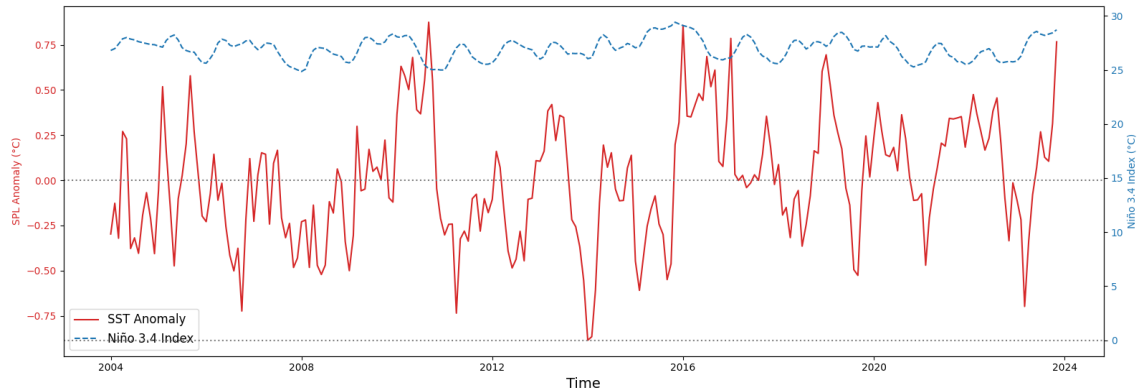
Hasil grafik korelasi temporal antara SPL dan CAPE selama tahun 2004 hingga 2023 (Gambar 3) menunjukkan pola yang searah, di mana peningkatan SPL diikuti oleh peningkatan CAPE. Hubungan ini ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi sebesar 0,71 yang mencerminkan korelasi positif kuat, mengindikasikan bahwa suhu permukaan laut yang lebih tinggi berkontribusi terhadap peningkatan energi potensial untuk proses konvektif melalui penguapan uap air (Rey *et al.*, 2014). Pola musiman yang berulang tiap tahun mencerminkan pengaruh faktor iklim regional seperti monsun dan ENSO.

Tabel 2. Statistik deskriptif SPL dan CAPE

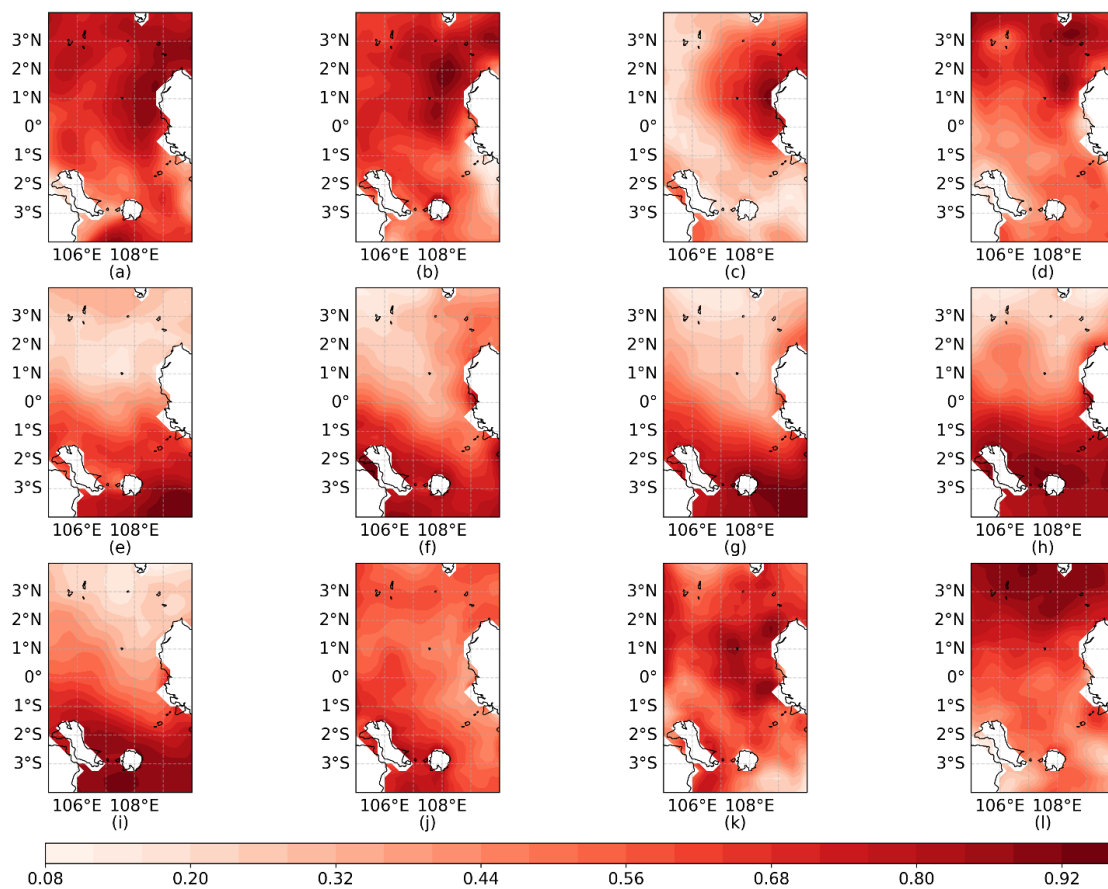
Bulan	SPL Mean (°C)	SPL SD (°C)	CAPE Mean (J/kg)	CAPE SD (J/kg)
1	29,8	0,12	780	85
2	30,0	0,10	800	90
3	29,5	0,15	650	70
4	29,0	0,12	600	60
5	28,8	0,10	580	55
6	28,7	0,09	550	50
7	28,5	0,08	520	45
8	28,4	0,07	500	40
9	28,6	0,09	530	50
10	28,9	0,10	600	55
11	29,3	0,11	700	65
12	29,7	0,12	750	80

Anomali ditemukan pada tahun-tahun tertentu seperti 2010, 2021, dan 2022, di mana peningkatan CAPE tidak diikuti oleh kenaikan SPL. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh variabel lain seperti kecepatan angin dan radiasi matahari yang memengaruhi stabilitas atmosfer, sebagaimana

diungkapkan oleh Sasmita *et al.* (2019). Selain itu, menurut Batubara *et al.* (2022), curah hujan juga dapat digunakan untuk menganalisis interaksi laut-atmosfer sehingga diperlukan studi lebih lanjut menggunakan data curah hujan guna menjelaskan anomali tersebut.



Gambar 2. Grafik anomali SPL terhadap indeks Nino



Gambar 3. Korelasi spasial bulanan antara SPL dengan CAPE (2004-2023) (a) Januari, (b) Februari, (c) Maret, (d) April, (e) Mei, (f) Juni, (g) Juli, (h) Agustus, (i) September, (j) Oktober, (k) November, (l) Desember

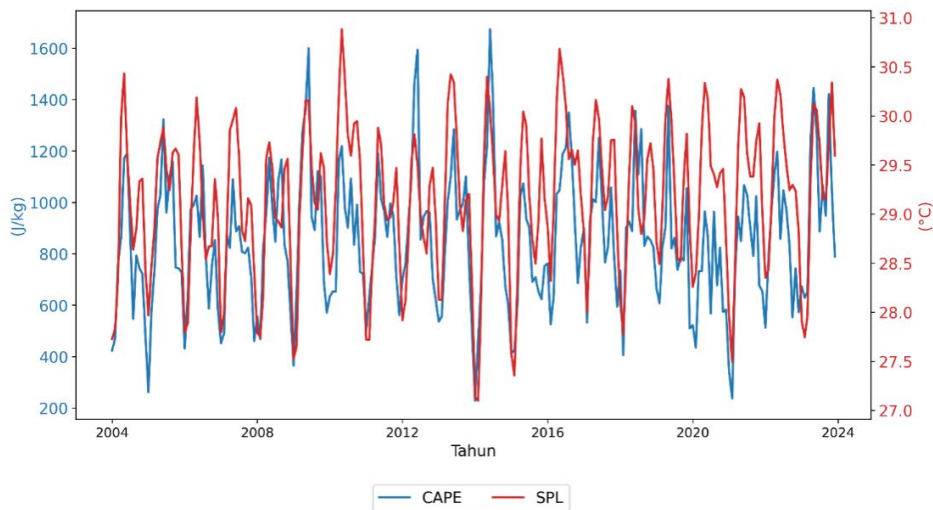
Korelasi positif yang signifikan antara SPL dan CAPE memperkuat pemahaman bahwa SPL berperan penting dalam memicu proses konvektif di atmosfer. Variasi SPL dapat menjadi indikator penting dalam memprediksi aktivitas konveksi dan curah hujan di wilayah penelitian, sehingga informasi ini bermanfaat dalam memahami dinamika cuaca lokal dan regional.

Lag Korelasi SPL dengan CAPE

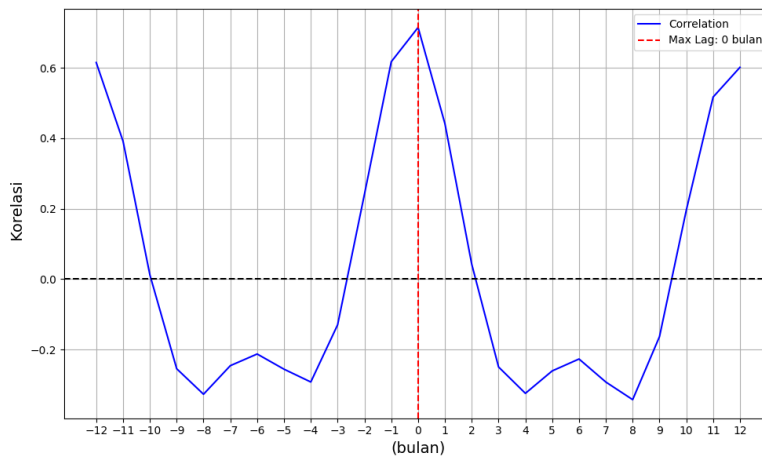
Lag korelasi antara SPL dengan CAPE dari tahun 2004 – 2023 yang disajikan pada Gambar 5, menunjukkan adanya hubungan yang bervariasi tergantung pada pergeseran jeda waktu antara kedua variabel tersebut. Korelasi berkisar antara -0,3 hingga 0,7 dan korelasi tertinggi terjadi pada bulan lag 0, dengan nilai korelasi mencapai 0,71 yang mengindikasikan bahwa peningkatan SPL

cenderung diikuti oleh peningkatan CAPE secara langsung pada bulan yang sama. Hubungan ini mengindikasikan bahwa SPL berperan dalam memicu ketidaksabilan atmosfer untuk mendukung proses konveksi (Ningsih, *et al.*, 2024). Peningkatan korelasi yang terjadi pada bulan Desember, baik positif maupun negatif, menunjukkan bahwa hal tersebut berkaitan dengan siklus musiman tahunan yang berulang.

SPL yang lebih hangat menyediakan energi laten melalui proses evaporasi, yang menyebabkan terjadinya konveksi kuat di atmosfer. Gambar 4 menunjukkan bahwa SPL berperan sebagai pengendali variabilitas CAPE di wilayah maritim Indonesia. Korelasi ini menunjukkan bahwa CAPE merespons peningkatan SPL di wilayah penelitian secara cepat dan terjadi secara bersamaan dalam 1 bulan.



Gambar 4. Fluktuasi SPL dan CAPE (2004-2023)



Gambar 5. Lag korelasi antara SPL dengan CAPE

Korelasi Spasial CAPE dengan Curah Hujan

Analisis korelasi spasial antara CAPE dan curah hujan bulanan selama periode 2004–2023 di WPPNRI 711 menunjukkan bahwa hubungan negatif mendominasi di sebagian besar wilayah penelitian, seperti yang disajikan pada Gambar 5. Pada bulan Januari–Februari ditemukan korelasi negatif dengan nilai berkisar antara 0 hingga -0,6 terutama di bagian tengah dan selatan wilayah studi. Pola ini sejalan dengan peran angin monsun dari Benua Asia yang meningkatkan curah hujan tanpa diiringi peningkatan CAPE. Bulan Maret hingga Mei, korelasi negatif tetap berlangsung dengan nilai antara -0,6 dan -0,4. Meskipun peningkatan radiasi matahari dapat membuat SPL dan CAPE naik, tidak selalu ada hubungan langsung yang jelas dengan jumlah hujan yang turun. Perubahan tingkat kelembapan udara dan aliran udara musiman dapat memengaruhi hubungan antara energi konvektif dan curah hujan (Ayasah, 2022).

Pada bulan Juni–Agustus, korelasi masih negatif yang semakin kuat di bagian tengah dan utara dengan nilai mencapai sekitar -0,7. Kondisi ini dipengaruhi oleh massa udara kering dari Benua Australia yang menghambat konversi energi CAPE menjadi curah hujan. Pola angin memiliki peran terhadap dinamika iklim lokal; tekanan tinggi yang berlangsung lama dapat mengurangi tutupan awan serta ketersediaan uap air yang meningkatkan pemanasan permukaan, sisi lain, siklon tropis dan angin monsun berperan dalam mengangkut kelembapan ke daratan yang mendorong pembentukan awan dan curah hujan serta menimbulkan efek pendinginan (Dastour *et al.*, 2025). Musim transisi pada bulan September hingga Oktober menunjukkan adanya peningkatan, ditandai dengan nilai korelasi yang mencapai 1 di bagian selatan, sedangkan daerah tengah dan utara masih menunjukkan korelasi negatif yang mendominasi. Pada bulan November–Desember, korelasi negatif mulai berkurang karena pasokan kelembapan semakin meningkat dan angin monsun barat dari Asia mulai bergerak aktif. Korelasi negatif yang mendominasi ini menandakan adanya jeda waktu antara CAPE dan curah hujan, seperti yang dijelaskan oleh Muttaqin (2016), bahwa nilai CAPE biasanya menurun mendekati nol saat hujan turun karena energi konvektif sudah digunakan dalam proses pembentukan hujan.

Pengecekan dilakukan untuk mengetahui apakah ada perbedaan waktu antara CAPE dan curah hujan, maka dilakukan analisis fungsi *cross-correlation* (CCF) terhadap waktu yang sudah

diproses dengan menghilangkan tren dan komponen musiman. Batas signifikansi ditentukan dengan tingkat kepercayaan 95% (+0,1265). Hasil menunjukkan nilai CCF pada lag +6 bulan sebesar 0,15 yang sedikit melebihi batas signifikansi tersebut. Karena lag korelasi +6 bulan masih signifikan meskipun komponen musiman dihilangkan, hubungan tersebut tidak sepenuhnya mencerminkan siklus tahunan. Temuan ini menunjukkan bahwa ada hubungan dalam waktu jeda tertentu antara CAPE dan curah hujan. Pola ini sesuai dengan konsep bahwa CAPE bisa berkurang setelah hujan terjadi karena adanya pelepasan energi konvektif selama proses pembentukan awan dan curah hujan. Namun, karena nilai korelasi yang relatif kecil dan besarnya CAPE bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi perubahan curah hujan di wilayah penelitian tersebut.

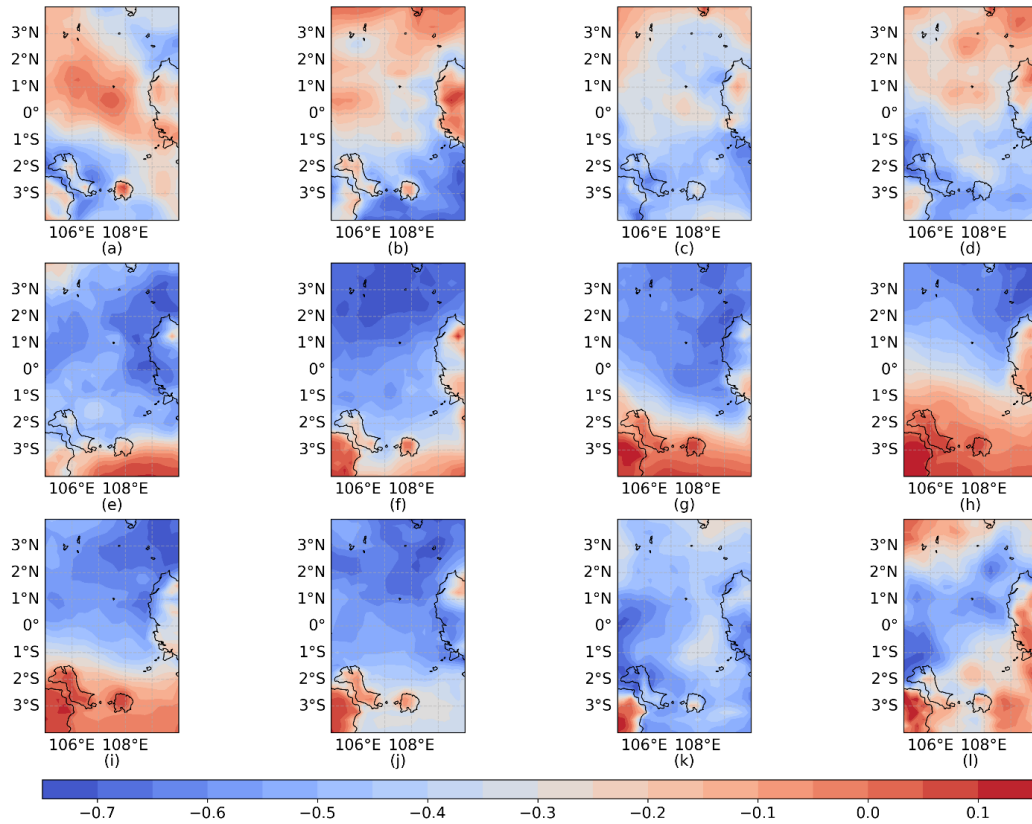
Korelasi Temporal CAPE dengan Curah Hujan

Hasil analisis temporal CAPE dan curah hujan bulanan periode 2004–2023 menunjukkan adanya hubungan negatif yang lemah dengan nilai korelasi sebesar -0,36 (Gambar 6). Nilai ini mengindikasikan bahwa hubungan antara kedua variabel tidak linier, atau jika CAPE meningkat maka curah hujan akan melemah. Hasil analisis *cross-correlation function* (CCF) menunjukkan adanya keterkaitan temporal pada lag +6 bulan dengan CCF 0,15 dengan signifikansi 95% yang mengisyaratkan adanya perbedaan fase antara ketersediaan energi konvektif dan curah hujan. Hasil ini sejalan dengan teori *moist static energy* (MSE) yang menyatakan bahwa perkembangan konveksi tidak hanya ditentukan oleh besarnya CAPE, tetapi juga oleh keseimbangan energi total dalam kolom atmosfer yang mencakup energi laten dan distribusi kelembapan vertikal (Neelin & Held, 1987). Temuan ini juga menandakan karakteristik sistem konveksi tropis yang tidak selalu menunjukkan respons langsung antara CAPE dan curah hujan (Diniyati *et al.*, 2021). Hal tersebut menandakan bahwa meskipun CAPE tinggi, konveksi tidak selalu berkembang menjadi hujan jika tidak didukung oleh kelembapan.

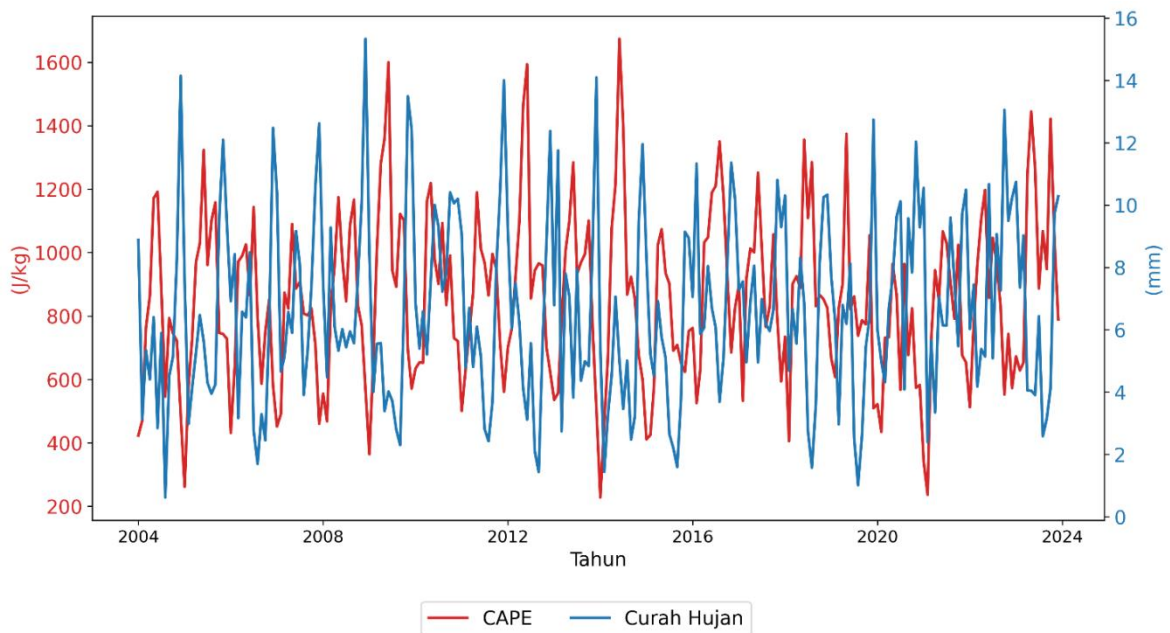
Wilayah Benua Maritim, termasuk Indonesia, memiliki SPL hangat hampir sepanjang tahun, yang menyebabkan konveksi berada di ambang konvektif sekitar 28°C (Graham & Barnet, 1987; Hu *et al.*, 2023). Peningkatan CAPE tidak selalu menghasilkan peningkatan curah hujan, karena atmosfer telah berada dalam keadaan *quasiequilibrium*. Kondisi ini dikenal sebagai *Maritime Continent rainfall paradox*, artinya

wilayah dengan CAPE yang tinggi tidak selalu menunjukkan korelasi linier yang kuat dengan

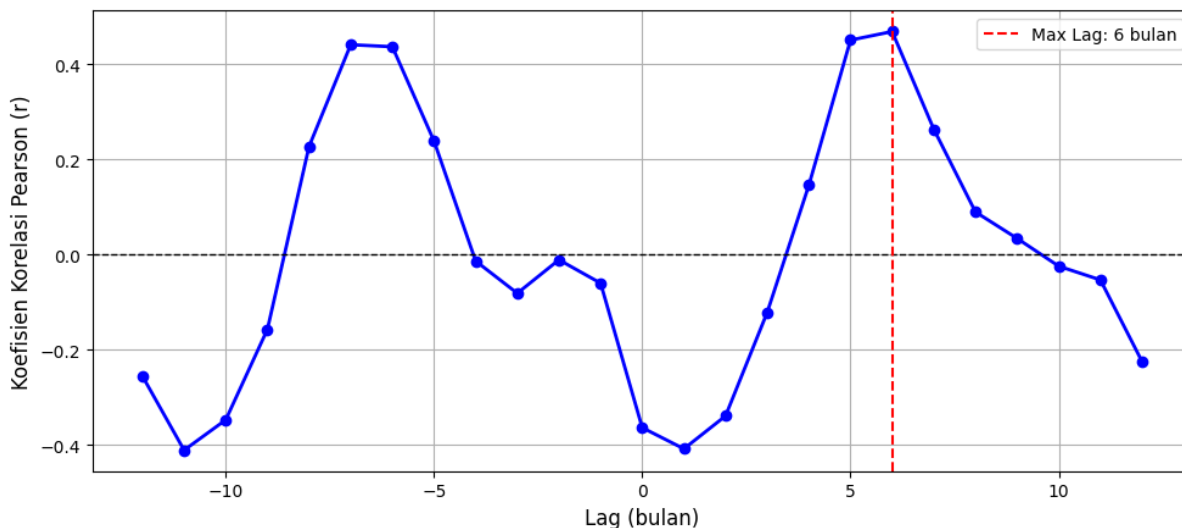
curah hujan akibat kompleksitas dinamika atmosfer tropis (Neale and Slingo, 2003).



Gambar 6. Korelasi spasial antara CAPE dengan curah hujan (2004-2023)



Gambar 7. Fluktuasi antara CAPE dan curah hujan (2004-2023)



Gambar 8. Lag Korelasi antara CAPE dengan Curah Hujan

Nilai puncak CAPE tidak selalu diikuti oleh peningkatan curah hujan. Hal ini menunjukkan bahwa CAPE berfungsi sebagai pendukung dalam pembentukan hujan konvektif. Variabel lain seperti kelembapan, *vertical wind shear*, serta pengaruh fenomena skala besar seperti ENSO dan IOD yang memengaruhi curah hujan (Tongkukut, 2011). Hasil analisis ini memiliki peran penting dalam sistem prakiraan BMKG, CAPE dapat digunakan sebagai indikator awal terjadinya konveksi, tetapi untuk meningkatkan keakuratan prediksi musiman perlu diintegrasikan dengan parameter kelembapan kolom total, anomali SPL, dan indeks variabilitas iklim. Pendekatan multivariat yang mempertimbangkan energi dan kelembapan lebih mewakili dibandingkan dengan hanya menggunakan CAPE sebagai prediktor curah hujan di daerah tropis maritim yang rumit.

Gambar 7 menunjukkan hasil analisis lag korelasi antara CAPE dengan curah hujan bulanan dari tahun 2004 hingga 2023. Berdasarkan grafik tersebut, nilai korelasi bervariasi dari sekitar -0.4 hingga 0.47. Nilai korelasi maksimum sebesar 0.47 terjadi pada lag +6 bulan, yang menunjukkan hubungan yang sangat signifikan secara statistik. Artinya, peningkatan CAPE cenderung diikuti oleh peningkatan curah hujan setelah enam bulan.

Selain itu, pola osilasi positif dan negatif tampak jelas, di mana korelasi positif lainnya juga muncul pada lag negatif sekitar -7 bulan. Hal ini mengindikasikan adanya kemungkinan pengaruh siklus musiman atau fenomena atmosfer laut seperti *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) yang

memengaruhi variabilitas CAPE dan curah hujan di wilayah ini. Hasil ini menunjukkan adanya keterlambatan respons curah hujan terhadap kondisi CAPE yang dapat disebabkan oleh proses akumulasi energi di atmosfer sebelum dilepaskan dalam bentuk presipitasi. Hasil ini berbeda dengan temuan dari Fadila *et al.* (2025) curah hujan di Kalimantan Barat atau daerah ekuator memiliki tipe curah hujan ekuatorial.

Hasil ini memberikan pemahaman penting terkait hubungan *lag* antara CAPE dan curah hujan, yang berguna untuk meningkatkan akurasi model prediksi cuaca jangka menengah di wilayah WPPNRI 711.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan SPL di WPPNRI 711 meningkatkan konveksi atmosfer melalui CAPE, namun hubungannya dengan curah hujan tidak kuat dan terdapat perbedaan waktu. Pembentukan hujan tidak hanya bergantung pada CAPE, tetapi juga pada kelembapan udara, gerakan udara vertikal, dan perubahan iklim. Keterbatasan penelitian meliputi belum mempertimbangkan variabilitas iklim skala besar seperti ENSO dan IOD, tidak ada validasi lapangan, serta hanya menggunakan korelasi sederhana. Disarankan menggunakan model regresi multivariat yang menggabungkan CAPE, kelembapan, anomali SPL, indeks variabilitas iklim, dan *vertical velocity* untuk pemahaman lebih lengkap tentang mekanisme pembentukan hujan di daerah tropis maritim.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldrian, E. & Susanto, R.D., 2003. Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12):1435-1452. doi: 10.1002/joc.950
- Anggreni, R., Muliadi, M. & Adriat, R., 2018. Analisis pengaruh tutupan awan terhadap radiasi matahari di Kota Pontianak. *Prisma Fisika*, 6(3):214-219. doi:10.26418/pf.v6i3.28896
- Ayasha, N., 2022. Kajian analisis parameter vertical velocity dan kaitannya dengan kondisi parameter cuaca saat kejadian hujan es. *Buletin GAW Bariri*, 3(1):17-24. doi:10.31172/bgb.v3i1.64
- Batubara, M.P.N., Zainuri, M., Kunarso, K. & Puryajati, A.D., 2022. Diagnosa perilaku MJO aktif pada saat La Nina kuat (2011/2012) di perairan tropis. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(2):193-205. doi:10.14710/buloma.v11i2.45619
- Dastour, H., Alam, M.M., Dewan, A. & Hasan, Q.K., 2025. Spatiotemporal analysis of land surface temperature and wind dynamics during winter in Bangladesh. *Results in Engineering*, 27:1-21. doi:10.1016/j.rineng.2025.106498
- Diniyati, E., Dwitrisna, M.F.I. & Mulya, A., 2021. Analisis kondisi atmosfer saat banjir dan tanah longsor (studi kasus: Nganjuk, 14 Februari 2021). *SAINSTEK*, 9(1):18-24. doi:10.35583/js.v9i1.133
- Estiningtyas, W., Ramadhani, F. & Aldrian, E., 2007. Analisis korelasi curah hujan dan suhu permukaan laut wilayah Indonesia serta implikasinya untuk prakiraan curah hujan (studi kasus Kabupaten Cilacap). *Agromet Indonesia*, 21(2):46-60. doi:10.29244/j.agromet.21.2.46-60
- Fadila, H., Sudiar, N.Y., Razi, P. & Zulhendra, Z., 2025. Pengaruh ENSO dan IOD terhadap curah hujan di Indonesia. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 9(1):2507-2516.
- Fitria, W. & Pratama, M.S., 2013. Pengaruh fenomena El Nino 1997 dan La Nina 1999 terhadap curah hujan di Biak. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 14(2):65-74. doi:10.31172/jmg.v14i2.156
- Hu, S., Xie, S., Seager, R. & Cane, M.A., 2023. Spatial and seasonal variations of sea surface temperature threshold for tropical convection. *Journal of Climate*, 36(15):4899-4912.
- Kainama, C., Tongkukul, S.H. & Wandayantolis, 2014. Analisis pola distribusi unsur-unsur cuaca di lapisan atas atmosfer pada bulan Januari dan Agustus di Manado. *Jurnal MIPA*, 3(1):20-24. doi:10.35799/jm.3.1.2014.3901
- Kristanto, Y., Agustin, T. & Muhammad, F.R., 2017. Pendugaan karakteristik awan berdasarkan data spektral citra satelit resolusi spasial menengah Landsat 8 OLI/TIRS (studi kasus: Provinsi DKI Jakarta). *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 4(2):42-51. doi: 10.36754/jmkg.v4i2.46
- Ling, J., Zhao, Y. & Chen, G., 2019. Barrier effect on MJO propagation by the Maritime Continent in the MJO Task Force/GEWEX Atmospheric System Study models. *Journal of Climate*, 32(17):5529-5547. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0870.1
- Mahrup, Ma'shum, M. & Fahrudin, 2021. Climate change in the Lesser Sunda Islands: the harsh region in the maritime continent of Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1):1-15. doi: 10.1088/1755-1315/824/1/012115
- Muttaqin, A., Muhammad, F.N. & Abdillah, P.A., 2016. Analisis profil CAPE (Convective Available Potential Energy) selama kegiatan intensive observation period di Dramaga Bogor. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 17(2):83-89.
- Neale, R. & Slingo, J., 2003. The maritime continent and its role in the global climate: a GCM study. *Journal of Climate*, 16:834-848. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0834:TMCAIR>2.0.CO;2
- Neelin, J.D. & Held, I.M., 1987. Modeling tropical convergence based on the moist static energy budget. *Monthly Weather Review*, 115(1):3-12. doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<0003:MTCBOT>2.0.CO;2
- Ninggar, R.R., Siregar, D.C. & Perdana, I.F.P., 2023. Analisis pola distribusi awan konvektif di wilayah Provinsi Banten berbasis radar cuaca. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 4(6):35-43.
- Ningsih, E.N., Agussalim, A., Susanti, B. & Hartoni, 2024. Variabilitas spasio-temporal suhu permukaan laut di pesisir Kabupaten Banyuasin Provinsi Sumatera Selatan. *Jurnal Enggano*, 9(1):1-10. doi:10.31186/jenggano.9.1.1-10

- Nur'utami, M.N. & Hidayat, R., 2016. Influences of IOD and ENSO to Indonesian rainfall variability: role of atmosphere-ocean interaction in the Indo-Pacific sector. *Procedia Environmental Sciences*, 33:196-203. doi:10.1016/j.proenv.2016.03.070
- Nuryanto, D.E. & Badriyah, I.U., 2014. Pengaruh perubahan suhu permukaan laut terhadap curah hujan Benua Maritim Indonesia pada September 2006. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 15(3):147-155. doi: 10.31172/jmg.v15i3.207
- Prasetyo, S., Abdilah, S., Nugraheni, I.R. & Sagita, N., 2022. Studi awan konvektif penyebab hujan es menggunakan radar cuaca Doppler single polarization di Bogor (23 September 2020). *Jurnal Aplikasi Meteorologi*, 1(1):32-42.
- Qian, J., Robertson, A.W. & Moron, V., 2013. Diurnal cycle in different weather regimes and rainfall variability over Borneo associated with ENSO. *Journal of Climate*, 26(5):1772-1790. doi:10.1175/JCLI-D-12-00178.1
- Rey, F.F. & Tongkukut, S.H., 2014. Analisis spasial pengaruh dinamika suhu muka laut terhadap distribusi curah hujan di Sulawesi Utara. *Jurnal MIPA*, 3(1):25-29. doi: 10.35799/jm.3.1.2014.3902
- Sasmita, A., Andrio, D. & Hasibuan, P., 2019. Pemetaan sebaran partikulat dari pembakaran limbah padat industri pengolahan sawit di Kabupaten Kampar, Riau. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 18(2):57-67. doi: 10.31258/jst.v18.n2.p57-67
- Tongkukut, S.H.J., 2011. El-Nino dan pengaruhnya terhadap curah hujan di Manado Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah Sains*, 11(1):102-108. doi:10.35799/jis.11.1.2011.51
- Yulianti, K.K., Ningsih, N.S., Rachmayani, R. & Prasetyo, R., 2025. The influence of El Nino-Southern Oscillation (ENSO) on the characteristic of tropical cyclones in Indonesian waters. *Tropical Cyclone Research and Review*, 14(3):270-286. doi: 10.1016/j.terr.2025.08.002
- Zhu, J., Yu, Y., Guan, Z. & Wang, X., 2022. Dominant coupling mode of SST in maritime continental region and East Asian summer monsoon circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(19):1-18. doi: 10.1029/2022JD036739