

ANALISIS HUBUNGAN PRECIPITABLE WATER HARIAN DENGAN FENOMENA OSCILLASI MADDEN-JULIAN (MJO) PADA SKALA INTRASEASONAL MENGGUNAKAN METODE EOF (2001-2021)

Juan Idhar Jannata
Aurelia Ira Stevi Manabung
Dosso Ganimel Aditya Simanulang
Muhammad Rakien Arroisi
Yosik Norman

Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)
juanidhar@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis hubungan antara Precipitable Water (PW) harian dan fenomena Oscillasi Madden-Julian (MJO) pada skala intraseasonal menggunakan metode Empirical Orthogonal Function (EOF) selama periode 2001-2021. Data PW harian diperoleh dari Reanalysis Data dan difokuskan pada wilayah Indonesia, khususnya Sumatera. Metode EOF digunakan untuk mengidentifikasi pola dominan dalam distribusi spasial dan temporal PW, yang kemudian dikaitkan dengan fase-fase MJO. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai PW di wilayah ini sangat dipengaruhi oleh aktivitas MJO, terutama pada fase konvektif, yang meningkatkan potensi pembentukan awan dan curah hujan. Mode EOF pertama menggambarkan pola variabilitas dominan yang berkaitan erat dengan mekanisme atmosfer tropis. Distribusi PW bervariasi sesuai fase MJO, dengan nilai tertinggi pada musim hujan (Desember-Februari) dan terendah pada musim kemarau (Juni-Agustus). Penelitian ini memberikan wawasan penting tentang dinamika atmosfer di Indonesia, mendukung prakiraan cuaca yang lebih akurat, serta mitigasi dampak cuaca ekstrem.

Kata kunci: *precipitable water, osilasi Madden-Julian, skala intraseasonal, metode EOF, variabilitas atmosfer*

Abstract

This study examines the relationship between daily Precipitable Water (PW) and the Madden-Julian Oscillation (MJO) phenomenon on an intraseasonal scale using the Empirical Orthogonal Function (EOF) method for the period 2001-2021. Daily PW data were sourced from Reanalysis Data and focused on the Indonesian region, specifically Sumatra. The EOF method was employed to identify dominant patterns in the spatial and temporal distribution of PW, which were then correlated with MJO phases. Results indicate that PW values in this region are significantly influenced by MJO activity, especially during convective phases, which enhance cloud formation and precipitation potential. The first EOF mode highlights dominant variability patterns strongly associated with tropical atmospheric mechanisms. PW distribution varies across MJO phases, with the highest values during the wet season (December-February) and the lowest during the dry season (June-August). This study provides critical insights into atmospheric dynamics in Indonesia, supporting more accurate weather forecasts and extreme weather impact mitigation.

Keywords: *precipitable water, Madden-Julian oscillation, intraseasonal scale, EOF method, atmospheric variability*

PENDAHULUAN

Fenomena Madden–Julian Oscillation (MJO) merupakan salah satu sistem variabilitas atmosfer paling dominan di wilayah tropis dengan periode osilasi sekitar 30–60 hari dan pola propagasi dari Samudra Hindia menuju Samudra Pasifik (Madden & Julian, 1972). Fenomena ini dicirikan oleh pergerakan wilayah konveksi aktif yang diikuti oleh fase supresi, sehingga memengaruhi distribusi curah hujan, pembentukan awan, serta dinamika sirkulasi atmosfer di kawasan tropis, termasuk Indonesia. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa aktivitas MJO berkorelasi kuat dengan peningkatan kejadian cuaca ekstrem seperti hujan lebat, banjir, dan badai tropis, terutama saat fase konvektif aktif melintasi wilayah maritim benua (Purwatiningsih dkk., 2020; Zhang, 2005; Wheeler & Hendon, 2004). Oleh karena itu, pemahaman terhadap MJO menjadi sangat penting dalam konteks prediksi cuaca dan iklim intraseasonal.

Salah satu parameter atmosfer yang relevan dalam mengkaji dinamika MJO adalah Precipitable Water (PW), yaitu jumlah total uap air yang terkandung dalam suatu kolom atmosfer dari permukaan hingga lapisan atas. PW merupakan indikator penting dalam menentukan potensi pembentukan awan konvektif dan intensitas curah hujan. Variasi PW pada skala intraseasonal sering kali menunjukkan hubungan yang erat dengan aktivitas MJO, di mana peningkatan nilai PW biasanya terjadi pada fase konvektif aktif (Chen dkk., 2017; Holloway et al., 2013). Dengan demikian, analisis terhadap distribusi dan variabilitas PW dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai proses fisik yang mendasari fenomena MJO.

Untuk mengidentifikasi pola dominan dalam data klimatologi yang kompleks, digunakan metode Empirical Orthogonal Function (EOF), yang secara matematis ekuivalen dengan Principal Component Analysis (PCA) (Preisendorfer, 1988). Metode EOF memungkinkan reduksi dimensi data dengan mengekstraksi mode variabilitas utama yang paling signifikan secara statistik. Dalam konteks klimatologi, EOF banyak digunakan untuk mengidentifikasi pola spasial-temporal seperti variabilitas curah hujan, suhu permukaan laut, dan parameter atmosfer lainnya (Hannachi et al., 2007; Wilks, 2011). Penerapan EOF dalam penelitian ini bertujuan untuk mengungkap pola utama variabilitas harian PW serta keterkaitannya dengan aktivitas MJO, sehingga dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap interaksi antara kelembapan atmosfer dan dinamika konveksi tropis.

Penelitian sebelumnya oleh Nurdiati et al. (2021) menunjukkan bahwa analisis gabungan Fast Fourier Transform (FFT) dan EOF mampu mengidentifikasi karakteristik dominan curah hujan di Kalimantan. Hasil penelitian tersebut mengungkap adanya dua pola utama, yaitu pola ekuator dan pola monsun. Wilayah Kalimantan Utara, Barat, dan Timur cenderung didominasi oleh pola ekuator yang ditandai dengan distribusi curah hujan yang relatif merata sepanjang tahun, sedangkan Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah lebih dipengaruhi oleh pola monsun dengan perbedaan musim hujan dan kemarau yang lebih jelas. Temuan ini juga menunjukkan adanya wilayah dengan karakteristik campuran, yang mencerminkan kompleksitas interaksi sistem atmosfer di kawasan maritim Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keterkaitan antara variabilitas harian Precipitable Water (PW) dengan aktivitas Madden–Julian Oscillation (MJO) pada skala intraseasonal selama periode 2001–2021 menggunakan metode Empirical Orthogonal Function (EOF). Analisis ini diharapkan mampu mengidentifikasi pola dominan variabilitas kelembapan atmosfer serta hubungannya dengan fase-fase MJO. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya kajian ilmiah terkait dinamika atmosfer tropis, tetapi juga memberikan kontribusi praktis dalam meningkatkan akurasi prediksi cuaca serta mendukung upaya mitigasi risiko bencana hidrometeorologi di Indonesia.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif. Metode ini dipilih karena penelitian ini lebih berfokus pada data dalam bentuk angka yang diperoleh dari wilayah penelitian. Penelitian ini berfokus pada analisis hubungan antara *Precipitable Water* (PW) harian dan fenomena *Oscillasi Madden-Julian* (MJO) pada skala intraseasonal menggunakan metode *Empirical Orthogonal Function* (EOF) selama periode 2001-2021. Data PW harian diunduh dari OPeNDAP Server (GDS) pada https://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/ dengan menggunakan *surface daily precipitable water* pada *Reanalysis_Data*. Data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup wilayah Indonesia, khususnya Pulau Sumatera. Data PW dinormalisasi untuk menghilangkan variasi musiman dan trend jangka panjang. Teknik EOF diterapkan pada data PW yang telah dinormalisasi untuk mengidentifikasi mode-mode utama dalam data tersebut. Hasil analisis EOF menghasilkan beberapa mode EOF yang mencerminkan variabilitas dominan dalam data PW. Proses analisis data *precipitable water* (PW) dalam penelitian ini dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python yang dijalankan secara lokal. Berbagai library Python digunakan untuk mendukung analisis data ini. Library *xarray* digunakan untuk membaca dan mengelola data berbentuk NetCDF, memungkinkan manipulasi data multidimensi secara efisien. Library *Cartopy* dan *Matplotlib* digunakan untuk visualisasi data spasial, memberikan representasi yang jelas terhadap pola distribusi PW di wilayah Indonesia. Data PW yang diperoleh dianalisis berdasarkan hubungan temporal dan spasialnya. Langkah pertama adalah melakukan subset data untuk wilayah Indonesia (latitude -11° hingga 6° dan longitude 95° hingga 141°). Kemudian, data tersebut dikelompokkan berdasarkan waktu bulanan untuk menghitung akumulasi bulanan PW. Selanjutnya, data bulanan ini diklasifikasikan ke dalam empat fase utama *Madden-Julian Oscillation* (MJO), yaitu:

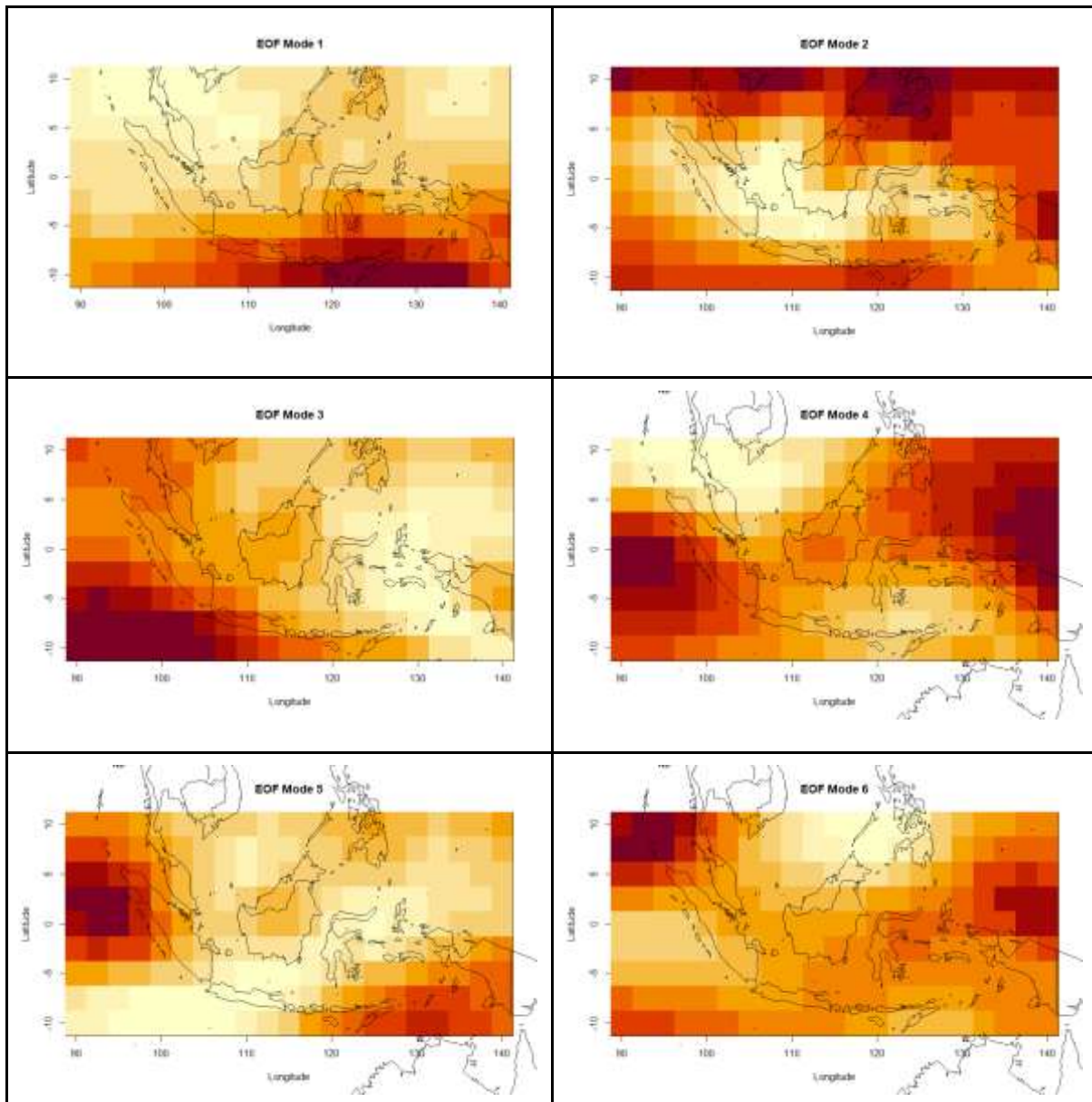
1. Fase 1 & 2 (Convective Phase, Des-Feb): Desember, Januari, dan Februari.
2. Fase 3 & 4 (Dry Phase, Mar-May): Maret, April, dan Mei.
3. Fase 5 & 6 (Convective Phase, Jun-Aug): Juni, Juli, dan Agustus.
4. Fase 7 & 8 (Dry Phase, Sep-Nov): September, Oktober, dan November.

Proses ini menghasilkan data spasial PW yang teragregasi berdasarkan fase-fase MJO. Visualisasi data dilakukan menggunakan peta spasial dengan skema warna tertentu untuk menampilkan distribusi PW di wilayah Indonesia pada masing-masing fase MJO. Proyeksi *Plate Carree* digunakan dalam visualisasi, dilengkapi dengan fitur geografis seperti garis pantai, batas negara, daratan, dan badan air untuk memperjelas interpretasi hasil. Penerapan metode ini memungkinkan identifikasi pola akumulasi PW yang berkaitan dengan aktivitas fase MJO. Hasil analisis dan visualisasi dari penelitian ini diharapkan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang dinamika atmosfer di wilayah Indonesia, khususnya terkait variabilitas PW yang dipengaruhi oleh aktivitas MJO.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis *Empirical Orthogonal Function* (EOF) memberikan gambaran mendalam mengenai distribusi spasial dan temporal *Precipitable Water* (PW) di wilayah Indonesia dalam periode 2001-2021. Mode pertama yang dihasilkan dari analisis EOF menunjukkan pola variabilitas dominan, yang mencerminkan kontribusi utama area tertentu terhadap variabilitas total PW. Mode ini tidak hanya menggambarkan bagaimana PW terdistribusi di seluruh wilayah Indonesia, tetapi juga memberikan indikasi tentang mekanisme atmosfer yang mempengaruhi variasi PW. Pola yang dihasilkan memberikan wawasan penting untuk mengidentifikasi wilayah dengan kontribusi besar terhadap dinamika atmosfer di Asia Tenggara.

Tabel 1. Peta Hasil EOF Mode 1-6



Mode pertama menunjukkan distribusi nilai *precipitable water* yang signifikan hampir seluruh wilayah Indonesia, khususnya di bagian selatan dan barat Indonesia. Mode ini biasanya menggambarkan variansi terbesar dalam data, menunjukkan bahwa fenomena ini mewakili pola spasial yang paling dominan dalam variabilitas *precipitable water*.

Mode kedua menunjukkan distribusi nilai *precipitable water* yang berbeda dibanding dengan mode pertama, dimana distribusi *precipitable water* lebih kuat di wilayah utara dan selatan Indonesia. Mode kedua menjelaskan pola spasial dengan variasi lebih kecil dibanding mode pertama, atau lebih mengarah ke pola yang lebih regional.

Mode ketiga menunjukkan distribusi *precipitable water* yang lebih terlokalisasi, dengan warna merah yang nilai yang tinggi lebih dominan di bagian tengah Indonesia seperti Jawa, Sumatera, dan Kalimantan. Mode ini menjelaskan pola yang lebih spesifik, contohnya ketika adanya perubahan yang tidak tunjukkan pada mode lain.

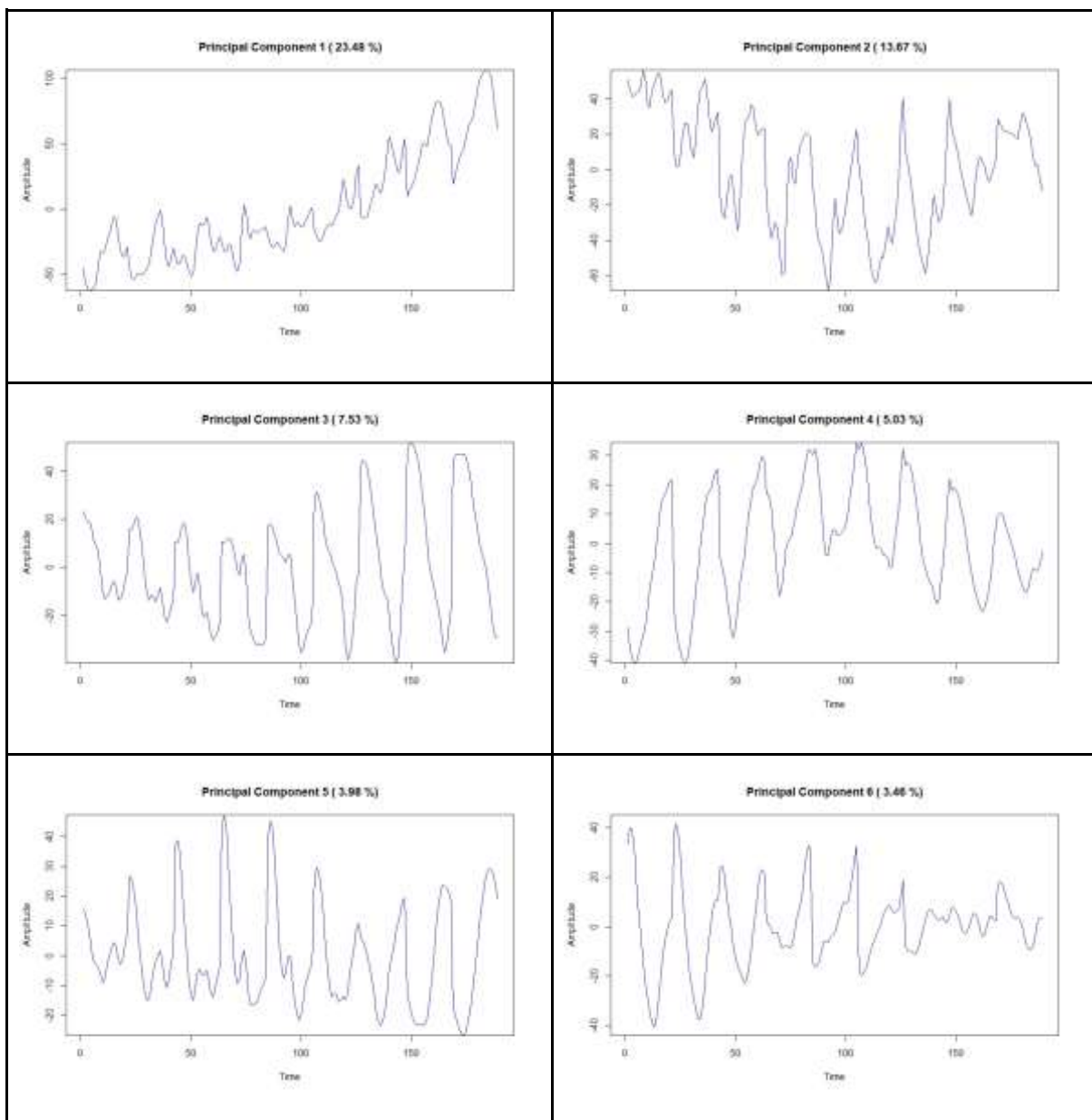
Mode keempat menunjukkan distribusi nilai *precipitable water* yang tinggi di wilayah timur Indonesia, yaitu khususnya wilayah Papua dan Maluku dengan warna merah yang kuat.

Mode ini menjelaskan variasi precipitable water yang lebih kecil dibandingkan dengan mode pertama.

Mode kelima menunjukkan distribusi spasial *precipitable water* dengan nilai yang tinggi di bagian barat Indonesia, khususnya wilayah Sumatera dan Kalimantan dengan nilai yang rendah di bagian Timur Indonesia yaitu wilayah Papua. Mode ini menjelaskan pola variabilitas yang lebih kecil dibanding mode keempat, dengan menunjukkan pengaruh regional yang spesifik.

Mode keenam menunjukkan pola distribusi *precipitable water* dengan nilai yang tinggi di bagian selatan Indonesia dan nilai yang rendah di bagian utara dan sebagian besar timur Indonesia. Mode keenam ini cenderung menjelaskan varian terkecil di antara keenam mode, tetapi tetap signifikan untuk pola atau fase tertentu.

Tabel 2. Principal Component EOF Mode 1-6

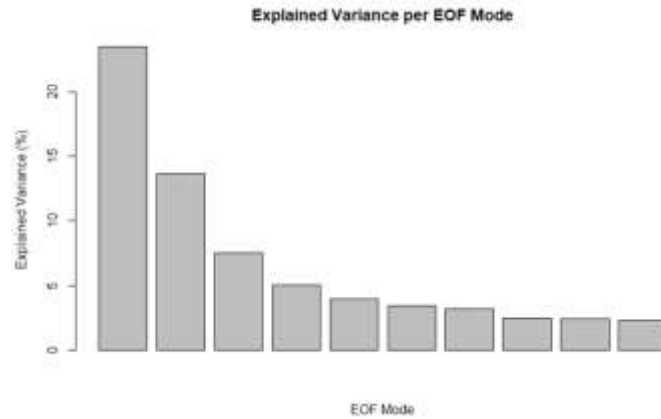


Pada tabel 2. menunjukkan grafik analisis Principal Component EOF Mode 1-6 dari data Precipitable Water (PW) yang menggunakan metode *Empirical Orthogonal Function* (EOF).

- PC Mode 1 menjelaskan sebagian besar variansi sekitar 23.48% dari total data, yang menunjukkan pola dominan yang berkontribusi terhadap variabilitas precipitable water.
- PC Mode 2 menjelaskan sekitar 13.67% dari variansi data, yang jauh lebih kecil dari PC mode 1 namun tetap signifikan. Pola ini cenderung menggambarkan variabilitas lokal yang lebih kompleks.
- PC Mode 3 menjelaskan sekitar 7.53% dari total variansi data. Pola ini menunjukkan variansi akibat fenomena musiman tertentu.
- PC Mode 4 menjelaskan sekitar 5.03% dari total variansi data, tetapi grafik menunjukkan pola osilasi tahunan yang konsisten.
- PC Mode 5 menjelaskan sekitar 3.98% dari total variansi data, dengan kontribusi mode ini dalam menjelaskan variabilitas utama Precipitable Water cukup terbatas.
- PC Mode 6 menjelaskan sekitar 3.46% dari total variansi data, dengan menunjukkan bahwa mode ini kurang signifikan untuk menjelaskan pola temporal utama *precipitable water*.

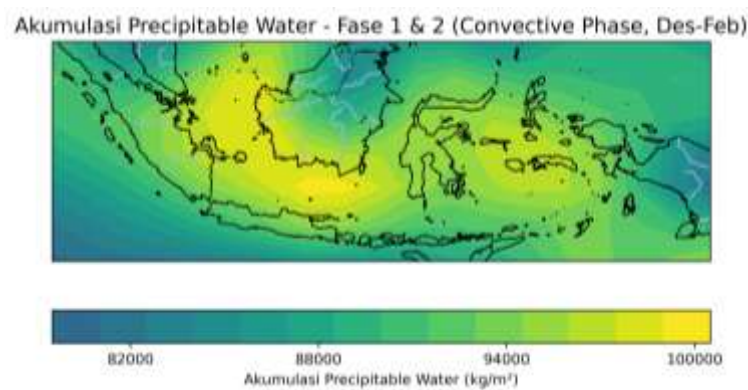
Kesimpulannya bahwa mode 1 paling signifikan karena menggambarkan pola tahunan dominan dan tren jangka panjang. Di sisi lain, Mode 3 dan Mode 4 menekankan pentingnya osilasi semi-tahunan dalam variabilitas PW di wilayah tropis. Mode 5 dan 6 memberikan kontribusi kecil dengan pola fluktuasi yang kurang signifikan. Kombinasi analisis ini dapat memberikan wawasan lebih dalam jika dikaitkan dengan indeks iklim seperti MJO, ENSO, atau IOD.

Peta mode pertama dari analisis *Empirical Orthogonal Function* (EOF) di wilayah Indonesia menampilkan distribusi spasial dari mode EOF pertama yang menggambarkan pola variabilitas dominan dalam data iklim atau meteorologi periode tahun 2001-2021. Warna pada peta bervariasi dari oranye terang hingga merah tua, yang menunjukkan nilai EOF dari rendah ke tinggi. Mode pertama ini menjelaskan proporsi terbesar dari variabilitas total dalam data *Precipitable Water* (PW), memberikan wawasan tentang bagaimana nilai PW bervariasi di seluruh wilayah, terutama di Indonesia. Warna oranye terang menunjukkan area dengan nilai EOF yang lebih rendah, yang berarti kontribusi area tersebut terhadap variabilitas total PW lebih kecil. Sebaliknya, warna merah menunjukkan area dengan nilai EOF yang lebih tinggi, yang berarti kontribusi area tersebut lebih besar terhadap variabilitas total PW. Misalnya, wilayah Sumatra dan Kalimantan dengan warna merah tua menunjukkan bahwa daerah-daerah ini memiliki nilai PW yang tinggi dan berkontribusi signifikan terhadap variabilitas total PW di wilayah Asia Tenggara. Pola ini penting untuk memahami dinamika utama yang mengontrol distribusi PW, mengidentifikasi area yang paling dipengaruhi oleh variabilitas PW, dan dapat digunakan untuk penelitian iklim, prediksi cuaca, serta manajemen sumber daya alam di wilayah Indonesia.



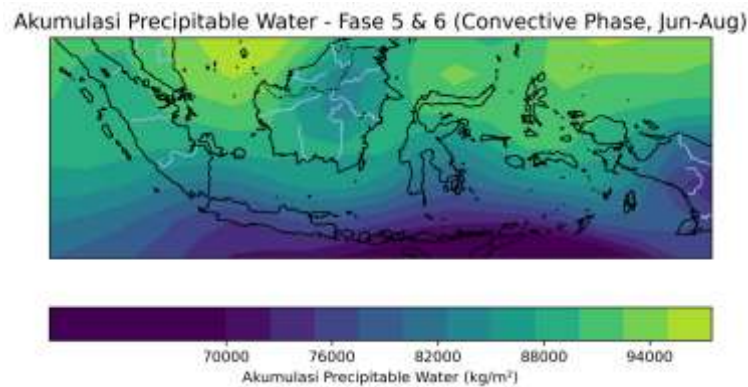
Gambar 1. Explained Variance per EOF Mode

Grafik ini menunjukkan bagaimana kontribusi setiap mode EOF dalam menjelaskan variabilitas data. Mode EOF pertama menjelaskan lebih dari 20% dari total varians, yang menunjukkan bahwa mode ini memiliki peran dominan dalam menjelaskan pola utama dalam data. Mode EOF kedua menjelaskan sekitar 10% dari total varians, sedangkan mode-mode berikutnya menjelaskan varians yang semakin kecil. Grafik ini penting dalam analisis data multivariat karena memberikan gambaran tentang seberapa banyak varians yang dapat dijelaskan oleh setiap mode EOF. Dalam konteks penelitian ini, mode EOF yang lebih tinggi (misalnya, mode pertama dan kedua) akan memberikan wawasan utama tentang pola dominan dalam Precipitable Water (PW) yang terkait dengan fenomena Osilasi Madden-Julian (MJO). Penelitian ini menganalisis hubungan antara *Precipitable Water (PW)* harian dan fenomena *Madden-Julian Oscillation (MJO)* pada skala intraseasonal menggunakan metode *Empirical Orthogonal Function (EOF)* selama periode 2001-2021. Berdasarkan peta akumulasi *air precipitable*, hasil penelitian menunjukkan variasi spasial dan temporal PW yang signifikan di wilayah Indonesia, khususnya di Sumatera.



Gambar 2. MJO Fase 1 dan 2 di Indonesia

Gambar 2. menunjukkan peta akumulasi Precipitable Water (PW) selama fase konvektif dari Desember hingga Februari. Pada periode ini, wilayah Indonesia, terutama Sumatra, Kalimantan, dan bagian lainnya menunjukkan nilai PW yang tinggi, diwakili oleh warna kuning dan oranye. Ini menunjukkan bahwa atmosfer mengandung lebih banyak uap air selama bulan-bulan ini, yang berpotensi menghasilkan curah hujan yang tinggi.



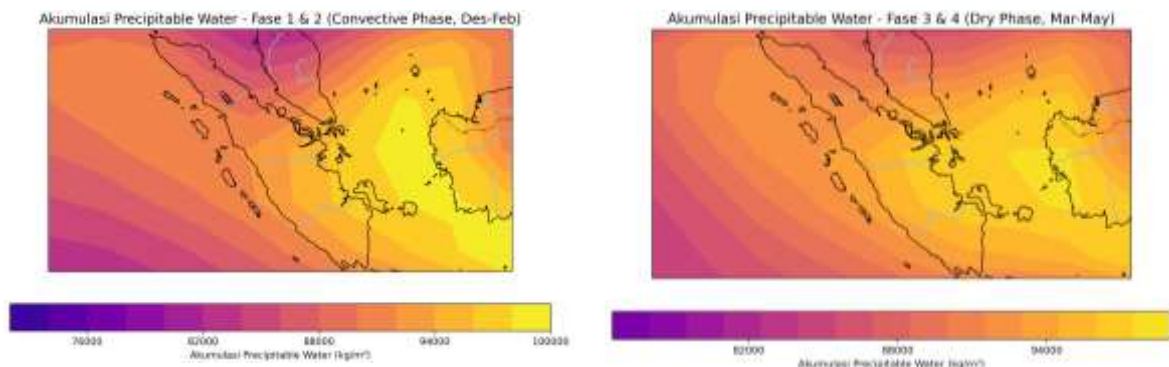
Gambar 3. MJO Fase 5 dan 6 di Indonesia

Gambar 3. menunjukkan peta akumulasi PW selama fase konvektif dari Juni hingga Agustus. Pada periode ini, nilai PW di wilayah yang sama cenderung lebih rendah, diwakili oleh warna biru hingga hijau. Ini menunjukkan bahwa atmosfer mengandung lebih sedikit uap air dibandingkan dengan fase sebelumnya. Perbedaan signifikan dalam nilai PW antara Desember-Februari dan Juni-Agustus dapat dikaitkan dengan aktivitas Osilasi Madden-Julian (MJO) dan siklus musiman di wilayah tropis. Pada periode Desember hingga Februari, MJO sering berada dalam fase aktif di Samudra Hindia dan bergerak menuju Pasifik Barat. Fase aktif MJO meningkatkan aktivitas konvektif, yang berarti lebih banyak pembentukan awan dan curah hujan di wilayah tropis seperti Indonesia. Akibatnya, nilai PW tinggi karena atmosfer dipenuhi dengan uap air. Desember hingga Februari juga bertepatan dengan musim hujan di Indonesia, yang secara alami meningkatkan jumlah uap air di atmosfer karena peningkatan curah hujan.

Sebaliknya, selama bulan-bulan Juni hingga Agustus, MJO biasanya kurang aktif di wilayah Indonesia. Fase pasif MJO mengurangi aktivitas konvektif, yang berarti lebih sedikit pembentukan awan dan curah hujan, sehingga nilai PW lebih rendah. Juni hingga Agustus bertepatan dengan musim kemarau di Indonesia. Curah hujan berkurang secara signifikan selama periode ini, mengurangi jumlah uap air di atmosfer. Perbedaan antara nilai PW pada periode Desember-Februari dan Juni-Agustus mencerminkan pengaruh siklus musiman dan aktivitas MJO di wilayah tropis. Selama Desember-Februari, fase aktif MJO dan musim hujan menghasilkan nilai PW yang tinggi karena peningkatan aktivitas konvektif dan curah hujan. Sebaliknya, selama Juni-Agustus, fase pasif MJO dan musim kemarau menyebabkan nilai PW yang lebih rendah karena berkurangnya aktivitas konvektif dan curah hujan.

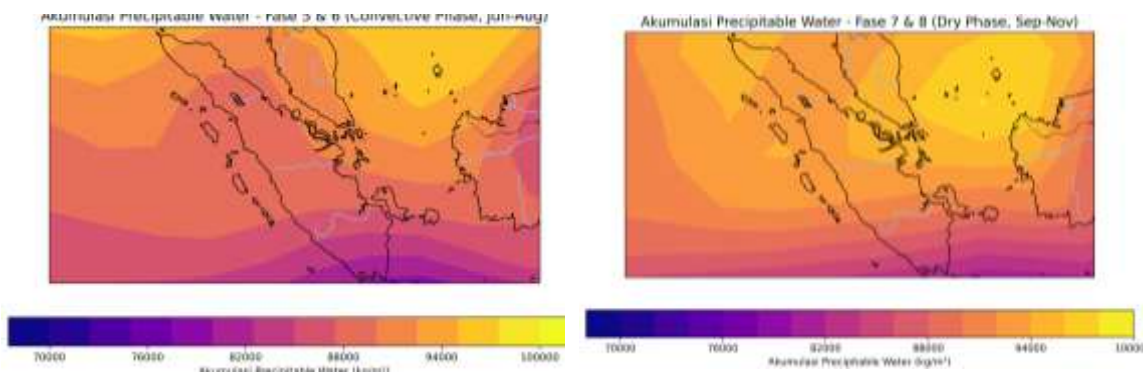
Analisis Mode EOF Precipitable Water di Sumatera

Hasil dari pengolahan data Precipitable Water harian dan data indeks MJO pada wilayah Indonesia, khususnya pada pulau Sumatera periode 2001-2021 menunjukkan Mode EOF menggambarkan pola Precipitable Water yang dominan dengan konsentrasi tinggi di sekitar khatulistiwa, terutama di wilayah Sumatera yang dipengaruhi kuat oleh MJO.



Gambar 4. MJO Fase 1- 2 dan 3-4 di Sumatra

Pada peta akumulasi PW selama fase Desember-Februari, terlihat bahwa wilayah Sumatera, terutama bagian Sumatera Selatan, memiliki nilai PW yang tinggi, yang diwakili oleh warna kuning dan oranye. Nilai ini menunjukkan akumulasi air precipitable yang signifikan, mencerminkan kondisi atmosfer yang mendukung curah hujan tinggi. Ini konsisten dengan peran MJO dalam meningkatkan aktivitas konvektif di wilayah ini selama periode musim hujan. Selanjutnya, peta akumulasi PW untuk fase Maret-Mei menunjukkan distribusi PW yang lebih merata dengan nilai yang lebih rendah dibandingkan fase Desember-Februari. Wilayah Sumatera menunjukkan nilai PW yang sedang, yang diwakili oleh warna orange hingga Kuning. Distribusi ini mencerminkan periode transisi menuju musim kemarau, di mana aktivitas konvektif mulai berkurang.



Gambar 4. MJO Fase 5-6 dan 7-8 di Sumatra

Pada peta akumulasi PW selama fase Juni-Agustus, wilayah Sumatera, terutama bagian selatan dan barat, menunjukkan nilai PW yang relatif lebih rendah. Dimana penurunan nilai PW yang rendah, diwakili oleh warna keunguan pada data hasil olahan. Penurunan ini berbanding lurus dengan kondisi cuaca di bulan Juni-Agustus yang dominan mengalami musim kering, yang menyebabkan jarang terjadi hujan selama musim kemarau, dimana aktivitas konvektif dan curah hujan berkurang secara signifikan. Terakhir, peta akumulasi PW untuk fase September-November menunjukkan peningkatan nilai PW, terutama di bagian barat dan tengah pulau. Warna oranye dan kuning pada peta mencerminkan akumulasi air precipitable yang tinggi, menunjukkan adanya aktivitas konvektif yang meningkat sejalan dengan periode

musim peralihan, di mana aktivitas konvektif dan curah hujan mulai meningkat secara signifikan seiring memasuki periode penghujan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis variabilitas spasial dan temporal dari Precipitable Water (PW) di wilayah Indonesia, khususnya Sumatera, menggunakan data harian PW dan indeks Osilasi Madden-Julian (MJO) selama periode 2001-2021. Mode pertama dalam analisis Empirical Orthogonal Function (EOF) menunjukkan bahwa wilayah Sumatera mengalami pola variabilitas PW yang dominan dengan konsentrasi tinggi, terutama selama fase aktif MJO. Hasil ini mengonfirmasi bahwa MJO berperan penting dalam meningkatkan aktivitas konvektif dan curah hujan di wilayah tersebut selama musim hujan.

Distribusi nilai PW yang tinggi selama bulan Desember hingga Februari mencerminkan aktivitas konvektif yang kuat akibat fase aktif MJO, sementara nilai PW yang lebih rendah selama Juni hingga Agustus mencerminkan fase pasif MJO yang bertepatan dengan musim kemarau. Mode EOF yang lebih tinggi mengungkap variasi PW yang lebih terlokalisasi, dengan perbedaan signifikan dalam distribusi kelembaban di berbagai wilayah Indonesia.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan wawasan penting tentang hubungan antara variabilitas PW dan aktivitas MJO di Indonesia. Pemahaman ini sangat bermanfaat untuk prediksi cuaca, manajemen sumber daya air, dan mitigasi dampak cuaca ekstrem di wilayah tropis. Dengan mengetahui bagaimana MJO mempengaruhi distribusi kelembaban sepanjang tahun, strategi yang lebih efektif dapat dikembangkan untuk menghadapi perubahan cuaca intraseasonal di wilayah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, S.S., Houze, R.A., & Mapes, B.E. (2017). Multiscale variability of deep convection. *Journal of Climate*.
- Hannachi, A., Jolliffe, I.T., & Stephenson, D.B. (2007). Empirical Orthogonal Functions and related techniques. *International Journal of Climatology*.
- Holloway, C.E., Woolnough, S.J., & Lister, G.M.S. (2013). Precipitable water and convection. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Madden, R.A., & Julian, P.R. (1972). Description of global-scale circulation cells in the tropics. *Journal of the Atmospheric Sciences*.
- Nurdiati, S., et al. (2021). Analisis pola curah hujan di Kalimantan menggunakan FFT dan EOF.
- Preisendorfer, R.W. (1988). *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*. Elsevier.
- Purwatiningsih, R., dkk. (2020). Variabilitas MJO di Indonesia.
- Wheeler, M.C., & Hendon, H.H. (2004). An all-season real-time multivariate MJO index. *Monthly Weather Review*.
- Wilks, D.S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- Zhang, C. (2005). Madden–Julian Oscillation. *Reviews of Geophysics*.