

STUDI *EMPHIRICAL ORTHOGONAL FUNCTION* (EOF) VARIABILITAS KELEMBABAN RELATIF DI LAPISAN BAWAH SELAMA FENOMENA ENSO DI INDONESIA

**Hesty Fauziah^{1*}, Gusti Agung Prabowo², Kris Anderson P.Saragih³,
Samuel Fernandez Pardede⁴**

¹²³⁴*Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*

*Email: hestyfauziahnst@gmail.com

Abstrak

Variabilitas kelembaban relatif memainkan peran krusial dalam dinamika atmosfer, khususnya di wilayah tropis seperti Indonesia yang sangat dipengaruhi oleh fenomena global seperti El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola dominan variabilitas kelembaban relatif di lapisan bawah atmosfer selama periode ENSO di Indonesia menggunakan metode *Empirical Orthogonal Function* (EOF) dan *Power Spectral Density* (PSD). Data kelembaban relatif 925 mb dari ERA5 dengan resolusi $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ digunakan dalam penelitian ini untuk periode Januari 1990 hingga Oktober 2024. Hasil analisis menunjukkan bahwa mode kedua (PC2) memiliki hubungan negatif dengan indeks NINO 3.4, menandakan pengaruh kuat ENSO terhadap variabilitas kelembaban relatif. Mode pertama (PC1) dan ketiga (PC3) menunjukkan pola yang lebih kompleks, dengan kontribusi yang lebih besar dari faktor lokal dan regional. Analisis PSD memperlihatkan bahwa PC2 mengalami osilasi signifikan dalam rentang waktu 15-70 bulan, yang sesuai dengan siklus ENSO. Selama El Niño, kelembaban relatif di Indonesia cenderung menurun, terutama di wilayah barat dan tengah, sedangkan selama La Niña kelembaban meningkat secara signifikan di wilayah yang sama.

Kata-kata kunci: Variabilitas Kelembaban Relatif, ENSO, Indonesia

Abstract

Relative humidity variability plays a crucial role in atmospheric dynamics, especially in tropical regions such as Indonesia which is strongly influenced by global phenomena such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO). This research aims to analyze the dominant pattern of relative humidity variability in the lower layers of the atmosphere during the ENSO period in Indonesia using the Empirical Orthogonal Function (EOF) and Power Spectral Density (PSD) methods. 925 mb relative humidity data from ERA5 with a resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ is used in this study for the period January 1990 to October 2024. The analysis results show that the second mode (PC2) has a negative relationship with the NINO 3.4 index, indicating a strong influence ENSO on relative humidity variability. The first (PC1) and third (PC3) modes show a more complex pattern, with greater contributions from local and regional factors. PSD analysis shows that PC2 experiences significant oscillations in the time range of 15-70 months, which corresponds to the ENSO cycle. During El Niño, relative humidity in Indonesia tends to decrease, especially in the western and central regions, while during La Niña humidity increases significantly in the same regions.

Keywords : Relative Humidity Variability, ENSO, Indonesia

I. PENDAHULUAN

Variabilitas iklim merupakan fenomena yang kompleks yang menarik untuk dikaji. Salah satu aspek penting dari variabilitas iklim adalah kelembaban (Miftahuddin, Pratama, and Setiawan 2021). Dalam penelitian yang dilakukan (Al-Azkie et al. 2019) terdapat 60.33% nilai R^2 yang menunjukkan bahwa kelembaban sebagai variabel yang sangat kuat memengaruhi curah hujan. Oleh karena itu kelembaban menjadi parameter yang krusial dalam berbagai proses meteorologi dan hidrologi, seperti pembentukan awan, dan hujan.

Sebagai negara kepulauan yang berada di wilayah tropis, variabilitas kelembaban di Indonesia sangat dinamis. Selain faktor lokal seperti monsun, variabilitas kelembaban juga sangat dipengaruhi oleh fenomena global seperti ENSO. *El Nino Southern Oscillation* (ENSO) merupakan fenomena kompleks yang melibatkan interaksi antara lautan dan atmosfer di kawasan tropis Samudra Pasifik. ENSO ditandai oleh perubahan signifikan suhu permukaan laut (SPL), khususnya berupa peningkatan suhu di wilayah ekuator bagian tengah dan timur. Perubahan ini tidak hanya memengaruhi kondisi oseanografi, tetapi juga berdampak luas pada pola cuaca global, termasuk curah hujan, tekanan atmosfer, dan distribusi angin di berbagai belahan dunia (Millenia, Helmi, and Maslukah 2023).

El Nino dan La Nina merupakan dua fase utama dari fenomena ENSO. El Nino, yang merupakan fase positif dari ENSO, terjadi ketika suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature*) di wilayah Pasifik Tropis bagian tengah dan timur meningkat secara signifikan di atas rata-rata. Sebaliknya, La Nina adalah fase negatif dari ENSO, yang ditandai dengan penurunan SST di area yang sama sehingga menjadi lebih dingin dari kondisi rata-rata. Selama fase El Nino, kondisi atmosfer cenderung lebih kering, hal tersebut menyebabkan penurunan kelembaban relatif, sehingga sebagian besar wilayah Indonesia mengalami musim kemarau yang lebih panjang dan kering, dengan potensi terjadinya kekeringan serta keterlambatan awal musim hujan. Sebaliknya, selama fase La Nina, peningkatan suplai uap air dari Samudra Pasifik Tropis sering kali menyebabkan peningkatan kelembaban relatif atmosfer, yang berkontribusi pada intensifikasi atau peningkatan curah hujan, sehingga musim hujan tiba lebih awal dan berpotensi menyebabkan banjir di beberapa daerah (Hidayat et al. 2022).

Empirical orthogonal function (EOF) adalah metode statistik yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi pola dominan variabilitas dalam data spasial – temporal (Zhang and Moore 2015). Dalam konteks penelitian ini, EOF akan mengidentifikasi pola – pola dominan variabilitas kelembaban relatif di lapisan bawah selama periode ENSO di Indonesia, serta akan menganalisis hubungan antara variabilitas kelembaban relatif tersebut dengan periode ENSO yang terjadi.

Banyak penelitian telah mengkaji pengaruh ENSO terhadap curah hujan di Indonesia, namun studi yang secara spesifik membahas hubungan antara ENSO dan variabilitas kelembaban relatif masih tergolong terbatas. Padahal, kelembaban memegang peranan krusial dalam mengatur berbagai proses atmosfer, seperti pembentukan awan dan presipitasi. Oleh karena itu, memahami pola variabilitas kelembaban relatif dalam konteks ENSO sangat penting untuk memberikan wawasan yang lebih mendalam dan komprehensif tentang dinamika variabilitas iklim di Indonesia.

II. METODE PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data kelembaban relatif (*relative humidity*, RH) pada lapisan bawah yakni 925 mb yang diperoleh dari dataset reanalisis ERA5 (*European Centre for Medium – Range Weather Forecast*, ECMWF) yang diakses pada link berikut: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> dengan resolusi spasial 0,25° x 0,25° dan waktu penelitian yang digunakan adalah 01 Januari 1990 hingga 01 Oktober 2024. Sedangkan wilayah penelitian ini mencakup seluruh wilayah Indonesia yakni pada koordinat 6°LU - 11°LS dan 95°BT - 141°BT.

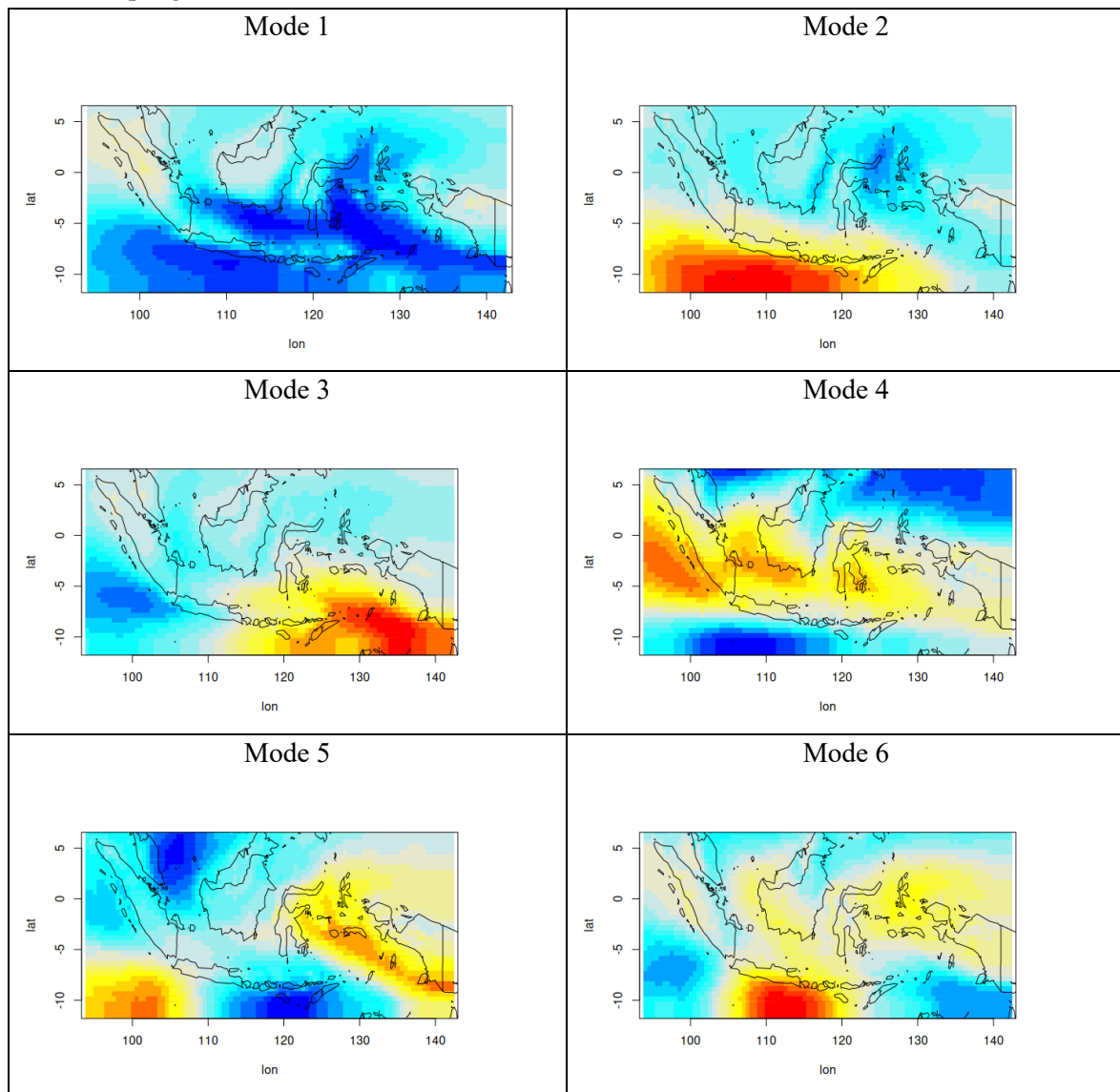
Metode pengolahan data yang digunakan adalah *Empirical Orthogonal Function* (EOF) serta *Power Spectral Density* (PSD). EOF digunakan untuk mengidentifikasi pola spasial dominan dari variabilitas kelembaban relatif di Indonesia, sedangkan PSD diterapkan untuk mendeteksi hubungan temporal dari mode – mode utama yang diperoleh dari EOF dengan fenomena ENSO. Kemudian, hasil dari pengolahan data dengan kedua metode tersebut yakni visualisasi dalam bentuk peta spasial dan grafik temporal yang akan menggambarkan pengaruh ENSO terhadap variabilitas kelembaban relatif di Indonesia.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis EOF

Gambar 1. merupakan peta spasial EOF yang dikategorikan dalam 6 mode untuk menjelaskan masing – masing pola dominan variabilitas kelembaban relatif pada fenomena ENSO. Pada masing – masing peta spasial terdapat 2 warna kontras yakni merah kekuningan (nilai variabel tinggi) dan biru tua (nilai variabel rendah) dengan nilai persentase variance per mode seperti pada Gambar 2.

Pada mode 1, tidak ditemukan variasi kelembaban relatif yang terjadi di wilayah Indonesia, hal tersebut mungkin disebabkan karena nilai kelembaban relatif yang rendah (biru) pada wilayah Laut Jawa, Laut Banda, dan sebagian pulau Jawa serta Sulawesi dengan persentase varians >50% bukan berasal dari pengaruh ENSO.

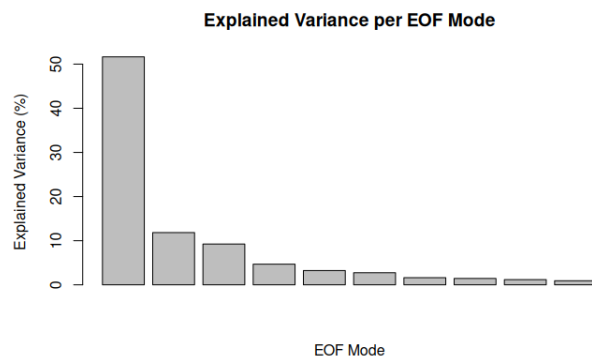


Gambar 1. Pola Spasial EOF

Sedangkan pada mode 2 dengan nilai varians > 10% dari total varians keseluruhan menjelaskan adanya variabilitas kelembaban relatif yang terjadi, yakni di Pulau Jawa menunjukkan nilai RH yang tinggi sedangkan di wilayah Sulawesi Utara menunjukkan nilai RH yang rendah. Sedangkan pada mode 3 dengan nilai varians 9% menunjukkan variabilitas kelembaban relatif yang terjadi. Adanya perbedaan yang cukup terlihat di sebagian wilayah Indonesia bagian barat dan sebagian wilayah

Indonesia bagian timur yakni nilai RH yang tinggi di sebagian wilayah Indonesia timur menunjukkan wilayah tersebut terdampak pengaruh La Nina. Hal tersebut juga terlihat pada mode 5 dengan perbedaan yang mencolok di wilayah Indonesia barat, tengah dan timur, dengan nilai varians sekitar 4% menjelaskan variabilitas kelembaban relatif yang terjadi juga saat fenomena La nina.

Sedangkan pada mode 4 dan 6 dengan varians masing- masing 5% dan 3% menunjukkan variabilitas RH yang terjadi tersebar hampir menyeluruh di wilayah Indonesia dengan nilai RH yang tertinggi pada mode 4 di bagian barat Pulau Sumatera, dan selat Karimata. Sedangkan untuk mode 6 nilai RH tertinggi di sebelah selatan pulau Jawa.

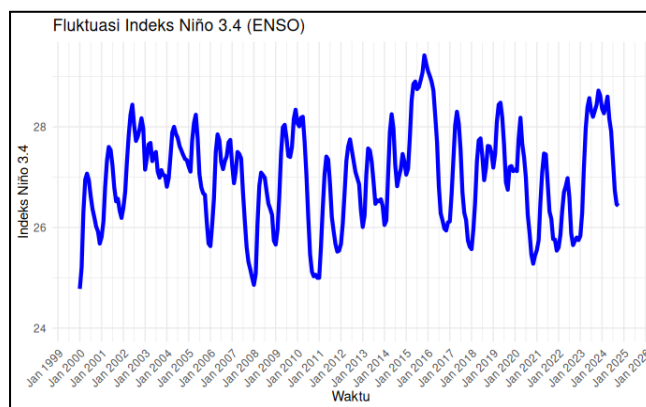


Gambar 2. Diagram Varians Mode EOF

Gambar 2. merupakan nilai persentase varians masing – masing mode EOF yang ada dengan varians tertinggi pada mode 1 yakni > 50 % dari total varians yang ada, di ikuti dengan mode 2,3,4, dst

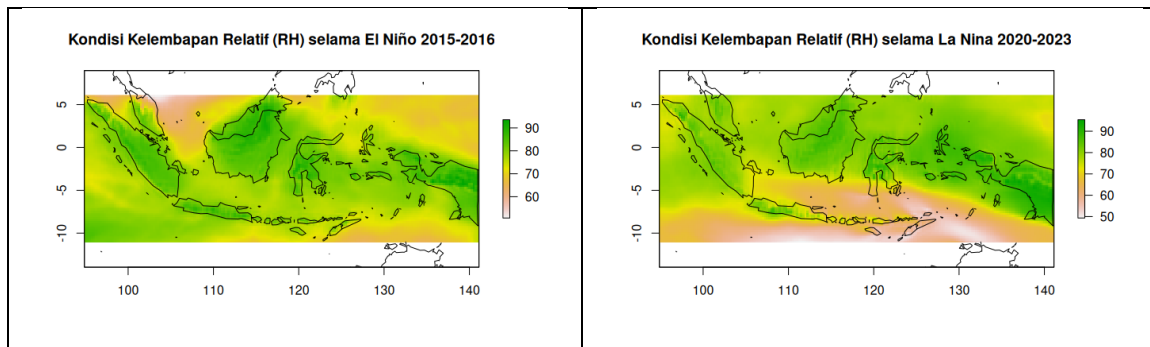
Analisis RH berdasarkan Kondisi El Nino dan La Nina

Indeks Nino 3.4 adalah ukuran standar yang digunakan untuk memantau kondisi ENSO. Berikut merupakan diagram fluktuasi indeks Nino 3.4 dari tahun 2000 – 2024.



Gambar 3. Diagram Fluktuasi Indeks Nino 3.4

Berdasarkan Gambar 3. terlihat beberapa puncak diagram dan yang paling signifikan di tahun 2015 – 2016 yang menandakan terjadi fenomena El Nino karena nilai indeks yang ditunjukkan lebih besar dari nilai rata-rata. Sedangkan pada tahun 2020 – 2023 terlihat nilai indeks ketiganya berturut – turut rendah yang menandakan hal tersebut terjadinya fenomena La Nina. Berdasarkan interpretasi diagram pada Gambar 3. maka dapat diketahui kondisi RH pada masing – masing fenomena tersebut yang tertera pada Gambar 4.

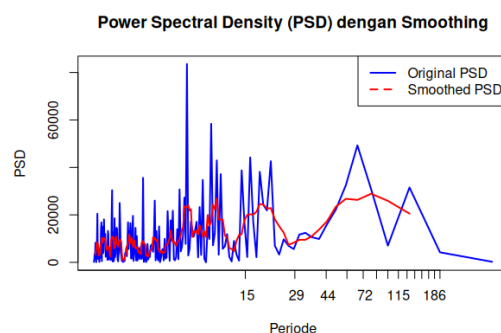


Gambar 4. Visualisasi RH saat El Nino dan La Nina

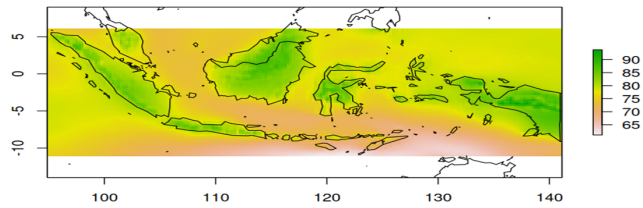
Gambar 4. menjelaskan kondisi RH saat fenomena El Nino dan La Nina terjadi. Jika ditinjau pada saat fenomena El Nino pada 2015 – 2016 nilai RH yang ditunjukkan di wilayah daratan Indonesia secara keseluruhan berada di rentang 80 – 85%, sedangkan di wilayah perairan Indonesia lebih bervariasi yakni dalam rentang lebih rendah yakni 70 – 80%. Berbeda halnya dengan fenomena La Nina pada tahun 2020 – 2023. Nilai RH yang tinggi yakni > 80% terkonsentrasi di seluruh wilayah Indonesia bagian barat yakni Sumatera dan Kalimantan, Sulawesi Utara, serta seluruh wilayah Indonesia bagian timur. Sedangkan Laut Jawa dan beberapa wilayah Indonesia Tengah seperti Bali, NTT dan NTB memiliki nilai RH yang rendah yakni 50 – 60%.

Analisis Power Spectral Density dan Bandpass Periode Enso

Terdapat puncak di sekitar periode 15 bulan, yang menunjukkan adanya osilasi kuat dengan periode tersebut. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan variasi intra-musiman atau pola cuaca yang terjadi dalam rentang waktu tersebut. Selain itu, terdapat puncak di sekitar periode 44 bulan, yang menunjukkan adanya osilasi dengan periode sekitar 44 bulan (sekitar 3,7 tahun). Puncak lainnya berada pada periode 72 bulan, yang menunjukkan osilasi dengan periode sekitar 72 bulan (6 tahun), dan berada dalam rentang siklus ENSO (2-7 tahun), sehingga mengindikasikan bahwa ENSO mempengaruhi variabilitas PC2. Secara keseluruhan, PC2 memperlihatkan osilasi pada berbagai frekuensi, dengan puncak dominan pada periode 15, 44, dan 72 bulan, di mana puncak pada periode 72 bulan semakin mendukung asumsi bahwa ENSO mempengaruhi variabilitas PC2.



Gambar 5. Power Spectral Density



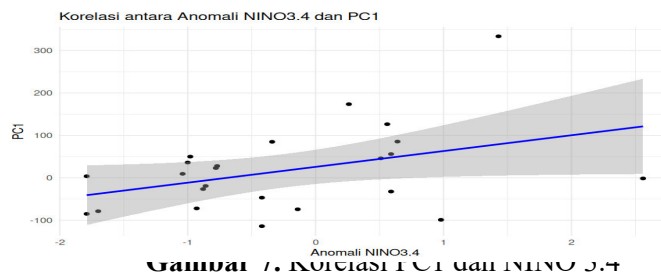
Gambar 6. Bandpass Periode Enso

Peta pada Gambar 6. menunjukkan seberapa besar kelembaban udara berubah-ubah di berbagai wilayah Indonesia selama periode tertentu. Wilayah yang berwarna hijau tua mengalami perubahan kelembaban yang sangat besar, sedangkan yang berwarna hijau muda perubahannya lebih kecil. Ternyata, perubahan kelembaban terbesar terjadi di bagian barat dan tengah Indonesia, seperti Sumatera, Jawa, Kalimantan, dan Sulawesi. Sementara itu, di bagian timur seperti Maluku dan Papua, perubahannya tidak terlalu besar. Dari pola ini, kita bisa menyimpulkan bahwa fenomena El Niño-Southern Oscillation (ENSO) kemungkinan besar sangat mempengaruhi perubahan kelembaban di wilayah barat dan tengah Indonesia. Saat terjadi El Niño (kondisi hangat), kelembaban di wilayah ini cenderung menurun. Sebaliknya, saat terjadi La Niña (kondisi dingin), kelembabannya cenderung meningkat. Namun, pengaruh ENSO ini sepertinya tidak terlalu kuat di bagian timur Indonesia.

Analisis Hubungan PC dengan ENSO

1. Analisis Korelasi antara PC dengan Indeks NINO 3.4

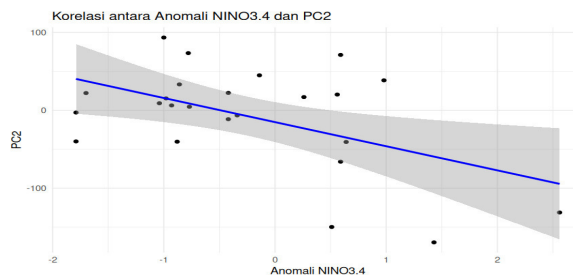
- Hubungan PC1 dan NINO3.4



Gambar 7. Korelasi PC1 dan NINO 3.4

Gambar 7. menunjukkan adanya hubungan yang cukup kuat antara fenomena El Niño (diwakili oleh indeks NINO3.4) dengan kondisi kelembaban di suatu wilayah tertentu (diwakili oleh komponen utama PC1). Ketika intensitas El Niño meningkat, kelembaban di wilayah tersebut cenderung ikut meningkat pula. Hubungan positif ini mengindikasikan bahwa perubahan suhu permukaan laut di wilayah Pasifik tengah dan timur dapat mempengaruhi kondisi cuaca di wilayah lain, termasuk tingkat kelembabannya.

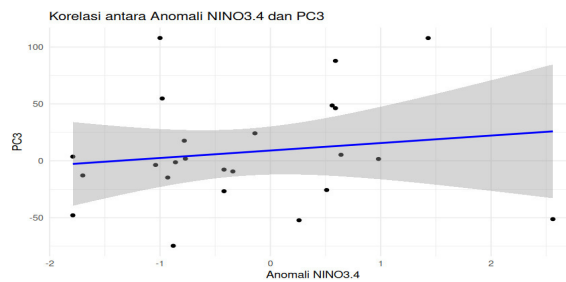
- Hubungan PC2 dan NINO3.4



Gambar 8. Korelasi PC2 dan NINO 3.4

Gambar 8. menunjukkan adanya hubungan yang berlawanan antara fenomena El Niño (diwakili oleh indeks NINO3.4) dengan kondisi di suatu wilayah tertentu (diwakili oleh komponen utama kedua, PC2). Ketika intensitas El Niño meningkat, kondisi yang diwakili oleh PC2 justru cenderung melemah. Jika PC2 mewakili kelembaban, maka ini berarti bahwa saat terjadi El Niño, wilayah tersebut cenderung mengalami penurunan tingkat kelembaban. Hubungan negatif ini mengindikasikan bahwa dampak El Niño terhadap iklim sangat kompleks dan dapat bervariasi di berbagai wilayah. Ada wilayah yang mengalami peningkatan kelembaban saat El Niño, namun ada juga yang mengalami penurunan, seperti yang ditunjukkan oleh hubungan negatif antara NINO3.4 dan PC2 ini.

- Hubungan PC3 dan NINO3.4

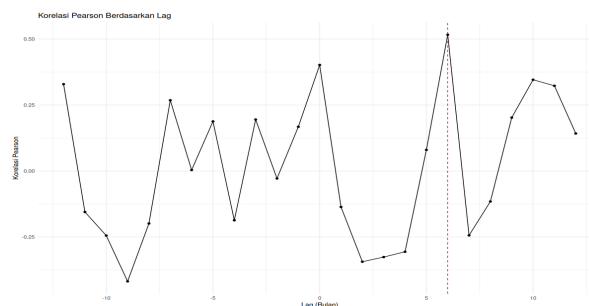


Gambar 9. Korelasi PC3 dan NINO 3.4

Gambar 9. menunjukkan bahwa pola cuaca yang diwakili oleh komponen utama ketiga (PC3) hampir tidak terkait dengan fenomena El Niño (diwakili oleh indeks NINO3.4). Ini berarti, ketika terjadi perubahan suhu permukaan laut di wilayah Pasifik tropis tengah dan timur (yang memicu El Niño atau La Niña), pola cuaca yang diwakili oleh PC3 cenderung tidak terpengaruh secara signifikan. Ini mengindikasikan bahwa pola cuaca yang dijelaskan oleh PC3 lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor lokal atau regional lainnya, seperti kondisi geografis, tutupan lahan, atau fenomena iklim skala yang lebih kecil. Dengan kata lain, meskipun El Niño adalah pemain utama dalam mempengaruhi iklim global, tidak semua pola cuaca di seluruh dunia secara langsung dipengaruhi olehnya. Ada pola-pola cuaca yang lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor lain yang bersifat lebih lokal.

2. Analisis Korelasi Lag NINO dengan PC

- Korelasi Lag NINO dengan PC1

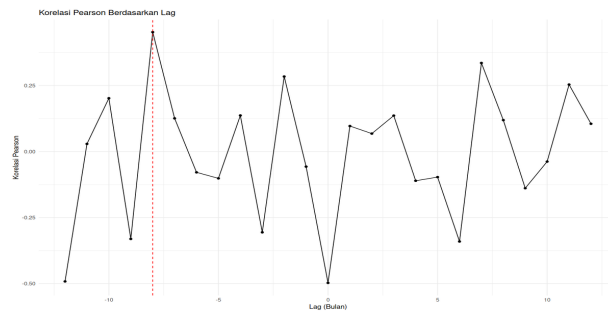


Gambar 10. Korelasi Lag NINO dengan PC1

Gambar 10. menunjukkan korelasi lag dengan nilai +0,5 di 6 bulan yang artinya saat terjadi peningkatan indeks nino 3.4 maka nilai kelembabannya akan meningkat pada bulan 5 sampai 6.

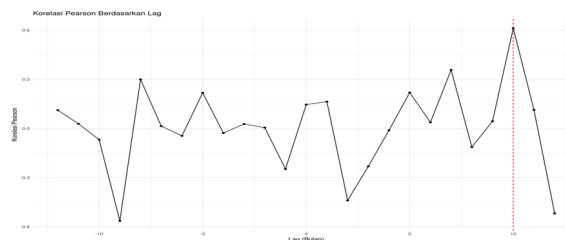
- Korelasi Lag NINO dengan PC2

Gambar 11. menunjukkan korelasi lag dengan nilai $-0,25$ di 7 bulan yang artinya saat terjadi peningkatan indeks nino 3.4 maka nilai kelembapan nya akan menurun pada bulan 7.



Gambar 11. Korelasi Lag NINO dengan PC2

- Korelasi Lag NINO dengan PC3



Gambar 12. Korelasi Lag NINO dengan PC3

Gambar 12. menunjukkan korelasi lag dengan nilai $+0.6$ di 10 bulan yang artinya saat terjadi peningkatan indeks nino 3.4 maka nilai kelembapan nya akan meningkat pada bulan ke 10.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis EOF yang dilakukan, diperoleh kesimpulan bahwa mode kedua (PC2) menunjukkan hubungan negatif dengan NINO 3.4, dengan nilai korelasi maksimum (rmax) sebesar 0,4973. Hal ini menandakan adanya pengaruh yang lebih kuat terhadap kondisi di PC2 dibandingkan dengan PC1. Perbandingan grafik juga memperlihatkan kesesuaian yang jelas, di mana saat indeks NINO 3.4 meningkat, nilai PC2 cenderung menurun, dan sebaliknya, ketika nilai NINO 3.4 menurun, nilai PC2 justru naik. Fenomena ini menggambarkan pola pengaruh ENSO terhadap wilayah Indonesia. Selain itu, analisis pada PSD menunjukkan bahwa PC2 mengalami osilasi fluktuasi yang meningkat pada rentang waktu 15-70 bulan, yang sesuai dengan periode terjadinya ENSO.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Azkie, Muhammad Wildan, Nurul Hitayuwana, Zulfa Aulia Khusna, and Edy Widodo. 2019. "Analisis Temperature Dan Kelembapan Terhadap Curah Hujan Di Kabupaten Sleman Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta." *"Seminar Nasional Teknologi" Creative and Innovative Education In The Industry 4.0: The Current Trends: 77–85.*

Ariska, Melly, Adam Darmawan, Supari Supari, Muhammad Irfan, and Iskhaq Iskandar. 2023. "Analysis of the Impact Climate Anomalies (ENSO and IOD) on Environments Based of Computing in the Western Sumatra Region (Equatorial Region of Indonesia)." *Journal of Aceh Physics Society* 12(2): 12–18.

- Basu, Sujit, R M Gairola, C M Kishtawal, and P C Pandey. 1995. "Empirical Orthogonal Function Analysis of Humidity Profiles." 100(DII).
- Chikamoto, Yoshimitsu, and Youichi Tanimoto. 2005. "Role of Specific Humidity Anomalies in Caribbean SST Response to ENSO." *Journal of the Meteorological Society of Japan* 83(6): 959–75.
- Gushchina, Daria, Irina Zheleznova, Alexander Osipov, and Alexander Olchev. 2020. "Effect of Various Types of ENSO Events on Moisture Conditions in the Humid and Subhumid Tropics." *Atmosphere* 11(12).
- Habibullah, A. D., and A. Tarya. 2021. "Sea Surface Temperature Variability in Indonesia and Its Relation to Regional Climate Indices." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 925(1).
- Hidayat, Ulil, Suwignyo Prasetyo, Yosafat Donni Haryanto, and Nelly Florida Riama. 2022. "Pengaruh ENSO Terhadap Curah Hujan Dan Kelembapan Relatif Serta Suhu Permukaan Laut Di Sulawesi." *Buletin GAW Bariri* 2(2): 88–96.
- Miftahuddin, Ananda Pratama, and Ichsan Setiawan. 2021. "Analisis Hubungan Antara Kelembaban Relatif Dengan Beberapa Variabel Iklim." *Jurnal Siger Matematika* 02(01): 25–33.
- Millenia, Yustina Wulan, Muhammad Helmi, and Lilik Maslukah. 2023. "Analisis Mekanisme Pengaruh IOD, ENSO Dan Monsun Terhadap Suhu Permukaan Laut Dan Curah Hujan Di Perairan Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat." *Indonesian Journal of Oceanography* 4(4): 87–98.
- Ummah, Masfi Sya'fiatul. 2019. "PENGARUH EL NINO SOUTHERN OSCILLATION (ENSO) TERHADAP CURAH HUJAN MUSIMAN DAN TAHUNAN DI INDONESIA." *Sustainability (Switzerland)* 11(1): 1–14.
- Yelvita, Feby Sri. 2022. "Analisis Pengaruh Was." 6 7787(8.5.2017): 5–2003.
- Yoo, Chulsang, and Sangdan Kim. 2004. "EOF Analysis of Surface Soil Moisture Field Variability." *Advances in Water Resources* 27(8): 831–42.
- Zhang, Zhihua, and John C. Moore. 2015. "Empirical Orthogonal Functions." *Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change*: 161–97.
- Zurbenko, Igor, and Ming Luo. 2015. "Surface Humidity Changes in Different Temporal Scales." *American Journal of Climate Change* 04(03): 226–38.