

Evaluasi Pola Dan Tren Curah Hujan Harian Dalam Hubungannya Dengan Fenomena ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) Di Wilayah Papua Indonesia

Rosa Putri Ramadhani^{1*}, dan Sudirman^{2*}

^{1,2} Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Sriwijaya

sudirman@fkip.unsri.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pola dan tren curah hujan harian di Pulau Papua berdasarkan tiga fase ENSO (El Niño, La Niña, dan Netral). Data curah hujan harian dari Stasiun Torea, Tanah Merah, dan Sentani periode 1995–2024 (30 tahun) diolah menggunakan Probability Density Function (PDF) dan regresi linear untuk periode klimatologis. Hasil menunjukkan setiap stasiun memiliki respons berbeda terhadap ENSO: Torea paling sensitif, Tanah Merah memiliki variabilitas intensitas tinggi, sedangkan Sentani lebih dipengaruhi faktor lokal. Heterogenitas spasial ini menegaskan pentingnya pendekatan prediksi iklim berbasis lokasi di Papua, dengan implikasi signifikan bagi sistem peringatan dini bencana, pengelolaan sumber daya air, dan kebijakan adaptasi perubahan iklim.

Kata kunci: Curah Hujan Harian; ENSO; PDF; Regresi Linear; Papua

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang terletak di antara benua Asia dan Australia serta diapit oleh Samudra Hindia dan Samudra Pasifik. Posisi geografis yang strategis ini menjadikan Indonesia dikenal sebagai Maritime Continent, di mana interaksi kompleks antara daratan dan lautan memengaruhi sistem iklim nasional (Yamanaka, 2016). Variasi iklim di Indonesia sangat dipengaruhi oleh sirkulasi atmosfer global, khususnya sistem monsun dan fenomena El Niño Southern Oscillation (ENSO) yang berperan penting dalam menentukan pola curah hujan tahunan (Aldrian & Dwi Susanto, 2003a; Mulsandi et al., n.d.; Supari et al., 2017). Penelitian terkini menunjukkan bahwa ENSO dan Indian Ocean Dipole (IOD) memiliki dampak independen terhadap curah hujan ekstrem di Indonesia, dengan pengaruh yang bervariasi secara spasial dan temporal (Ariska et al., 2024; Kurniadi et al., 2021)

Selama beberapa dekade terakhir, perubahan pola curah hujan di berbagai wilayah Indonesia menunjukkan pergeseran yang cukup signifikan. Sejumlah daerah mengalami keterlambatan musim hujan, sementara wilayah lain justru mengalami musim basah lebih awal (Marzuki et al., 2025). Indonesia telah mengalami peningkatan jumlah kejadian curah hujan ekstrem dan episode banjir serta kekeringan, dengan frekuensi dan intensitas yang semakin meningkat (Kurniadi et al., 2021). Pergeseran ini menimbulkan implikasi besar terhadap ketersediaan air, aktivitas pertanian, serta risiko bencana hidrometeorologis seperti banjir dan kekeringan, yang mengancam ketahanan pangan, infrastruktur, dan kesehatan masyarakat (Akhmad et al., 2025).

Fenomena ENSO sendiri menggambarkan interaksi laut-atmosfer di kawasan Pasifik tropis yang terdiri dari dua fase ekstrem, yaitu El Niño (fase pemanasan laut di Pasifik tengah–timur) dan La Niña (fase pendinginan laut di wilayah yang sama) (Supari et al., 2017). Pada fase El Niño, wilayah Indonesia umumnya mengalami penurunan curah hujan dan periode kering yang berkepanjangan (Kurniadi et al., 2021a; Supari et al., 2017). Sebaliknya, fase La Niña menyebabkan peningkatan intensitas hujan secara signifikan, memperpanjang musim hujan, dan meningkatkan jumlah hari hujan, terutama di wilayah Indonesia (Kurniadi et al., 2021).

Pulau Papua menjadi wilayah yang menarik untuk dikaji karena letaknya yang berdekatan langsung dengan Samudra Pasifik, menjadikannya sangat sensitif terhadap dinamika ENSO. Kondisi

topografi Papua yang kompleks, dengan pegunungan tinggi dan daerah pesisir yang luas, turut menciptakan pola curah hujan yang bervariasi antara bulan lembab dan bulan (Permana et al., 2016). Umumnya, curah hujan maksimum terjadi antara Januari–April dan minimum pada Mei–Agustus.

Meski penelitian terkait pola curah hujan di Indonesia telah banyak dilakukan, kajian yang secara khusus menganalisis curah hujan harian di Papua dengan pendekatan Probability Density Function (PDF) serta Regresi Linear berdasarkan fase El Niño dan La Niña masih terbatas. Penelitian ini menjadi penting untuk memberikan gambaran empiris mengenai pola dan tren curah hujan harian pada periode 1995–2024, terutama dengan pembagian musim klimatologis JJA (Juni–Agustus), SON (September–November), DJF (Desember–Februari), dan MAM (Maret–Mei). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis pola curah hujan harian di Pulau Papua pada fase El Niño dan La Niña berdasarkan periode klimatologis.
2. Menganalisis tren curah hujan di Pulau Papua pada fase El Niño dan La Niña berdasarkan periode klimatologis.

METODE/EKSPERIMEN

Penelitian ini dilakukan di wilayah Pulau Papua bagian Indonesia. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data curah hujan harian dari tiga stasiun BMKG, yaitu Stasiun Meteorologi Torea (8.52°S, 140.42°E, elevasi 126 m), Stasiun Meteorologi Tanah Merah (2.53°S, 140.72°E, elevasi 97 m), dan Stasiun Meteorologi Sentani (2.57°S, 140.48°E, elevasi 96 m) selama periode 1 Januari 1995 sampai dengan 31 Desember, serta data Indeks ENSO berupa Oceanic Niño Index (ONI) yang diperoleh dari NOAA Climate Prediction Center. Ketiga stasiun berada pada elevasi yang relatif rendah (96–126 m), namun memiliki karakteristik geografis berbeda yang mencerminkan kompleksitas topografi Papua, dengan variasi pengaruh faktor lokal seperti kondisi pesisir, orografi, dan sirkulasi atmosfer regional.

Probability Density Function (PDF)

Pola curah hujan harian dianalisis menggunakan metode statistik Probability Density Function (PDF) guna memperoleh pemahaman mengenai karakteristik distribusi data. Pelaksanaan analisis ini memanfaatkan platform Jupyter Notebook dengan bahasa pemrograman Python. Data yang digunakan merupakan data hasil penghalusan akhir yang telah dikompilasi dari periode fenomena El Niño, La Niña, dan Netral.

PDF dihitung menggunakan Kernel Density Estimation (KDE) untuk menghasilkan kurva distribusi probabilitas kontinu dari data curah hujan harian. Metode KDE diterapkan dengan kernel Gaussian menggunakan library `scipy.stats` atau `seaborn` pada Python, dengan bandwidth yang ditentukan secara otomatis melalui Scott's rule atau Silverman's rule untuk mengoptimalkan kehalusan kurva. Data curah hujan harian dikelompokkan berdasarkan fase ENSO (El Niño, La Niña, dan Netral) sesuai klasifikasi ONI, kemudian distribusi probabilitasnya divisualisasikan dalam skala logaritmik pada sumbu Y untuk memperjelas perbedaan kejadian hujan intensitas tinggi yang frekuensinya rendah. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pergeseran pola distribusi curah hujan antar fase ENSO, khususnya pada rentang intensitas ekstrem (>100 mm/hari).

Regresi Linear Sederhana

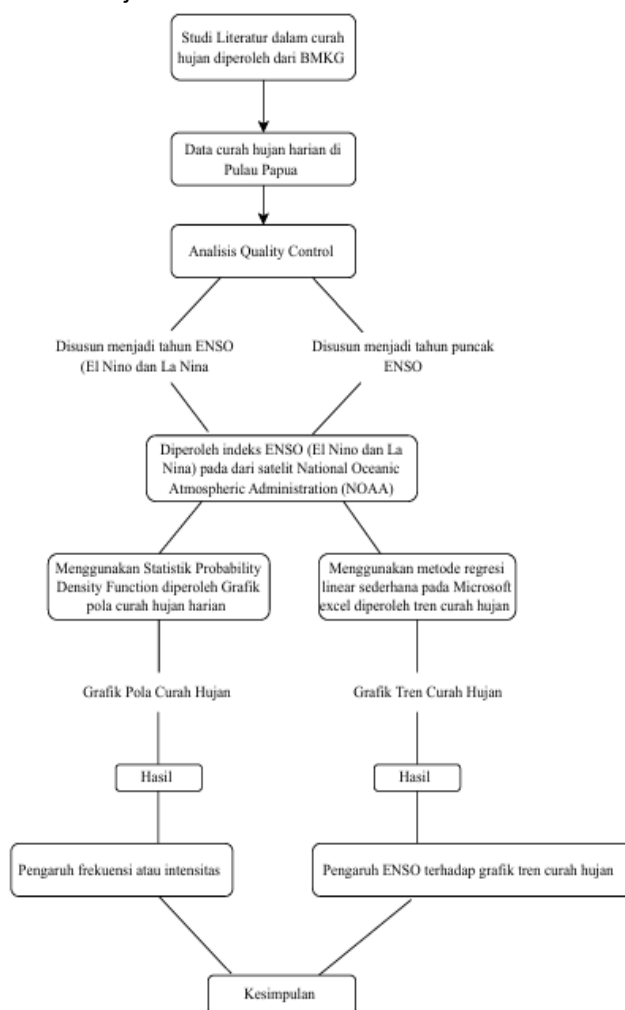
Tren curah hujan dianalisis menggunakan pendekatan regresi linear sederhana untuk mengevaluasi kecenderungan (tren) perubahan curah hujan sepanjang periode 1995–2024 pada setiap fase ENSO dan musim klimatologis. Identifikasi fase ENSO mengacu pada nilai Oceanic Niño Index (ONI) yang dirilis NOAA. Periode dikategorikan sebagai El Niño apabila $ONI \geq +0,5$ °C selama minimal tiga bulan berturut-turut, La Niña apabila $ONI \leq -0,5$ °C selama minimal tiga bulan berturut-turut, dan Netral apabila ONI berada pada rentang $-0,5$ °C hingga $+0,5$ °C. Klasifikasi fase kemudian disesuaikan dengan pembagian musim klimatologis JJA (Juni–Juli–Agustus), SON (September–Oktober–November), DJF (Desember–Januari–Februari), dan MAM (Maret–April–Mei) untuk mengelompokkan data curah hujan pada setiap stasiun pengamatan berdasarkan musim dan fase ENSO yang berlangsung.

Quality Control

Analisis Quality Control dilakukan secara manual menggunakan Microsoft Excel untuk memastikan keandalan data dari ketiga stasiun pengamatan. Prosedur quality control meliputi: (1) Identifikasi dan koreksi data tidak valid, seperti nilai ekstrem >400 mm/hari tanpa konfirmasi kejadian cuaca ekstrem dan data alfanumerik; (2) Penanganan data kosong, dengan kode '8888' diubah menjadi '0' sesuai standar BMKG, serta identifikasi periode data kosong >7 hari berturut-turut; dan (3) Validasi konsistensi temporal untuk mendeteksi anomali seperti nilai negatif atau lompatan tidak realistis. Data yang lolos verifikasi kemudian dikompilasi dan dikelompokkan berdasarkan fase ENSO dan musim klimatologis untuk analisis selanjutnya.

Penelitian ini memfokuskan analisis tren curah hujan pada musim SON (September-Oktober-November) dengan tiga justifikasi utama: Pertama, SON merupakan periode transisi monsun yang paling sensitif terhadap variabilitas ENSO di wilayah Papua (Aldrian & Dwi Susanto, 2003). Periode ini menandai peralihan dari monsun Australia ke monsun Asia, di mana sinyal ENSO memberikan pengaruh dominan terhadap onset musim hujan dan distribusi curah hujan (Hendon, 2003; Supari et al., 2017). Kedua, studi klimatologi Papua menunjukkan bahwa musim SON memiliki koefisien variasi curah hujan tertinggi dibandingkan musim lainnya, menjadikannya indikator paling representatif untuk mengidentifikasi respons Papua terhadap ENSO. Ketiga, dari perspektif aplikatif, periode SON sangat krusial untuk perencanaan sektor pertanian dan pengelolaan sumber daya air karena menentukan onset musim hujan yang memengaruhi kalender tanam dan ketersediaan air (Naylor et al., 2007).

Gambar 1 menunjukkan diagram alir penelitian yang menggambarkan tahapan analisis secara sistematis, mulai dari pengumpulan data curah hujan dan indeks ENSO, proses *quality control*, pengelompokan tahun ENSO, hingga analisis *Probability Density Function* dan regresi linear untuk memperoleh pola serta tren curah hujan.

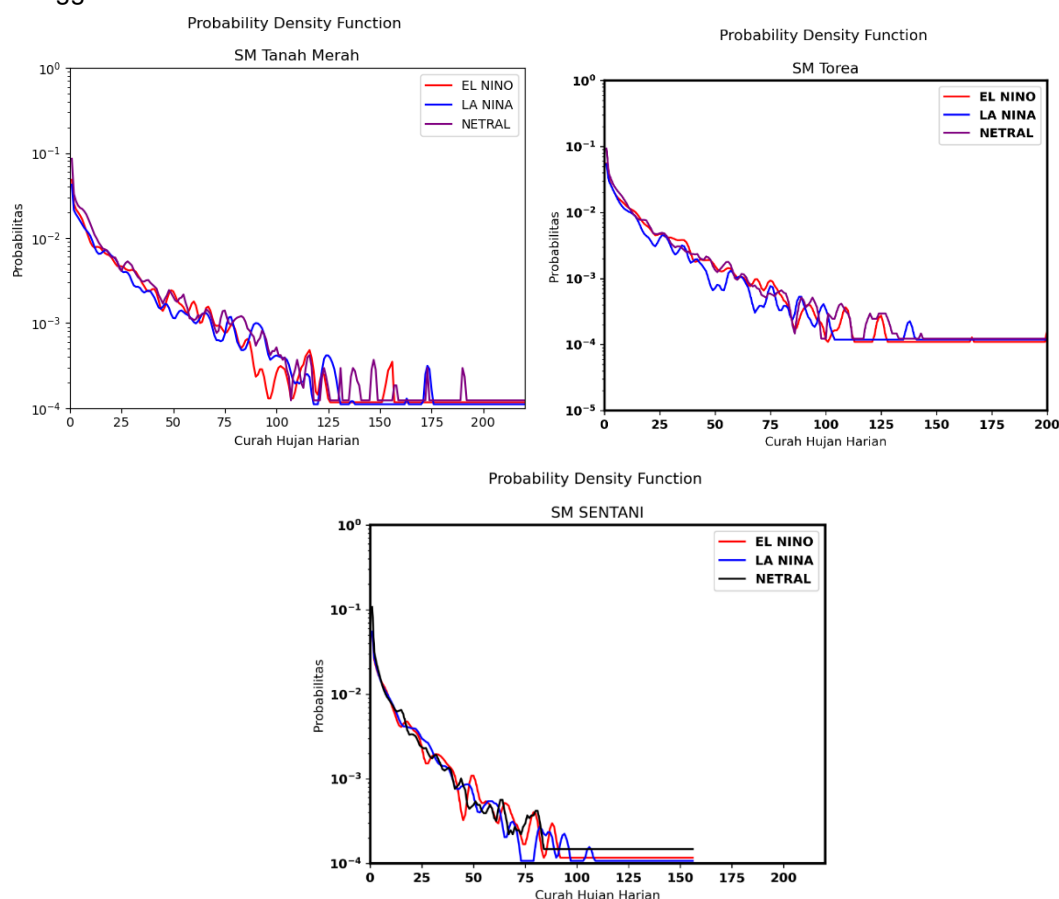


Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Analisis distribusi probabilitas curah hujan harian menggunakan metode Probability Density Function (PDF) dilakukan untuk ketiga stasiun pengamatan (Torea, Tanah Merah, dan Sentani) berdasarkan fase ENSO (*El Niño*, *La Niña*, dan Netral). Hasil analisis ditampilkan dalam Gambar 2 menggunakan skala logaritmik pada sumbu Y untuk menangkap variasi probabilitas dari kejadian hujan rendah hingga ekstrem.

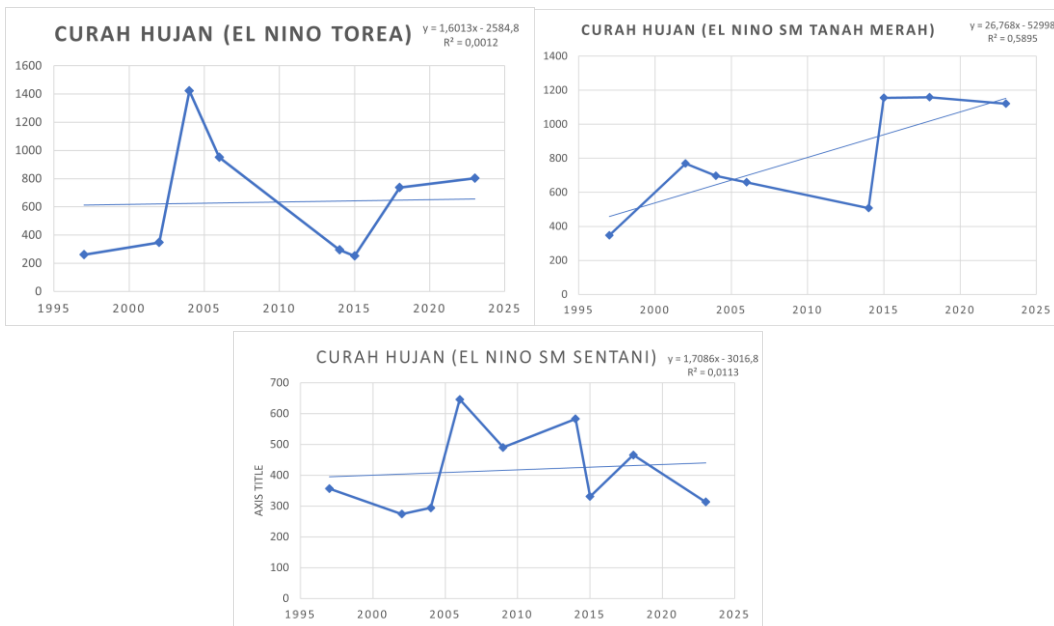


Gambar 2. Grafik PDF Curah Hujan Harian Stasiun Tanah Merah, Torea dan Sentani

Ketiga stasiun menunjukkan pola distribusi probabilitas yang berbeda. Stasiun Torea memperlihatkan pemisahan kurva yang jelas antara fase *El Niño*, *La Niña*, dan Netral, terutama pada rentang curah hujan sedang hingga tinggi (50-150 mm/hari). Stasiun Tanah Merah menunjukkan probabilitas curah hujan ekstrem (>200 mm/hari) yang masih terukur dengan variabilitas yang besar pada fase *La Niña*. Stasiun Sentani menampilkan pola ketiga fase ENSO yang hampir berimpit di seluruh rentang curah hujan, mengindikasikan pengaruh ENSO yang minimal.

Analisis tren curah hujan dilakukan menggunakan regresi linear sederhana untuk mengidentifikasi perubahan pola curah hujan jangka panjang selama periode 1995-2024 pada setiap fase ENSO dan musim klimatologis. Hasil analisis tren untuk musim SON (September-Oktober-November) disajikan dalam Gambar 3, 4, dan 5, serta dirangkum dalam Tabel 1.

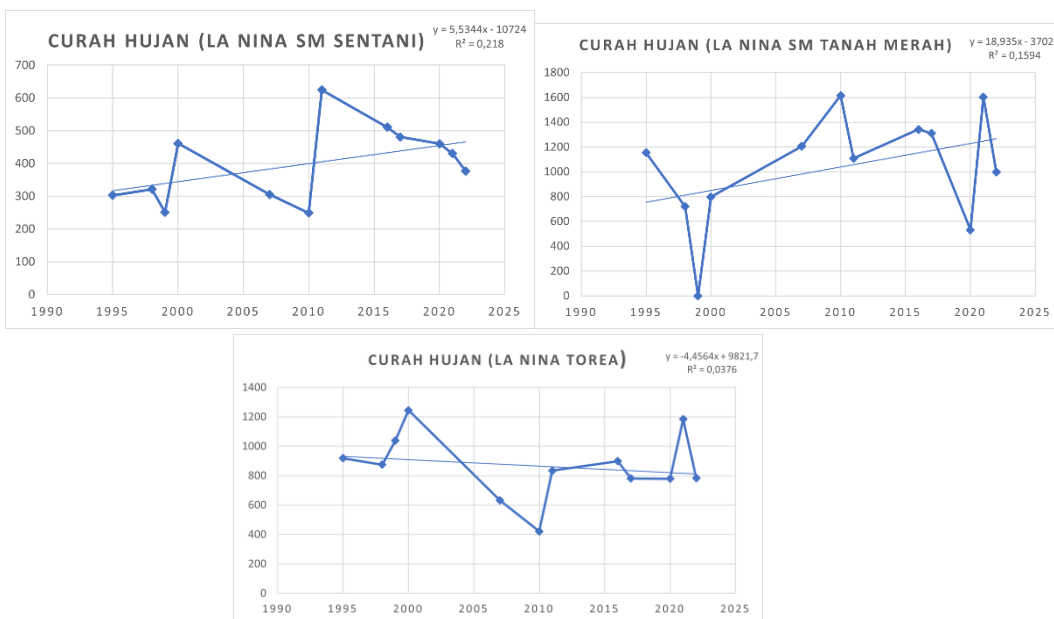
Fase El Niño



Gambar 3. Grafik Tren Curah Hujan Musim SON Fase El Niño untuk Stasiun Sentani, Tanah Merah, dan Torea

Stasiun Sentani menunjukkan fluktuasi curah hujan antara 270-650 mm dengan puncak tertinggi pada tahun 2007 (650 mm) dan 2014 (580 mm). Tren linear menunjukkan peningkatan sebesar 1,71 mm/tahun dengan $R^2 = 0,011$. Stasiun Tanah Merah memperlihatkan peningkatan tajam mulai tahun 2016, dengan curah hujan melonjak dari ~500 mm menjadi >1.150 mm. Tren linear menunjukkan peningkatan 26,77 mm/tahun dengan $R^2 = 0,590$. Stasiun Torea menampilkan volatilitas ekstrem dengan lonjakan pada tahun 2003 (>1.400 mm) dan penurunan drastis pada 2014-2016 (~250 mm). Tren linear menunjukkan peningkatan 1,60 mm/tahun dengan $R^2 = 0,001$.

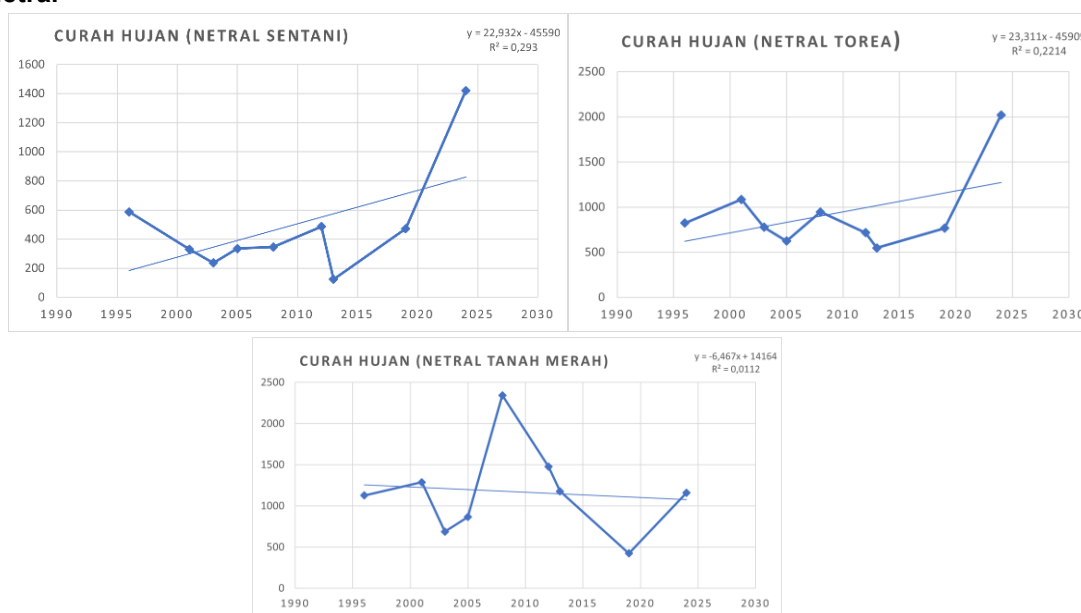
Fase La Nina



Gambar 4. Grafik Tren Curah Hujan Musim SON Fase La Niña untuk Stasiun Sentani, Tanah Merah, dan Torea

Stasiun Sentani menunjukkan fluktuasi antara 240-630 mm dengan puncak pada tahun 2012 (630 mm). Tren linear menunjukkan peningkatan 5,53 mm/tahun dengan $R^2 = 0,218$. Stasiun Tanah Merah memperlihatkan fluktuasi ekstrem dengan rentang 20-1.620 mm. Anomali ekstrem terjadi pada tahun 2000 (~20 mm) dan puncak pada 2010 dan 2022 (~1.620 mm). Tren linear menunjukkan peningkatan 18,94 mm/tahun dengan $R^2 = 0,159$. Stasiun Torea menampilkan rentang 420-1.250 mm dengan lonjakan pada 2001 dan 2021 (~1.250 mm). Tren linear menunjukkan penurunan 4,46 mm/tahun dengan $R^2 = 0,038$.

Fase Netral



Gambar 5. Grafik Tren Curah Hujan Musim SON Fase Netral untuk Stasiun Sentani, Tanah Merah, dan Torea

Stasiun Sentani menunjukkan rentang 140-1.420 mm dengan lonjakan dramatis pada tahun 2023 (~1.420 mm). Tren linear menunjukkan peningkatan 22,93 mm/tahun dengan $R^2 = 0,293$. Stasiun Tanah Merah memperlihatkan fluktuasi ekstrem dengan rentang 450-2.350 mm. Lonjakan tertinggi terjadi pada 2008 (~2.350 mm) dan penurunan drastis pada 2020 (~450 mm). Tren linear menunjukkan penurunan 6,47 mm/tahun dengan $R^2 = 0,011$. Stasiun Torea menampilkan pola serupa dengan fase La Niña, dengan tren penurunan 4,46 mm/tahun dan $R^2 = 0,038$.

Pembahasan

Analisis Probability Density Function (PDF) dari data curah hujan harian pada ketiga stasiun memperlihatkan perbedaan distribusi yang mencerminkan karakteristik iklim lokal masing-masing wilayah. Secara umum, seluruh stasiun menunjukkan probabilitas tertinggi pada curah hujan rendah (<25 mm/hari), namun respons terhadap variasi fase ENSO bersifat spesifik lokasi.

Stasiun Torea menjadi wilayah yang paling responsif terhadap dinamika ENSO, terlihat dari pemisahan kurva yang jelas terutama pada rentang curah hujan sedang-tinggi (50-150 mm/hari). Fase La Niña menunjukkan probabilitas 2-3 kali lebih tinggi pada rentang 75-125 mm/hari dibandingkan El Niño dan Netral. Kondisi ini mengindikasikan bahwa La Niña secara signifikan meningkatkan peluang kejadian hujan lebat di wilayah ini, sejalan dengan temuan Supari et al. (2017) bahwa wilayah Papua bagian utara sangat sensitif terhadap modulasi ENSO.

Stasiun Sentani memperlihatkan pola yang kontras, di mana ketiga fase ENSO menunjukkan kurva probabilitas yang hampir berimpit di seluruh rentang curah hujan. Nilai probabilitas pada rentang 50-100 mm/hari untuk ketiga fase ENSO berada dalam kisaran yang sangat dekat (perbedaan <20%), mengindikasikan bahwa pengaruh faktor lokal seperti topografi (elevasi 96 m dengan pengaruh orografi dari pegunungan sekitar) dan sistem angin darat-laut lebih dominan dibandingkan sinyal ENSO global.

Hal ini konsisten dengan temuan Permana et al. (2016) bahwa kompleksitas topografi Papua menciptakan variabilitas curah hujan yang tidak seragam, dengan pengaruh altitude effect yang signifikan terhadap distribusi curah hujan regional.

Stasiun Tanah Merah menunjukkan karakteristik unik dengan probabilitas curah hujan ekstrem (>200 mm/hari) yang masih terukur pada fase La Niña, meskipun dengan nilai probabilitas sangat rendah (10^{-4} hingga 10^{-3}). Variabilitas terbesar terlihat pada rentang 100-175 mm/hari, di mana fase La Niña menunjukkan beberapa puncak probabilitas yang tidak muncul pada fase El Niño dan Netral. Pola ini menunjukkan bahwa Tanah Merah memiliki hubungan ENSO yang kuat namun tidak stabil terhadap kejadian hujan dengan intensitas besar, kemungkinan dipengaruhi oleh posisinya yang dekat dengan Samudra Pasifik dan sistem konveksi lokal yang intensif.

Variabilitas Tren Curah Hujan Berdasarkan Fase ENSO

Fase El Niño

Pada fase El Niño, Stasiun Tanah Merah menunjukkan respons yang paling signifikan dengan tren peningkatan 26,77 mm/tahun ($R^2 = 0,590$), terutama sejak tahun 2016 di mana curah hujan melonjak dari ~500 mm menjadi >1.150 mm dan bertahan pada level tinggi hingga 2024. Nilai $R^2 = 0,590$ mengindikasikan bahwa 59% variabilitas curah hujan dapat dijelaskan oleh tren linear, menunjukkan hubungan yang cukup kuat dan konsisten. Fenomena ini bertentangan dengan paradigma umum bahwa El Niño selalu menyebabkan penurunan curah hujan di Indonesia (Aldrian & Dwi Susanto, 2003). Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh pergeseran pola Walker Circulation atau intensifikasi sistem konveksi lokal yang tidak tertangkap oleh indeks ENSO regional.

Sebaliknya, Stasiun Sentani dan Torea menampilkan tren yang sangat lemah dengan nilai R^2 mendekati nol (0,011 dan 0,001), mengindikasikan bahwa fluktuasi curah hujan lebih dipengaruhi faktor meteorologi lokal dibandingkan sinyal ENSO. Variabilitas interannual yang sangat tinggi pada kedua stasiun ini (fluktuasi >400 mm antar tahun) menunjukkan dominasi proses skala meso seperti sistem cuaca lokal, pola angin regional, dan pengaruh topografi yang kompleks.

Fase La Niña

Pada fase La Niña, ketiga stasiun menunjukkan kecenderungan peningkatan curah hujan, namun dengan konsistensi yang berbeda-beda. Stasiun Tanah Merah memperlihatkan tren peningkatan tertinggi sebesar 18,94 mm/tahun, namun dengan $R^2 = 0,159$ yang rendah, mengindikasikan variabilitas temporal yang sangat tinggi. Anomali ekstrem seperti penurunan drastis pada tahun 2000 (~20 mm) dan lonjakan pada 2010 dan 2022 (~1.620 mm) menunjukkan bahwa respons Tanah Merah terhadap La Niña sangat tidak stabil dan kemungkinan dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara ENSO dan sistem cuaca regional, seperti Madden-Julian Oscillation (MJO) atau monsun Australia (Nurbani et al., 2024).

Stasiun Sentani menunjukkan tren peningkatan moderat sebesar 5,53 mm/tahun ($R^2 = 0,218$), dengan puncak curah hujan pada 2012 (~630 mm). Nilai R^2 yang lebih tinggi dibandingkan fase El Niño mengindikasikan bahwa La Niña memiliki pengaruh yang lebih konsisten terhadap peningkatan curah hujan di Sentani, meskipun variabilitas lokal tetap dominan.

Stasiun Torea menampilkan pola yang kontras dengan tren penurunan sebesar 4,46 mm/tahun ($R^2 = 0,038$), meskipun La Niña umumnya meningkatkan curah hujan di wilayah Indonesia (Kurniadi et al., 2021). Perilaku anomali ini menjadi indikator kuat bahwa respons La Niña terhadap curah hujan sangat dipengaruhi konfigurasi lokal, misalnya jalur angin, pola konveksi lokal, dan anatomi pegunungan Tengah Papua, sehingga korelasi sederhana ENSO-curah hujan tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh wilayah Papua.

Fase Netral

Pada kondisi Netral, perbedaan spasial kembali terlihat jelas. Stasiun Sentani memperlihatkan tren peningkatan paling stabil sebesar 22,93 mm/tahun ($R^2 = 0,293$), dengan lonjakan dramatis pada tahun 2023 (~1.420 mm). Nilai $R^2 = 0,293$ adalah yang tertinggi untuk Sentani di antara semua fase ENSO, menegaskan bahwa dominasi kontrol lokal lebih kuat pada kondisi Netral dibandingkan saat

sinyal ENSO aktif. Peningkatan progresif ini kemungkinan terkait dengan perubahan pola iklim regional jangka panjang atau intensifikasi siklus hidrologi lokal akibat perubahan tutupan lahan atau variabilitas suhu permukaan laut regional.

Sebaliknya, Stasiun Tanah Merah dan Torea menunjukkan tren penurunan dengan nilai $-6,47$ mm/tahun ($R^2 = 0,011$) dan $-4,46$ mm/tahun ($R^2 = 0,038$) secara berturut-turut. Nilai R^2 yang sangat rendah mengindikasikan variabilitas interannual yang ekstrem, dengan fluktuasi mencapai >1.500 mm pada Tanah Merah (lonjakan 2008: ~ 2.350 mm, penurunan 2020: ~ 450 mm). Kombinasi penguatan dan pelemahan tren pada lokasi yang berbeda menunjukkan bahwa tidak adanya sinyal ENSO justru membuka dominasi fenomena iklim lokal sebagai pengendali utama, seperti dinamika atmosfer skala meso, pola angin regional yang berubah-ubah antartahun, dan sistem cuaca skala lokal yang tidak berkorelasi dengan indeks iklim global.

Secara keseluruhan, hasil analisis mengonfirmasi bahwa Pulau Papua tidak merespons ENSO secara seragam, baik dari segi distribusi probabilitas kejadian hujan maupun tren curah hujan musiman. Temuan ini memiliki implikasi strategis terhadap mitigasi risiko hidrometeorologis di Papua: 1) Stasiun Torea merupakan lokasi yang paling sensitif terhadap ENSO, terutama pada fase La Niña yang secara konsisten meningkatkan probabilitas hujan lebat. Wilayah ini membutuhkan sistem peringatan dini berbasis ENSO untuk mengantisipasi potensi banjir pada periode La Niña, dengan monitoring intensif terhadap indeks ONI dan prediksi curah hujan musiman. 2) Stasiun Tanah Merah memperlihatkan respons kuat namun tidak stabil terhadap curah hujan intensitas tinggi, dengan variabilitas ekstrem yang mencapai >1.500 mm antar tahun. Wilayah ini membutuhkan mitigasi kerentanan terhadap kejadian hujan ekstrem melalui penguatan infrastruktur drainase, sistem deteksi dini banjir berbasis radar cuaca, dan peningkatan kapasitas adaptasi masyarakat terhadap fluktuasi curah hujan yang tinggi. 3) Stasiun Sentani menunjukkan dominasi variabilitas lokal dengan peran ENSO yang minimal. Wilayah ini memerlukan pendekatan adaptasi berbasis pengelolaan iklim lokal ketimbang indikator ENSO global, seperti monitoring sistem cuaca lokal, pengelolaan tata ruang berbasis risiko hidrologi, dan konservasi daerah resapan air untuk mengendalikan peningkatan curah hujan jangka panjang.

Perbedaan karakteristik ini menegaskan pentingnya pendekatan prediksi iklim berbasis lokasi di Papua, dengan mempertimbangkan interaksi kompleks antara ENSO, topografi lokal, dan sirkulasi atmosfer regional dalam sistem peringatan dini dan kebijakan adaptasi perubahan iklim.

KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis pola dan tren curah hujan harian di Pulau Papua bagian Indonesia pada periode 1995-2024 menggunakan metode Probability Density Function (PDF) dan regresi linear berdasarkan fase ENSO (El Niño, La Niña, dan Netral). Analisis difokuskan pada musim SON (September-Oktober-November) sebagai periode transisi monsun yang paling sensitif terhadap variabilitas ENSO di wilayah Papua.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa respons curah hujan terhadap fenomena ENSO di Pulau Papua sangat bervariasi secara spasial, dengan karakteristik yang berbeda pada setiap stasiun pengamatan. Stasiun Torea memperlihatkan sensitivitas paling tinggi terhadap ENSO, terutama pada fase La Niña yang secara konsisten meningkatkan probabilitas kejadian hujan lebat. Stasiun Tanah Merah menunjukkan tren peningkatan curah hujan yang kuat pada fase El Niño, namun dengan variabilitas ekstrem yang tinggi pada seluruh fase ENSO. Stasiun Sentani memperlihatkan pengaruh ENSO yang minimal dengan dominasi faktor meteorologi lokal, terutama pada kondisi Netral yang menunjukkan tren peningkatan paling konsisten.

Temuan utama penelitian ini menegaskan bahwa dinamika curah hujan Papua tidak dapat digeneralisasi secara regional, melainkan sangat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara sinyal ENSO global, topografi lokal, dan sirkulasi atmosfer regional. Perbedaan karakteristik spasial ini memiliki implikasi strategis terhadap kebijakan mitigasi risiko hidrometeorologis di Papua, yang memerlukan pendekatan adaptasi berbasis lokasi spesifik dengan mempertimbangkan karakteristik iklim lokal masing-masing wilayah. Penelitian ini memberikan kontribusi penting untuk pengembangan sistem peringatan dini bencana, manajemen sumber daya air, dan strategi adaptasi perubahan iklim di

wilayah Papua.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Pertama, fokus analisis pada musim SON memberikan pemahaman mendalam tentang periode transisi monsun, namun belum menggambarkan dinamika curah hujan secara tahunan penuh. Penelitian lanjutan perlu mengeksplorasi karakteristik musim JJA (periode kering), DJF (puncak musim hujan), dan MAM (peralihan ke musim kering) untuk memperoleh pemahaman holistik tentang siklus hidrologi Papua. Kedua, analisis tren linear yang digunakan dalam penelitian ini efektif untuk mengidentifikasi kecenderungan jangka panjang, namun belum menangkap perubahan non-linear atau regime shift yang mungkin terjadi dalam respons curah hujan terhadap ENSO. Metode analisis lanjutan seperti wavelet analysis atau break-point detection dapat memberikan insight tambahan tentang perubahan periodik dan diskontinuitas dalam sistem iklim Papua. Ketiga, tiga stasiun yang dianalisis (Torea, Tanah Merah, Sentani) mewakili karakteristik geografis yang berbeda, namun cakupan spasial masih terbatas mengingat luasnya wilayah Papua (~319.000 km²) dengan topografi yang sangat kompleks. Penelitian lanjutan dengan jaringan stasiun yang lebih padat atau integrasi data satelit dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang variabilitas spasial curah hujan Papua. Keempat, penelitian ini fokus pada pengaruh ENSO, sementara fenomena iklim lainnya seperti Indian Ocean Dipole (IOD), Madden-Julian Oscillation (MJO), dan interaksi ENSO-IOD juga berperan penting dalam modulasi curah hujan Indonesia (Ariska et al., 2024; Kurniadi et al., 2021). Studi lanjutan yang mengintegrasikan multi-indeks iklim dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang pengendali curah hujan Papua.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penyusunan artikel ilmiah ini. Apresiasi yang tulus penulis sampaikan kepada para dosen pembimbing dan penguji yang telah memberikan arahan, masukan, serta kritik konstruktif sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih juga penulis haturkan kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah menyediakan data curah hujan yang diperlukan dalam penelitian ini. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada keluarga, rekan-rekan, serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas doa, dukungan moral, dan motivasi yang diberikan. Semoga segala bantuan yang diberikan mendapat balasan yang setimpal dari Tuhan Yang Maha Esa.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhmad, R., Sumarmi, S., Astina, I. K., & Wagistina, S. (2025). A sustainability trilogy approach for drought risk prevention: Case study in Indonesia. *Jambá Journal of Disaster Risk Studies*. <https://doi.org/10.4102/jamba.v17i1.1811>.
- Aldrian, E., & Dwi Susanto, R. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>.
- Ariska, M., Suhadi, Supari, Irfan, M., & Iskandar, I. (2024). Detection of Dominant Rainfall Patterns in Indonesian Regions Using Empirical Orthogonal Function (EOF) and Its Relation with ENSO and IOD Events. *Science and Technology Indonesia*, 9(4), 1009–1023. <https://doi.org/10.26554/sti.2024.9.4.1009-1023>.
- Hendon, H. H. (2003). *Indonesian Rainfall Variability: Impacts of ENSO and Local Air-Sea Interaction*.
- Kurniadi, A., Weller, E., Min, S. K., & Seong, M. G. (2021). Independent ENSO and IOD impacts on rainfall extremes over Indonesia. *International Journal of Climatology*, 41(6), 3640–3656. <https://doi.org/10.1002/joc.7040>.
- Mulsandi, A., Koesmaryono, Y., Hidayat, R., Faqih, A., Sopaheluwakan, A., Studi Meteorologi, P., & Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, S. (n.d.). *ON THE INTERANNUAL VARIABILITY OF INDONESIA MONSOON..... ON THE INTERANNUAL*

VARIABILITY of INDONESIAN MONSOON RAINFALL (IMR): A LITERATURE REVIEW OF THE ROLE OF ITS EXTERNAL FORCING.

- Naylor, R. L., Battisti, D. S., Vimont, D. J., Falcon, W. P., & Burke, M. B. (2007). Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. In *PNAS May* (Vol. 8, Issue 19).
- Permana, D. S., Thompson, L. G., & Setyadi, G. (2016). Tropical West Pacific moisture dynamics and climate controls on rainfall isotopic ratios in southern papua, Indonesia. *Journal of Geophysical Research*, 121(5), 2222–2245. <https://doi.org/10.1002/2015JD023893>.
- Supari, Tangang, F., Juneng, L., & Aldrian, E. (2017). Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia. *International Journal of Climatology*, 37(4), 1979–1997. <https://doi.org/10.1002/joc.4829>.
- Yamanaka, M. D. (2016). Physical climatology of Indonesian maritime continent: An outline to comprehend observational studies. In *Atmospheric Research* (Vols. 178–179, pp. 231–259). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.017>.