

ALTERNATIF PERHITUNGAN SIGNIFIKANSI ENSO TERHADAP CURAH HUJAN: BOOTSTRAP GANDA DAN TRIWULAN PENUH

Muhammad Nurwahyudi^{1,2*}, Sukir Maryanto^{1,3}, Anthon Efani^{1,4}, dan Andang Kurniawan²

¹ Program Magister Pengelolaan Sumberdaya Lingkungan, Sekolah Pasca Sarjana,
Universitas Brawijaya

² Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

³ Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya

⁴ Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Brawijaya

*e-mail : muhammad.nurwahyudi@bmkg.go.id

Abstrak. Modulasi El Nino-Southern Oscillation (ENSO) memengaruhi curah hujan di wilayah monsunal seperti Jawa Timur, tetapi pendekatan triwulan konvensional (DJF, MAM, JJA, SON) sering gagal menangkap variasi musiman dan meningkatkan risiko salah positif. Penelitian ini mengusulkan pendekatan alternatif untuk mengevaluasi signifikansi modulasi El Nino-Southern Oscillation (ENSO) terhadap curah hujan menggunakan analisis 12 triwulan tumpang tindih dan metode bootstrap ganda. Fokus penelitian bertujuan untuk menghasilkan alternatif perhitungan signifikansi ENSO terhadap curah hujan melalui pendekatan bootstrap ganda. Data curah hujan bulanan dari 202 pos hujan utama periode 1991–2020 diolah menjadi 12 periode triwulanan untuk menangkap variasi yang tidak ditangkap oleh pendekatan triwulan konvensional. Oceanic Nino Index (ONI) digunakan untuk mengkategorikan fase ENSO. Metode bootstrap ganda digunakan dengan melakukan bootstrap ke curah hujan pada fase El Nino dan La Nina. Hasil bootstrap kemudian dibandingkan dengan menggunakan histogram dengan pendekatan lebar Freedman-Diaconis. Hasil menunjukkan bootstrap ganda mampu memberikan gambaran signifikansi yang lebih ketat dibandingkan bootstrap tunggal. Batas 90% direkomendasikan sebagai taraf signifikansi. Triwulan penuh mampu memberikan gambaran yang lebih baik dibandingkan penggunaan triwulan konvensional. Analisis spasial dan regresi mengidentifikasi kabupaten dengan signifikansi modulasi ENSO yang lebih kuat. Pendekatan alternatif ini menawarkan evaluasi yang lebih rinci dan fleksibel untuk menilai apakah ENSO memodulasi curah hujan suatu wilayah secara signifikan.

Kata Kunci: bootstrap, curah hujan triwulan, ENSO

Abstract. The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) modulation affects rainfall in monsoonal regions like East Java, but the conventional quarterly approach (DJF, MAM, JJA, SON) often fails to capture seasonal variations and increases the risk of false positives. This study proposes an alternative approach to evaluate the significance of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) modulation on rainfall using an analysis of 12 overlapping seasonal periods and a double bootstrap method. The research focus aims to develop an alternative method for calculating the significance of ENSO on rainfall using a double bootstrap approach. A case study was conducted using data from East Java. Monthly rainfall data from 202 primary rain gauge stations for the period 1991–2020 were processed into 12 seasonal periods to capture variations not detected by conventional approaches. The Oceanic Niño Index (ONI) was used to categorize ENSO phases. The double bootstrap method was applied by also bootstrapping rainfall data during El Niño and La Niña phases. The bootstrap results were then compared using histograms with the Freedman-Diaconis bandwidth approach. The findings indicate that the double bootstrap method provides a stricter significance assessment compared to the single bootstrap method. A 90% threshold is recommended as the significance level. The full quarterly approach provides a better representation compared to the use of conventional quarters. Spatial and regression analysis identified zone with stronger ENSO modulation significance. This alternative approach offers a more detailed and flexible evaluation to assess whether ENSO significantly modulates rainfall in a region.

Keywords: bootstrap, seasonal rainfall, ENSO.

PENDAHULUAN

El Nino-Southern Oscillation (ENSO) merupakan fenomena iklim global yang memengaruhi variabilitas curah hujan di berbagai wilayah, termasuk Indonesia (Chen dkk., 2024; Li dkk., 2021; Phan-Van dkk., 2022). ENSO memengaruhi curah hujan secara global melalui telekoneksi dengan dampak yang bervariasi secara regional, di mana ada perbedaan respons curah hujan di tiap wilayah yang berbeda (Jin dkk., 2025; Lieber dkk., 2024; You dkk., 2021). Modulasi ENSO, yang terdiri dari fase El Nino, La Nina, dan netral, memiliki dampak signifikan terhadap pola curah hujan (Zaki dan Noda, 2022), yang krusial untuk perencanaan pertanian

dan pengelolaan sumber daya air. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa dampak ENSO terhadap curah hujan ekstrem di Indonesia lebih kuat selama musim kemarau (JJA-SON) dibandingkan musim hujan (DJF-MAM), dengan El Nino menyebabkan kondisi lebih kering dan La Nina menyebabkan kondisi lebih basah terutama di wilayah monsunal (Kurniadi dkk., 2021). Selama episode El Nino tahun 1997 dan 2015, wilayah Indonesia mengalami peningkatan kondisi kekeringan ekstrem hingga 100% di beberapa area (Nugroho dkk., 2021; Setiawan dkk., 2021). Namun, pemahaman mendalam tentang signifikansi modulasi ENSO terhadap curah hujan masih terbatas oleh pendekatan analisis yang konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi celah tersebut dengan mengkaji pendekatan baru dalam analisis signifikansi ENSO terhadap curah hujan dengan menggunakan studi kasus Jawa Timur. Dengan memanfaatkan data dari 202 pos hujan utama yang cukup andal, studi ini berfokus pada Provinsi Jawa Timur merupakan salah satu wilayah paling strategis di Indonesia dalam sektor pertanian. Provinsi ini dikenal sebagai lumbung pangan nasional dengan kontribusi signifikan terhadap produksi pangan utama seperti padi, jagung, kedelai, ubi jalar, dan singkong di 29 kabupaten dan 9 kota, yang berperan penting dalam pertumbuhan ekonomi regional dan nasional (Anggraini., 2020)

Penelitian terdahulu umumnya menggunakan pembagian triwulan berdasarkan musim standar, yaitu DJF (Desember-Januari-Februari), MAM (Maret-April-Mei), JJA (Juni-Juli-Agustus), dan SON (September-Oktober-November), untuk menganalisis dampak ENSO (Supari dkk., 2018; Tangang dkk., 2017). Pendekatan ini seringkali tidak mempertimbangkan variasi submusiman yang mungkin lebih relevan (Zibrah dan Sagita, 2023) dalam konteks monsunal seperti Jawa Timur. ENSO seringkali memiliki dampak minimal ketika berhadapan dengan faktor lokal seperti topografi (Hermawan dkk., 2025; Lee dan Lo, 2021). Selain itu, analisis signifikansi ENSO dalam penelitian Supari dkk menggunakan metode bootstrap hanya pada data periode netral yang kemudian dibandingkan dengan komposit rata-rata curah hujan El Nino atau La Nina. Pendekatan ini mengabaikan potensi informasi dari distribusi curah hujan pada fase El Nino dan La Nina itu sendiri. Celah ini membatasi kemampuan untuk mendeteksi triwulan optimal yang menangkap dinamika ENSO secara lebih rinci. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif untuk mengeksplorasi periode triwulan yang lebih fleksibel dan memanfaatkan data dari semua fase ENSO.

Penelitian ini mengusulkan dua tujuan utama untuk mengisi celah tersebut. Pertama, mengkaji penggunaan pendekatan triwulan secara keseluruhan, bukan hanya terbatas pada empat triwulan musiman (DJF-MAM-JJA-SON), dengan mempertimbangkan 12 periode triwulan tumpang tindih (DJF, JFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA, JAS, ASO, SON, OND, NDJ). Pendekatan ini diharapkan dapat mengidentifikasi triwulan optimal yang menangkap sinyal ENSO dengan lebih baik di Jawa Timur. Kedua, mengajukan alternatif perhitungan signifikansi melalui bootstrap ganda, yaitu dengan membentuk kurva densitas probabilitas (PDF) tidak hanya dari data periode netral, tetapi juga dari data El Nino dan La Nina. Area tidak berpotongan antara PDF fase ENSO dan netral digunakan sebagai ukuran signifikansi. Pendekatan ini memungkinkan analisis asimetri antara dampak El Nino dan La Nina terhadap curah hujan.

Jawa Timur dipilih sebagai studi kasus karena karakteristiknya sebagai wilayah monsunal yang sangat dipengaruhi oleh ENSO. Peranan Jawa Timur sebagai lumbung padi nasional (Anggraini.,2020). Kekeringan meteorologis di Pulau Jawa sangat dipengaruhi oleh El Nino dan fase positif IOD (Siswanto dkk., 2022). Proyeksi model iklim menunjukkan peningkatan intensitas dan frekuensi curah hujan ekstrem selama musim hujan dengan dampak yang signifikan pada wilayah berpopulasi padat seperti Jawa Timur (Kurniadi dkk., 2024) sehingga diperlukan studi iklim spesifik. Selain itu, data dari 202 pos hujan utama memberikan cakupan spasial yang representatif untuk menangkap variabilitas curah hujan di wilayah ini. Curah hujan di Jawa Timur menunjukkan pola musiman yang kuat, dengan musim hujan dan musim kemarau yang dipengaruhi oleh fase ENSO. Variasi curah hujan ini berdampak langsung pada produktivitas sawah, sehingga kajian modulasi ENSO yang lebih spesifik diperlukan untuk mendukung pengambilan keputusan di sektor pertanian. Penelitian ini menggunakan data curah hujan harian yang diolah menjadi triwulan untuk analisis yang lebih terperinci. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan memberikan wawasan baru tentang dinamika ENSO di wilayah monsunal.

Metode bootstrap ganda yang diusulkan memungkinkan pembentukan PDF untuk masing-masing fase ENSO, sehingga memungkinkan perbandingan distribusi curah hujan secara langsung. Pendekatan ini berbeda dari metode konvensional bootstrap tunggal yang hanya membandingkan komposit curah hujan El Nino atau La Nina dengan distribusi bootstrap Netral (Nugroho dkk., 2024). Dengan menghitung area tidak berpotongan antara PDF, penelitian ini dapat mengukur tingkat signifikansi modulasi ENSO dengan lebih robust. Pendekatan ini juga mempertimbangkan autokorelasi dalam data curah hujan melalui penggunaan block bootstrap untuk menjaga struktur temporal. Selain itu, analisis 12 triwulan tumpang tindih memungkinkan deteksi periode yang lebih sensitif terhadap modulasi ENSO, yang tidak terdeteksi dalam pembagian musiman standar. Dengan demikian, metode ini berpotensi memberikan resolusi temporal yang lebih tinggi dalam analisis curah hujan.

Celah penelitian yang diisi oleh studi ini adalah keterbatasan pendekatan sebelumnya dalam menentukan triwulan optimal dan ketergantungan pada bootstrap hanya untuk data netral. Penelitian terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Supari dkk. (2018) dan Tangang dkk. (2017), tidak secara eksplisit mengeksplorasi periode triwulanan di luar musim standar atau memanfaatkan distribusi curah hujan dari fase ENSO secara langsung. Pendekatan ini sering kali mengabaikan variasi submusiman yang signifikan di wilayah monsunal. Dengan mengusulkan bootstrap ganda dan analisis 12 triwulan, penelitian ini menawarkan metode yang lebih fleksibel dan komprehensif untuk mengevaluasi dampak ENSO. Penelitian ini merupakan penelitian metodologis yang berusaha memberikan pendekatan yang lebih fleksibel terkait suatu parameter seperti yang dilakukan oleh Taylor (2001). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan terhadap metodologi analisis ENSO.

Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan alternatif perhitungan signifikansi ENSO terhadap curah hujan melalui pendekatan bootstrap ganda, dengan judul “Alternatif Perhitungan Signifikansi ENSO terhadap Curah Hujan: Bootstrap Ganda”. Dengan fokus pada Jawa Timur, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengelolaan sumber daya air dan pertanian di wilayah yang strategis ini. Pendekatan baru ini diharapkan mampu mengidentifikasi periode triwulanan yang optimal untuk analisis ENSO dan memberikan wawasan tentang asimetri dampak El Nino dan La Nina. Studi ini juga akan memvalidasi hasilnya dengan metode konvensional untuk memastikan konsistensi dan keandalan. Dengan memanfaatkan data dari 202 pos hujan utama, penelitian ini menawarkan analisis spasial yang mendalam. Akhirnya, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi penelitian serupa di wilayah monsunal lainnya di Indonesia.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan data curah hujan bulanan dari 202 pos hujan utama di Jawa Timur yang dikelola oleh Stasiun Klimatologi Jawa Timur, mencakup periode Januari 1991 hingga Desember 2020. Data ini berasal dari pos-pos operasional yang secara rutin digunakan untuk analisis dan prediksi iklim bulanan, memberikan cakupan spasial yang representatif untuk wilayah Jawa Timur. Untuk mengkategorikan fase ENSO, penelitian ini memanfaatkan Oceanic Nino Index (ONI) dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), yang mendefinisikan periode El Nino, La Nina, dan netral berdasarkan anomali suhu permukaan laut di wilayah Nino 3.4 (Haq dkk., 2021; Lv dkk., 2022) dengan ambang batas $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ selama minimal lima bulan berturut-turut. Data curah hujan bulanan diolah menjadi data triwulanan untuk menangkap variasi submusiman, dengan 12 periode triwulanan tumpang tindih (DJF, JFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA, JAS, ASO, SON, OND, NDJ) untuk mengevaluasi modulasi ENSO secara komprehensif. Kualitas data diperiksa untuk memastikan kelengkapan, dengan data yang hilang diisi melalui interpolasi sederhana menggunakan metode invers jarak terbobot jika proporsinya kurang dari 5%. Semua analisis statistik dilakukan menggunakan perangkat lunak R-Statistics, yang mendukung pemrosesan data dan visualisasi yang diperlukan.

Data curah hujan bulanan diaggresasi menjadi 12 periode triwulanan tumpang tindih untuk setiap pos hujan, memungkinkan analisis variasi submusiman yang lebih rinci dibandingkan pendekatan musiman standar

(DJF, MAM, JJA, SON). Setiap periode triwulan diberi label sebagai El Nino, La Nina, atau netral berdasarkan nilai ONI yang sesuai, memastikan klasifikasi yang akurat untuk setiap fase ENSO. Untuk menangkap variabilitas curah hujan, metode bootstrap diterapkan pada data curah hujan masing-masing fase ENSO. Sebanyak 1000 iterasi *bootstrap with replacement* (Villafuerte and Matsumoto, 2015) dilakukan untuk menghasilkan distribusi empiris yang stabil, masing-masing menghasilkan 1000 datum untuk El Nino, La Nina, dan netral. Pendekatan ini memungkinkan pembentukan distribusi yang representatif untuk setiap fase ENSO di setiap pos hujan dan periode triwulan. Dengan demikian, penelitian ini dapat mengevaluasi modulasi ENSO dengan resolusi temporal yang tinggi.

Analisis perbandingan distribusi dilakukan dengan menggabungkan hasil bootstrap dari dua fase (misalnya, El Nino dan netral, atau La Nina dan netral) menjadi dua histogram dengan lebar kelas yang sama. Lebar kelas ditentukan menggunakan aturan Freedman-Diaconis (Freedman dan Diaconis, 1981; Scott, 2010), yang didefinisikan sebagai berikut.

$$Lebar = \frac{2 \cdot IQR}{\sqrt[3]{n}} \quad (1)$$

Dengan

IQR = inter-quartile range dihitung dari data gabungan (2000 datum)

n = jumlah datum = 2000

Aturan ini dipilih karena robust terhadap distribusi miring seperti curah hujan, memastikan jumlah kelas yang optimal untuk visualisasi distribusi tanpa kehilangan detail. Batas kelas (breaks) ditentukan berdasarkan rentang data gabungan untuk menjamin konsistensi antara histogram El Nino, La Nina, dan netral. Histogram dibuat menggunakan fungsi `hist()` dalam R-Statistics (R Core Team, 2022), dengan frekuensi relatif dihitung untuk setiap kelas untuk memungkinkan perbandingan distribusi. Pendekatan ini menghasilkan representasi distribusi yang intuitif dan mudah diinterpretasikan.

Overlap Coefficient (OVL) dihitung berdasarkan jumlah frekuensi relatif pada kelas histogram yang berimpit antara dua distribusi, didefinisikan sebagai berikut.

$$OVL = \sum \min(f_{El\ Nino\ atau\ La\ Nina}, f_{Netral}) \quad (2)$$

Di mana $f_{El\ Nino\ atau\ La\ Nina}$ adalah frekuensi relatif dari histogram El Nino atau La Nina sedangkan f_{Netral} adalah frekuensi relatif histogram Netral. Pendekatan ini dipilih karena sederhana dan intuitif, memanfaatkan hasil bootstrap yang telah mencakup proses pengacakan tanpa memerlukan estimasi densitas tambahan seperti kernel density estimation. Area tidak berpotongan ($1-OVL$) digunakan sebagai ukuran signifikansi modulasi ENSO terhadap curah hujan. Perhitungan ini dilakukan untuk setiap pos hujan dan setiap periode triwulan, dan dapat menghasilkan peta spasial signifikansi di Jawa Timur. Visualisasi histogram dilakukan menggunakan R-Statistics, dengan histogram ditampilkan secara tumpang tindih menggunakan transparansi (alpha) untuk menyoroti wilayah yang berimpit. Nilai $1-OVL$ disertakan dalam keterangan plot untuk mendukung interpretasi.

Hasil perbandingan histogram menghasilkan lima kemungkinan kategori signifikansi untuk setiap pos hujan dan periode triwulan: (a) signifikan berbeda dengan curah hujan meningkat, (b) signifikan berbeda dengan curah hujan menurun, (c) tidak signifikan. Kategori ini ditentukan berdasarkan perbandingan rata-rata dari distribusi bootstrap antara fase ENSO dan netral, dengan $1-OVL$ sebagai indikator signifikansi. Peta spasial signifikansi dihasilkan melalui interpolasi menggunakan metode IDW untuk menangkap variasi regional di Jawa Timur. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi periode triwulan optimal yang menunjukkan modulasi ENSO paling signifikan, dengan implikasi langsung bagi sektor pertanian. Dengan demikian, metodologi ini dirancang untuk memberikan analisis yang intuitif dan robust dalam mengevaluasi dampak ENSO terhadap curah hujan.

Analisis spasial dan regresi dilakukan menggunakan R-Statistics. Analisis spasial dilakukan dengan menggunakan interpolasi (Kurniawan dkk., 2021) *Inverse Distance Weight* (IDW) dengan power=5, negihbour used=12, dan resolusi piksel 0,1x0,1 derajat. Analisis regresi dilakukan melalui pengaitan kekuatan modulasi El Nino, La Nina, dan Rata-rata keduanya dengan bujur, lintang, ketinggian, dan jarak dengan pantai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jumlah Triwulan Netral, El Nino, dan La Nina

Tabel 1 menyajikan distribusi kondisi ENSO (El Nino, La Nina, dan netral) untuk periode 1991–2020 berdasarkan Oceanic Nino Index (ONI) dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) pada 12 periode triwulan. Dari tabel tersebut, jumlah kejadian netral bervariasi antara 8 hingga 20 peristiwa per triwulan, dengan proporsi tertinggi pada triwulan AMJ (20 peristiwa) dan terendah pada OND dan NDJ (masing-masing 8 peristiwa). Sebaliknya, kejadian El Nino berkisar antara 5 hingga 10 peristiwa, dengan frekuensi tertinggi pada triwulan DJF, SON, OND, dan NDJ (masing-masing 10 peristiwa), sedangkan La Nina berkisar antara 4 hingga 12 peristiwa, dengan frekuensi tertinggi pada triwulan OND dan NDJ (masing-masing 12 peristiwa). Secara keseluruhan, dari total 360 triwulan ($30 \text{ tahun} \times 12 \text{ triwulan}$), proporsi kondisi ENSO adalah 46% netral, 26% El Nino, dan 28% La Nina. Distribusi ini menunjukkan bahwa kejadian El Nino dan La Nina cukup seimbang dalam periode analisis, mendukung argumen bahwa data curah hujan pada kedua fase tersebut memiliki jumlah sampel yang memadai untuk analisis statistik. Proporsi yang seimbang ini memperkuat validitas penggunaan metode block bootstrap pada data El Nino dan La Nina, tidak hanya pada data netral seperti yang umum dilakukan pada penelitian terdahulu. Dengan demikian, pendekatan bootstrap ganda yang diusulkan dalam penelitian ini dapat menangkap dinamika curah hujan pada semua fase ENSO secara lebih komprehensif.

Tabel 1. Kondisi ENSO Periode 1991-2020 Berdasarkan ONI

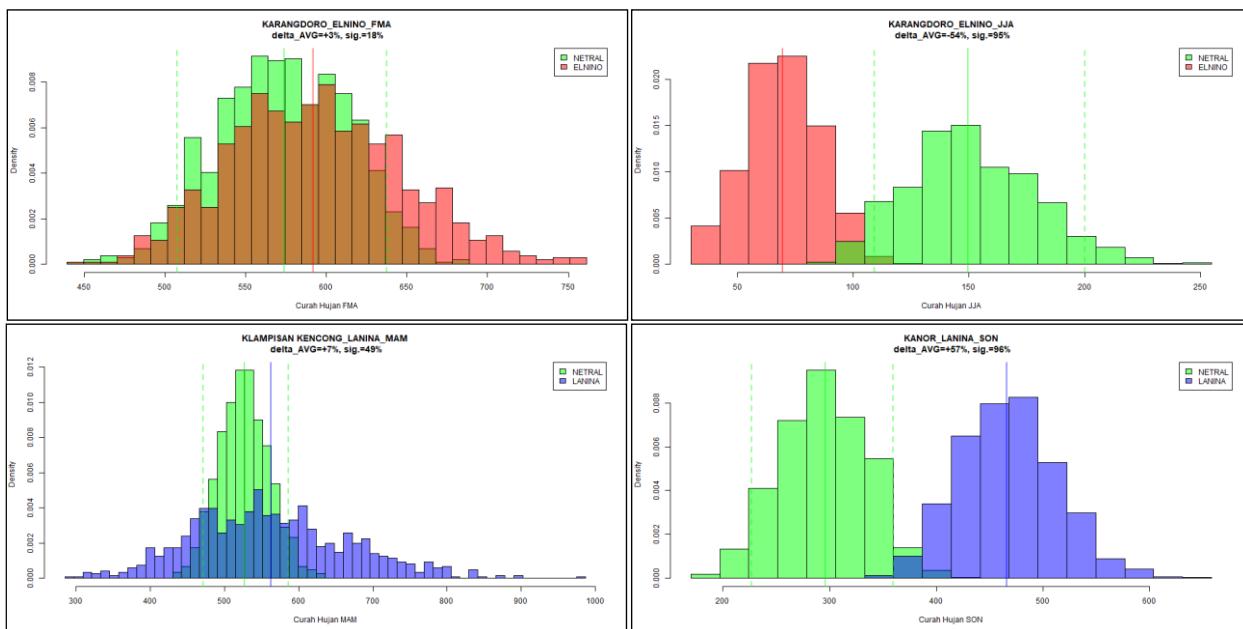
Kondisi	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
Netral	10	11	14	19	20	19	18	15	12	10	8	8
El Nino	10	9	7	5	6	6	6	6	9	10	10	10
La Nina	10	10	9	6	4	5	6	9	9	10	12	12
Total	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Analisis distribusi kejadian ENSO dalam Tabel 1 juga menunjukkan variasi temporal antar triwulan, yang mengindikasikan pentingnya analisis 12 periode triwulan tumpang tindih untuk menangkap sensitivitas modulasi ENSO. Triwulan AMJ dan MAM menunjukkan dominasi kondisi netral (20 dan 19 peristiwa), yang mencerminkan stabilitas iklim pada periode transisi musim di Jawa Timur. Sebaliknya, triwulan OND dan NDJ memiliki proporsi La Nina yang lebih tinggi (12 peristiwa), konsisten dengan peningkatan curah hujan pada puncak musim hujan di wilayah monsunal. Distribusi yang seimbang antara El Nino dan La Nina (26% dan 28%) menegaskan bahwa kedua fase memiliki representasi yang cukup untuk menghasilkan distribusi empiris yang stabil melalui bootstrap. Pendekatan ini berbeda dari studi terdahulu yang hanya membootstrapping data netral, sehingga mengabaikan potensi informasi dari distribusi El Nino dan La Nina. Dengan memanfaatkan data dari 202 pos hujan utama, analisis ini dapat menghasilkan peta spasial modulasi ENSO yang lebih rinci untuk mendukung pengelolaan pertanian di Jawa Timur. Oleh karena itu, hasil ini memperkuat argumen bahwa pendekatan triwulan yang lebih fleksibel lebih cocok digunakan dalam mengevaluasi dampak ENSO terhadap curah hujan.

Pendekatan Lebar Pita Freedman-Diaconis

Hasil dari proses bootstrap menghasilkan nilai-nilai sesuai dengan jumlah sampel ulang yang dilakukan, yaitu sebanyak 1000 langkah, sebagaimana mengacu pada penelitian terdahulu (Supari et al., 2018; Tangang et al., 2017; Villafuerte dan Matsumoto, 2015). Visualisasi yang direkomendasikan dalam penelitian ini adalah

histogram dengan pendekatan lebar pita Freedman-Diaconis. Batang histogram untuk fase El Niño diwarnai merah, La Niña diwarnai biru, dan Netral diwarnai hijau, dengan tingkat transparansi 50% untuk memungkinkan perubahan warna pada area tumpang tindih, sehingga memberikan visualisasi yang jelas pada perpotongan histogram. Sumbu-X merepresentasikan rentang curah hujan sesuai triwulan yang digunakan, sedangkan sumbu-Y menunjukkan densitas. Secara teori, kedua histogram memiliki luas tutupan yang sama. Garis hijau sambung menunjukkan rata-rata komposit Netral, sedangkan garis hijau putus menandakan batas persentil 5 dan 95 yang digunakan dalam bootstrap tunggal. Garis merah (biru) sambung merepresentasikan rata-rata komposit El Niño (La Niña). Gambaran histogram dengan pendekatan lebar pita Freedman-Diaconis disajikan pada gambar dibawah ini:



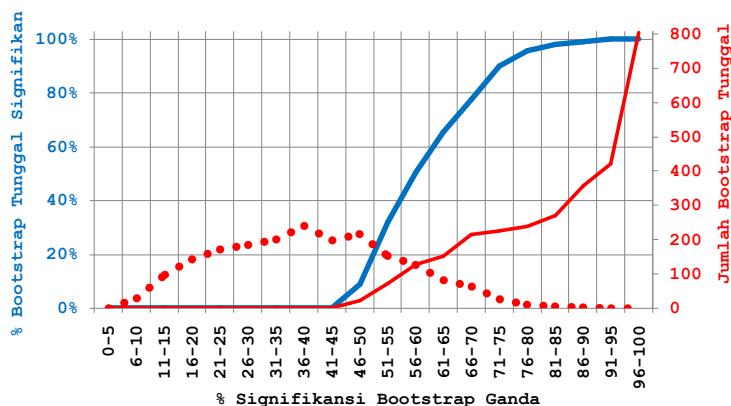
Gambar 1. Rekomendasi Visualisasi El Nino-La Nina (atas-bawah) dan Signifikan-Tidak Signifikan (kiri-kanan)

Gambar 1 di atas menunjukkan kondisi tidak signifikan (kiri) dan signifikan (kanan), dengan contoh untuk fase El Niño (atas) dan La Niña (bawah) yang menggambarkan pergesseran hasil bootstrap yang bervariasi. Dengan menggunakan data dari 202 pos hujan, dua fase ENSO, dan 12 triwulan, total 4848 gambar dihasilkan. Berdasarkan analisis dengan batas signifikansi 90%, terdapat 940 kasus modulasi El Niño yang signifikan dan 1484 kasus yang tidak signifikan, serta 369 kasus modulasi La Niña yang signifikan dan 2055 kasus yang tidak signifikan. Skrip pengolahan rekomendasi visual dapat diperoleh dengan menghubungi penulis korepondensi.

Perbedaan Hasil dengan Bootstrap Tunggal

Evaluasi perbandingan antara metode bootstrap tunggal (hanya pada data netral) dan metode bootstrap ganda (melibatkan data El Nino dan La Nina) dilakukan untuk menilai efektivitas pendekatan baru dalam mengevaluasi signifikansi modulasi ENSO terhadap curah hujan di Jawa Timur. Gambar 2 menyajikan distribusi persentase signifikansi bootstrap ganda menunjukkan bahwa kondisi yang dianggap tidak signifikan oleh bootstrap tunggal (ditunjukkan dengan garis merah putus) memiliki persentase signifikansi bootstrap ganda antara 6–90%, dengan puncak pada rentang 36–40%. Tidak ada kondisi tidak signifikan dari bootstrap tunggal yang beririsan dengan persentase signifikansi bootstrap ganda di atas 90%, menunjukkan bahwa metode bootstrap ganda mampu membedakan kondisi yang benar-benar tidak signifikan dengan lebih jelas. Sebaliknya, untuk kondisi yang dianggap signifikan oleh bootstrap tunggal (garis merah sambung), persentase signifikansi bootstrap ganda dimulai dari rentang 46–50% dan meningkat hingga 96–100%, menunjukkan keselarasan dengan hasil bootstrap tunggal pada tingkat signifikansi yang tinggi. Garis biru, yang mewakili proporsi kondisi signifikan bootstrap tunggal relatif terhadap total kondisi (signifikan dan tidak signifikan),

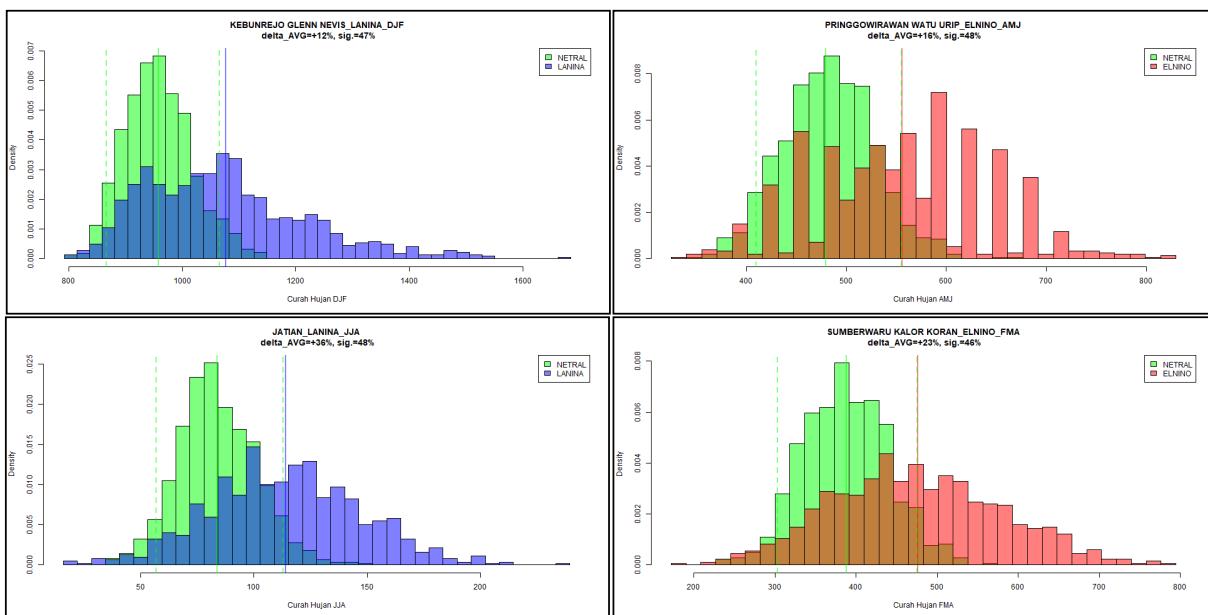
mengindikasikan bahwa pada rentang signifikansi bootstrap ganda di atas 90%, seluruhnya beririsan dengan hasil bootstrap tunggal yang signifikan. Pada rentang 71–75%, 90% hasil bootstrap ganda beririsan dengan bootstrap tunggal signifikan, sementara 10% beririsan dengan bootstrap tunggal tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kedua metode menghasilkan hasil yang relatif konsisten, dengan bootstrap ganda memberikan resolusi yang lebih halus dalam menilai signifikansi.



Gambar 2. Perbandingan Persen Signifikansi Bootsrap Ganda dengan Bootstrap Tunggal

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa 64% kondisi signifikan dari bootstrap tunggal diwakili oleh persentase signifikansi bootstrap ganda di atas 80%, dan 42% di antaranya berada di atas 90%, mengindikasikan bahwa metode bootstrap ganda memiliki kemampuan saringan yang lebih ketat terhadap kondisi signifikan. Pendekatan bootstrap ganda, yang menghitung area tidak berpotongan ($1 - OVL$) berdasarkan frekuensi histogram, cenderung menghasilkan peluang signifikansi yang lebih rendah dibandingkan bootstrap tunggal, sehingga dapat mengidentifikasi kondisi yang kemungkinan tidak signifikan secara lebih akurat. Batas signifikansi 90% diusulkan sebagai ambang batas untuk analisis selanjutnya, sejalan dengan kelaziman penggunaan batas persentil 5% dan 95% dalam penelitian sebelumnya. Keputusan ini didukung oleh fakta bahwa pada rentang di atas 90%, hasil bootstrap ganda sepenuhnya konsisten dengan bootstrap tunggal signifikan, meminimalkan risiko salah positif. Pendekatan ini juga memperkuat argumen bahwa bootstrap ganda, dengan memanfaatkan distribusi El Nino dan La Nina, memberikan evaluasi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional yang hanya menggunakan data netral. Dengan demikian, hasil ini menegaskan keunggulan metode bootstrap ganda dalam menangkap dinamika modulasi ENSO di Jawa Timur.

Gambar 3 yang disajikan menampilkan empat contoh kasus di mana metode bootstrap tunggal dan bootstrap ganda menghasilkan penilaian signifikansi modulasi ENSO yang berbeda, dengan bootstrap tunggal mengindikasikan signifikansi sementara bootstrap ganda menunjukkan sebaliknya. Salah satu contoh, pada pos hujan Kebunrejo Glen Nevis untuk kondisi La Nina pada triwulan DJF, menunjukkan bahwa histogram hasil bootstrap netral (batang hijau) memiliki distribusi yang terkonsentrasi pada interval tertentu, sedangkan histogram La Nina (batang biru) menunjukkan penyebaran yang lebih luas. Wilayah tumpang tindih antara kedua histogram (batang lebih gelap) ternyata cukup signifikan, mengindikasikan bahwa distribusi curah hujan La Nina dan netral memiliki kesamaan yang substansial. Namun, metode bootstrap tunggal menyatakan kondisi ini signifikan karena rata-rata komposit La Nina (garis biru vertikal) melebihi persentil 95 dari distribusi bootstrap netral (garis hijau putus). Pendekatan ini tidak mempertimbangkan lebarnya standar deviasi distribusi La Nina, yang menyebabkan rata-rata komposit tidak sepenuhnya mewakili karakteristik distribusi. Dengan demikian, metode bootstrap ganda, yang menggunakan Overlap Coefficient (OVL) berdasarkan frekuensi histogram, mampu mendeteksi tumpang tindih yang signifikan, menunjukkan bahwa kondisi ini sebenarnya tidak signifikan. Hal ini menegaskan bahwa bootstrap ganda memberikan evaluasi yang lebih akurat dengan mempertimbangkan distribusi penuh dari fase ENSO.



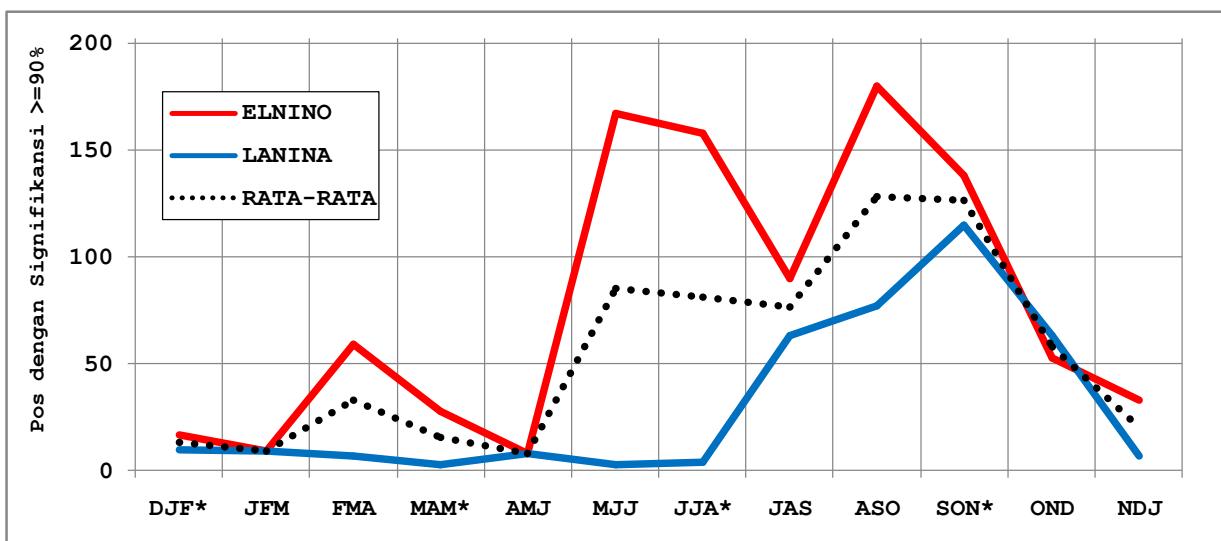
Gambar 3. Kasus Signifikan pada Bootstrap Tunggal tapi Tidak Signifikan pada Bootstrap Ganda

Contoh-contoh lain dalam gambar menunjukkan pola serupa untuk kondisi El Nino, dengan histogram hasil bootstrap El Nino (batang merah) dan rata-rata komposit (garis merah vertikal) dibandingkan dengan distribusi netral. Dalam kasus ini, tumpang tindih histogram yang signifikan antara El Nino dan netral menunjukkan bahwa perbedaan distribusi tidak cukup besar untuk dianggap signifikan menurut bootstrap ganda, meskipun bootstrap tunggal menganggapnya signifikan karena rata-rata komposit El Nino berada di luar persentil 95 netral. Kondisi ini mengindikasikan bahwa bootstrap tunggal cenderung menghasilkan bias dengan mengasumsikan rata-rata komposit sebagai representasi yang memadai, padahal tumpang tindih distribusi yang luas menunjukkan sebaliknya. Pendekatan bootstrap ganda, dengan menghitung area tidak berpotongan (1 - OVL), memberikan saringan yang lebih ketat terhadap kondisi signifikan, mengurangi risiko salah positif dalam penilaian modulasi ENSO. Hasil ini relevan bagi prakirawan iklim, karena mengandalkan rata-rata komposit saja dapat menyesatkan dalam memprediksi dampak El Nino atau La Nina pada curah hujan di Jawa Timur. Dengan demikian, pendekatan bootstrap ganda menawarkan keunggulan dalam menangkap dinamika distribusi curah hujan secara lebih holistik. Oleh karena itu, temuan ini mendukung pentingnya mempertimbangkan distribusi penuh melalui histogram untuk analisis modulasi ENSO yang lebih akurat.

Triwulan Optimal

Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan 12 periode triwulan tumpang tindih (DJF, JFM, FMA, MAM, AMJ, MJJ, JJA, JAS, ASO, SON, OND, NDJ) untuk mengevaluasi modulasi ENSO terhadap curah hujan di Jawa Timur, berbeda dari pendekatan konvensional yang hanya menggunakan triwulan DJF, MAM, JJA, dan SON yang sering disebut sebagai "musim". Pendekatan konvensional ini kurang tepat untuk konteks Indonesia, yang musimnya ditentukan oleh pola curah hujan, bukan perubahan suhu seperti di wilayah lintang tinggi. Gambar 4 menunjukkan bahwa modulasi El Nino lebih dominan dibandingkan La Nina di Jawa Timur, dengan garis signifikansi El Nino (merah) secara konsisten berada di atas garis rata-rata (hitam putus) untuk sebagian besar triwulan. Puncak signifikansi El Nino terjadi pada triwulan MJJ, JJA, dan ASO, di mana lebih dari 150 dari 202 pos hujan utama menunjukkan modulasi signifikan (persentase signifikansi $\geq 90\%$ berdasarkan 1 - OVL). Dari ketiga triwulan ini, hanya JJA yang termasuk dalam triwulan konvensional, menunjukkan bahwa penggunaan triwulan konvensional saja dapat mengabaikan periode kritis seperti MJJ dan ASO yang sangat dipengaruhi El Nino. Pendekatan ini mengindikasikan bahwa analisis triwulan yang lebih fleksibel dapat mengurangi bias dalam penilaian modulasi ENSO. Dengan demikian, temuan ini

menegaskan pentingnya mempertimbangkan seluruh triwulan untuk menangkap dinamika curah hujan yang lebih akurat di wilayah monsunal seperti Jawa Timur.



Gambar 4. Jumlah Pos dengan Signifikansi Modulasi ENSO tiap Triwulan

Modulasi La Nina menunjukkan pola signifikansi yang berbeda, dengan puncak pada triwulan SON (triwulan konvensional), di mana lebih dari 50 pos hujan utama menunjukkan signifikansi, namun triwulan JAS, ASO, dan OND juga mencatatkan signifikansi pada lebih dari 50 pos. Ketiga triwulan ini, yang berdekatan dengan SON, menunjukkan bahwa modulasi La Nina cenderung terkonsentrasi pada periode menjelang dan selama puncak musim hujan, berbeda dengan JJA yang memiliki signifikansi La Nina yang sangat rendah. Analisis agregasi menunjukkan bahwa pola triwulan konvensional (DJF-MAM-JJA-SON) menghasilkan rata-rata 28,6 pos hujan dengan modulasi signifikan, lebih rendah dibandingkan pola FMA-MJJ-ASO-NDJ yang mencatatkan rata-rata 33,3 pos. Hal ini mengindikasikan bahwa pendekatan triwulan tumpang tindih lebih sensitif dalam mendekripsi modulasi ENSO dibandingkan triwulan konvensional. Penggunaan triwulan konvensional saja berisiko menyebabkan bias bagi prakirawan iklim, karena dapat mengabaikan periode seperti JAS dan ASO yang ternyata signifikan untuk La Nina. Oleh karena itu, hasil ini mendukung argumen bahwa penelitian modulasi ENSO ke depan perlu mempertimbangkan seluruh opsi triwulanan untuk menghasilkan evaluasi yang lebih akurat dan komprehensif. Pendekatan ini memiliki implikasi penting untuk pengelolaan pertanian dan sumber daya air di Jawa Timur, dengan memungkinkan perencanaan yang lebih tepat berdasarkan periode triwulanan yang optimal.

Analisis Spasial dan Regresi

Analisis spasial signifikansi modulasi ENSO terhadap curah hujan di Jawa Timur dilakukan dengan mengagregasi hasil signifikansi menggunakan metode interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) untuk menghasilkan peta distribusi spasial. Interpolasi IDW dilakukan dengan pangkat (power) 2 dan mempertimbangkan 12 titik tetangga terdekat untuk setiap pos hujan, memastikan representasi spasial yang halus dan akurat. Yang diinterpolasi adalah jumlah triwulan pada setiap pos hujan yang memiliki persentase signifikansi modulasi ENSO $\geq 90\%$, berdasarkan nilai 1 - OVL dari metode bootstrap ganda. Nilai ini berkisar dari 0 (tidak ada triwulan yang signifikan) hingga 12 (seluruh triwulan signifikan), mencerminkan tingkat modulasi El Nino atau La Nina pada setiap pos hujan. Data untuk El Nino dan La Nina diinterpolasi secara terpisah sebelum dirata-rata untuk menghasilkan gambaran keseluruhan modulasi ENSO. Peta hasil interpolasi menampilkan pos hujan utama sebagai lingkaran, dengan warna di luar lingkaran menunjukkan hasil interpolasi. Legenda pada setiap peta disesuaikan dengan rentang nilai maksimum dan minimum yang berbeda antara El Nino dan La Nina untuk mencerminkan variasi signifikansi masing-masing fase.



Gambar 5. Analisis Spasial Signifikansi Modulasi El Nino (kiri), La Nina (tengah), dan Rata-Ratanya (kanan)

Gambar 5 menunjukkan bahwa modulasi El Nino memiliki pengaruh yang kuat di beberapa wilayah di Jawa Timur, dengan lima kabupaten/kota yang paling terdampak adalah Pacitan, Trenggalek, Tuban, Ponorogo, dan Madiun. Kabupaten-kabupaten ini menunjukkan jumlah triwulan signifikan yang tinggi, mengindikasikan bahwa curah hujan di wilayah tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi El Nino. Sebaliknya, modulasi La Nina menunjukkan pengaruh yang signifikan di Mojokerto, Madiun, Pamekasan, Sidoarjo, dan Surabaya. Variasi spasial ini mencerminkan perbedaan pola curah hujan antara El Nino, yang cenderung mengurangi curah hujan, dan La Nina, yang meningkatkan curah hujan di wilayah-wilayah tersebut. Peta interpolasi untuk masing-masing fase ENSO memperjelas distribusi spasial signifikansi, dengan warna yang lebih hijau menunjukkan jumlah triwulan signifikan yang lebih tinggi. Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan bootstrap ganda mampu mengidentifikasi wilayah-wilayah yang sensitif terhadap modulasi ENSO dengan lebih rinci dibandingkan metode konvensional.

Rata-rata hasil interpolasi dari modulasi El Nino dan La Nina mengidentifikasi lima kabupaten/kota dengan tingkat modulasi ENSO tertinggi, yaitu Madiun, Mojokerto, Tuban, Sidoarjo, dan Situbondo. Wilayah-wilayah ini menunjukkan jumlah triwulan signifikan yang tinggi untuk kedua fase ENSO, menjadikannya prioritas untuk perhatian khusus dalam pengelolaan pertanian dan sumber daya air saat terjadi perubahan signifikan pada Oceanic Nino Index (ONI). Madiun, yang muncul pada ketiga peringkat (El Nino, La Nina, dan rata-rata), menunjukkan sensitivitas yang konsisten terhadap modulasi ENSO, kemungkinan karena lokasinya yang strategis di wilayah agraria Jawa Timur. Peta rata-rata interpolasi memberikan gambaran holistik tentang dampak ENSO, dengan warna yang mencerminkan intensitas modulasi di seluruh wilayah. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan 12 triwulan tumpang tindih dan metode bootstrap ganda memungkinkan deteksi wilayah-wilayah kritis yang tidak akan sepenuhnya teridentifikasi dengan triwulan konvensional. Dengan demikian, hasil analisis spasial ini mendukung pentingnya pendekatan triwulanan yang lebih fleksibel untuk menghasilkan rekomendasi yang lebih akurat bagi prakirawan iklim dan pengelola sumber daya di Jawa Timur.

Tabel 2. Hasil Analisis Regresi

Modulasi	Konstanta	Bujur	Lintang	Ketinggian	Jarak ke Pantai
El Nino	76.752	-0.616***	0.351	0.001**	-0.001
La Nina	-35.019	0.363**	0.583**	0.000	0.002***
Rata-Rata	20.866	-0.126	0.467**	0.001	0.001

***=signifikan p-value 99.9%, **=signifikan p-value 99%

Tabel 2 menyajikan hasil analisis regresi untuk mengevaluasi faktor-faktor geografis yang memengaruhi signifikansi modulasi ENSO terhadap curah hujan di Jawa Timur, dengan variabel independen meliputi bujur, lintang, ketinggian, dan jarak ke pantai. Untuk modulasi El Nino, hasil regresi menunjukkan bahwa bujur (koefisien -0.616, signifikan pada p-value 99.9%) dan ketinggian (koefisien 0.001, signifikan pada p-value 99%) merupakan faktor signifikan, mengindikasikan bahwa wilayah di bagian barat Jawa Timur dan wilayah dengan ketinggian lebih tinggi memiliki peluang lebih besar untuk dipengaruhi oleh El Nino. Konstanta regresi

El Nino sebesar 76.752 mencerminkan baseline modulasi yang kuat di wilayah tersebut. Sebaliknya, lintang dan jarak ke pantai tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap modulasi El Nino. Temuan ini menegaskan bahwa distribusi spasial modulasi El Nino cenderung terkonsentrasi di wilayah barat dan dataran tinggi, konsisten dengan pola penurunan curah hujan selama El Nino di Jawa Timur. Dengan demikian, analisis ini mendukung pentingnya mempertimbangkan faktor geografis dalam mengevaluasi dampak El Nino. Hasil ini juga sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa triwulan MJJ, JJA, dan ASO memiliki modulasi El Nino yang signifikan di wilayah-wilayah tersebut.

Untuk modulasi La Nina, regresi menunjukkan bahwa bujur (koefisien 0.363, signifikan pada p-value 99%), lintang (koefisien 0.583, signifikan pada p-value 99%), dan jarak ke pantai (koefisien 0.002, signifikan pada p-value 99.9%) secara signifikan memengaruhi modulasi, dengan konstanta -35.019. Wilayah di timur laut Jawa Timur (lebih dekat ke ekuator dan lebih ke timur) serta wilayah yang lebih jauh dari pantai lebih rentan terhadap modulasi La Nina, yang cenderung meningkatkan curah hujan. Ketika modulasi El Nino dan La Nina dirata-ratakan, hanya lintang (koefisien 0.467, signifikan pada p-value 99%) yang memengaruhi signifikansi modulasi ENSO, menunjukkan bahwa posisi lintang merupakan faktor dominan dalam modulasi keseluruhan. Ketidaksimetri antara pengaruh El Nino dan La Nina, di mana El Nino dipengaruhi oleh bujur dan ketinggian sedangkan La Nina oleh bujur, lintang, dan jarak ke pantai, mendukung teori bahwa dampak kedua fase ENSO bersifat asimetri. Oleh karena itu, analisis ini menegaskan perlunya mengkaji El Nino dan La Nina secara terpisah untuk memahami dinamika modulasi curah hujan di Jawa Timur. Hasil ini memiliki implikasi penting bagi prakirawan iklim dan pengelola sumber daya air dalam mengidentifikasi wilayah prioritas berdasarkan karakteristik geografis.

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan analisis 12 triwulan tumpang tindih dan metode bootstrap ganda memberikan evaluasi yang lebih rinci dan fleksibel dalam menilai signifikansi modulasi El Nino-Southern Oscillation (ENSO) terhadap curah hujan di Jawa Timur dibandingkan pendekatan konvensional. Distribusi kejadian ENSO periode 1991–2020, dengan proporsi El Nino (26%), La Nina (28%), dan Netral (46%), mengindikasikan keseimbangan yang memadai untuk analisis statistik bootstrapping ganda, bukan hanya bootstrap tunggal ke Netral. Hasil penelitian ini memberikan rekomendasi visualisasi bootstrap dengan memanfaatkan distribusi El Nino dan La Nina, memberikan evaluasi dimana metode bootstrap ganda lebih baik dibandingkan metode konvensional (bootstrap tunggal) yang hanya menggunakan data netral. Dengan demikian, hasil ini menegaskan keunggulan metode bootstrap ganda dalam menangkap dinamika modulasi ENSO di Jawa Timur.

Metode bootstrap ganda, yang memanfaatkan bootstrap dari fase El Nino dan La Nina, mampu mengurangi risiko salah positif dengan menghitung area tidak berpotongan (1 - OVL), menghasilkan 64% kondisi signifikan dengan persentase signifikansi di atas 80%. Analisis spasial menggunakan interpolasi mengidentifikasi kabupaten seperti Madiun, Mojokerto, dan Tuban sebagai wilayah dengan modulasi ENSO tertinggi, mencerminkan variasi geografis yang signifikan. Pendekatan ini mengatasi keterbatasan triwulan konvensional (DJF, MAM, JJA, SON), yang sering kali tidak menangkap dinamika di wilayah monsunal seperti Jawa Timur. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, seperti Nugroho dkk. (2024), yang menyoroti pengaruh ENSO pada curah hujan di Pulau Jawa, namun memperluas wawasan dengan pendekatan triwulanan yang lebih fleksibel. Hasil regresi juga menegaskan bahwa faktor geografis, seperti bujur, lintang, ketinggian, dan jarak ke pantai, memengaruhi modulasi ENSO secara asimetris antara El Nino dan La Nina. Secara keseluruhan, penelitian ini menawarkan kontribusi signifikan dalam meningkatkan pemahaman terhadap modulasi ENSO ke curah hujan, dengan implikasi penting untuk pengelolaan pertanian dan sumber daya air. Pendekatan ini membuktikan bahwa analisis berbasis bootstrap ganda dan triwulan penuh dapat menjadi model baru untuk studi iklim di wilayah monsunal.

Berdasarkan temuan penelitian, disarankan agar prakirawan iklim menggunakan pendekatan bootstrap ganda dan triwulan penuh untuk memahami modulasi ENSO yang lebih tepat terhadap variabilitas curah hujan. Pendekatan ini dapat dilakukan ke seluruh wilayah sehingga akan menghasilkan wilayah prioritas ketika terjadi indikasi munculnya fase El Nino atau La Nina. Hasil berupa perhatian khusus untuk kabupaten seperti Madiun, Mojokerto, dan Tuban yang menunjukkan sensitivitas tinggi dapat diulang untuk provinsi lain maupun tingkat pemerintahan lainnya. Pendekatan bootstrap ganda dapat diadopsi oleh lembaga meteorologi klimatologi di kawasan Asia Tenggara dan Pasifik untuk meningkatkan akurasi prediksi curah hujan berbasis informasi ENSO dengan meminimalkan risiko salah positif. Hal ini dapat dilakukan sebagaimana ditunjukkan oleh keunggulannya dibandingkan metode bootstrap tunggal pada fase Netral saja. Untuk mendukung aplikasi praktis, data curah hujan dari 202 pos hujan utama dapat diintegrasikan dengan data satelit seperti CHIRPS, sebagaimana digunakan oleh Siswanto dkk. (2022), guna memperluas cakupan analisis spasial dan temporal. Penelitian lanjutan sebaiknya mengeksplorasi integrasi faktor iklim lain, seperti Madden-Julian Oscillation (MJO) dan Indian Ocean Dipole (IOD), yang telah diidentifikasi oleh Chen dkk. (2024) dan Kurniadi dkk. (2021) sebagai pemicu tambahan variabilitas curah hujan. Bootstrap ganda dan triwulan penuh dapat dilakukan untuk MJO maupun IOD. Selain itu, pengembangan model prediksi berbasis triwulan optimal dapat diuji pada wilayah lain di Indonesia untuk memverifikasi generalisasi pendekatan ini di konteks monsunal. Dengan demikian, pendekatan ini dapat menjadi dasar untuk pengembangan sistem peringatan dini yang lebih akurat dan responsif terhadap dinamika ENSO.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengungkapkan rasa terima kasih Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dan pihak-pihak yang membantu menyelesaikan tulisan ini baik secara langsung maupun tidak langsung. Semoga semangat kolaborasi akan bertambah tinggi melalui kelanjutan dari studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, O. (2020). Potential Analysis of Agricultural Sector in East Java with Klassen Typology Approach Method and LQ (Location Quotient) Year 2014-2017. *Equity: Jurnal Ekonomi*. <https://doi.org/10.33019/equity.v8i2.34>.
- Chen, Y., Teo, F.Y., Wong, S.Y., Chan, A., Weng, C. dan Falconer, R.A. (2024) Monsoonal Extreme Rainfall in Southeast Asia: A Review. *Water* 17, 5. <https://doi.org/10.3390/w17010005>
- Freedman, D. dan Diaconis, P., 1981. On the histogram as a density estimator:L 2 theory. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw Gebiete* 57, 453–476. <https://doi.org/10.1007/BF01025868>
- Haq, B.E.A., Ryan, M. Kurniawan, dan A., Rafi, A.M. (2021) An alternative index to NINO3.4 for predicting monthly rainfall anomaly in East Java, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. p. 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012005>
- Hermawan, E., Risyanto, R., Purwaningsih, A., Ratri, D.N., Ridho, A., Harjana, T., Andarini, D.F., Satyawardhana, H. dan Sujalu, A.P. (2025) Characteristics of Mesoscale Convective Systems and Their Impact on Heavy Rainfall in Indonesia’s New Capital City, Nusantara, in March 2022. *Adv. Atmos. Sci.* 42, 342–356. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-4102-1>
- Jin, J., Jian, D., Zhou, X., Chen, Q. dan Li, Y. (2025) Impact of El Nino–Southern Oscillation on Global Vegetation. *Atmosphere* 16, 701. <https://doi.org/10.3390/atmos16060701>
- Kurniadi, A., Weller, E., Min, S. dan Seong, M. (2021) Independent ENSO and IOD Impacts on Rainfall Extremes over Indonesia. *Intl Journal of Climatology* 41, 3640–3656. <https://doi.org/10.1002/joc.7040>
- Kurniadi, A., Weller, E., Salmond, J. dan Aldrian, E. (2024) Future projections of extreme rainfall events in Indonesia. *Intl Journal of Climatology* 44, 160–182. <https://doi.org/10.1002/joc.8321>
- Kurniawan, A., Makmur, E. dan Supari, S. (2021). Menentukan Metode Interpolasi Spasial Curah Hujan Bulanan Terbaik di Jawa Timur. *Seminar Nasional Geomatika*, 263. <https://doi.org/10.24895/sng.2020.0-0.1142>
- Lee, T.-H. dan Lo, M.-H. (2021) The Role of El Nino in Modulating the Effects of Deforestation in the Maritime Continent. *Environ. Res. Lett.* 16, 054056. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe88e>

- Li, G., Gao, C., Xu, B., Lu, B., Chen, H., Ma, H. dan Li, X. (2021) Strengthening influence of El Nino on the following spring precipitation over the Indo-China Peninsula. *Journal of Climate* 1–58. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0940.1>
- Lieber, R., Brown, J., King, A. dan Freund, M. (2024) Historical and Future Asymmetry of ENSO Teleconnections with Extremes. *Journal of Climate* 37, 5909–5924. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0619.1>
- Lv, A., Fan, L. dan Zhang, W. (2022) Impact of ENSO Events on Droughts in China. *Atmosphere* 13, 1764. <https://doi.org/10.3390/atmos13111764>
- Nugroho, B.D.A., Ardhitama, A., Arif, C., Wijayanti, S.I., Al Adilah, A.H., Hadi, I.P., Annisa, H.N. dan Sartohadi, J., (2024) The Effect of ENSO on Seasonal Rainfall Using the Monte-Carlo Bootstrap Method in the Southern Part of Java, Indonesia. *Ecol. Eng. Environ. Technol.* 25, 211–219. <https://doi.org/10.12912/27197050/181175>
- Nugroho, J.T., Nurfitriani, D., Suwarsono, Chulafak, G.A., Manalu, R.J. dan Harini, S. (2021) Rainfall Anomalies Assessment during Drought Episodes of 2015 In Indonesia using CHIRPS Data, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. p. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/739/1/012044>
- Phan-Van, T., Nguyen-Ngoc-Bich, P., Ngo-Duc, T., Vu-Minh, T., Le, P.V.V., Trinh-Tuan, L., Nguyen-Thi, T., Pham-Thanh, H. dan Tran-Quang, D. (2022) Drought over Southeast Asia and Its Association with Large-Scale Drivers. *Journal of Climate* 35, 4959–4978. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0770.1>
- R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Scott, D.W., 2010. Scott's rule. *WIREs Computational Stats* 2, 497–502. <https://doi.org/10.1002/wics.103>
- Setiawan, A.M., Koesmaryono, Y., Faqih, A. dan Gunawan, D. (2021) Application of Consecutive Dry Days (CDD) Multi-Model Ensemble (MME) Prediction to Support Agricultural Sector in South Sulawesi Rice Production Centers, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. p. 012081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012081>
- Siswanto, S., Wardani, K.K., Purbantoro, B., Rustanto, A., Zulkarnain, F., Anggraheni, E., Dewanti, R., Nurlambang, T. dan Dimyati, M. (2022) Satellite-Based Meteorological Drought Indicator to Support Food Security in Java Island. *PLoS ONE* 17, e0260982. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260982>
- Supari, Tangang, F., Salimun, E., Aldrian, E., Sopaheluwakan, A. dan Juneng, L. (2018) ENSO modulation of seasonal rainfall and extremes in Indonesia. *Clim Dyn* 51, 2559–2580. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4028-8>
- Tangang, F., Farzanmanesh, R., Mirzaei, A., Supari, Salimun, E., Jamaluddin, A.F. dan Juneng, L. (2017) Characteristics of precipitation extremes in Malaysia associated with El Nino and La Nina events. *Intl Journal of Climatology* 37, 696–716. <https://doi.org/10.1002/joc.5032>
- Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.* 106, 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Villafuerte, M.Q. dan Matsumoto, J. (2015) Significant Influences of Global Mean Temperature and ENSO on Extreme Rainfall in Southeast Asia. *Journal of Climate* 28, 1905–1919. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00531.1>
- You, Y., Liu, J., Zhang, Y., Beck, H.E., Gu, X. dan Kong, D. (2021) Impacts of El Nino –southern oscillation on global runoff: Characteristic signatures and potential mechanisms. *Hydrological Processes* 35, e14367. <https://doi.org/10.1002/hyp.14367>
- Zaki, M.K. dan Noda, K., (2022) A Systematic Review of Drought Indices in Tropical Southeast Asia. *Atmosphere* 13, 833. <https://doi.org/10.3390/atmos13050833>
- Zibrah, M.S.A. dan Sagita, N. (2023) Study of The Impact of Convectively Coupled Equatorial Kelvin and Rossby Waves on Rainfall Extremes in Sulawesi, Indonesia, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. p. 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1233/1/012029>