



INSOLOGI

Analisis Variabilitas Iklim dan Tren Produktivitas Kelapa Sawit pada Berbagai Zona di Indonesia

Salma Alya' Hanifah¹, Faustina Yuniastuti², Syalaysa Imani Fatihah³, Mutiarra Ridyo Arum⁴, Almira Hafizha Ramadini⁵

^{1*,2}Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Tunas Pembangunan, Surakarta, Indonesia

³Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Tunas Pembangunan, Surakarta, Indonesia

⁴Program Studi Pembangunan Ekonomi Kewilayahan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

⁵Pusat Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian, Kementerian Pertanian, Bogor, Indonesia

Email: ^{1*}salyaaa7@gmail.com, ²faustina.dragon@gmail.com, ³syalaysa41@gmail.com,

⁴mutiarra.ridyo.arum@ugm.ac.id, ⁵almira.hafizha@pertanian.go.id

Abstract

Climate change poses a significant challenge to the sustainability of palm oil production in Indonesia through changes in rainfall and temperature patterns. This study aims to analyze changes in climate variability and trends in palm oil productivity across various climate zones in Indonesia from 1990 to 2023. The study area encompasses palm oil-producing provinces, grouped into equatorial and monsoon zones based on the BMKG classification. Climate data, including minimum, maximum, and average temperatures, and rainfall, were obtained from NASA Power, while palm oil productivity data were obtained from the Agricultural Statistics Database. The analysis used the Mann-Kendall and Sen's Slope tests to identify the direction and magnitude of change trends, and the Mann-Whitney test to compare climate variability across observation periods. The results show an increasing trend in rainfall and temperature across the study area, indicating wetting and warming phenomena. The equatorial zone has more stable agroclimatic conditions and higher productivity than the monsoon zone. Conversely, the monsoon region experiences thermal stress and higher rainfall fluctuations, potentially reducing productivity. These findings demonstrate the importance of climate adaptation strategies based on agroclimatic zone characteristics to maintain the sustainability of palm oil production in Indonesia.

Keywords: *Climate Variability, Oil Palm, Productivity, Agroclimatic Zones, Climate Change.*

Abstrak

Perubahan iklim menjadi tantangan penting bagi keberlanjutan produksi kelapa sawit di Indonesia melalui perubahan pola curah hujan dan suhu udara. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan variabilitas iklim dan tren produktivitas kelapa sawit pada berbagai zona iklim di Indonesia selama periode 1990–2023. Wilayah penelitian mencakup provinsi sentra kelapa sawit yang dikelompokkan ke dalam zona ekuatorial dan musunial berdasarkan klasifikasi BMKG. Data iklim berupa suhu minimum, suhu maksimum, suhu rata-rata, dan curah hujan diperoleh dari NASA Power, sedangkan data produktivitas kelapa sawit diperoleh dari Basis Data Statistik Pertanian. Analisis dilakukan menggunakan uji Mann-Kendall dan Sen's Slope untuk mengidentifikasi arah serta besaran tren perubahan, dan uji Mann-Whitney untuk membandingkan variabilitas iklim antar periode pengamatan. Hasil penelitian menunjukkan adanya tren peningkatan curah hujan dan suhu di seluruh wilayah penelitian yang mengindikasikan fenomena pembasahan dan pemanasan. Zona ekuatorial memiliki kondisi agroklimat yang lebih stabil dan produktivitas lebih tinggi dibandingkan zona musunial. Sebaliknya, wilayah musunial mengalami tekanan termal dan fluktuasi curah hujan yang lebih tinggi, yang berpotensi menurunkan produktivitas. Temuan ini menunjukkan pentingnya strategi adaptasi iklim berbasis karakteristik zona agroklimat untuk menjaga keberlanjutan produksi kelapa sawit di Indonesia.

Kata Kunci: Variabilitas Iklim, Kelapa Sawit, Produktivitas, Zona Agroklimat, Perubahan Iklim.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan komoditas kelapa sawit sebagai komoditas unggul Indonesia mulai mengalami percepatan sejak tahun 1980-an (Haryana et al., 2010). Pada periode tersebut, pemerintah melakukan pelonggaran regulasi yang sebelumnya membatasi pengelolaan perkebunan hanya pada Perkebunan Besar Negara (PNB), sehingga membuka peluang bagi Perkebunan Besar Swasta (PBS) dan Perkebunan Rakyat (PR) untuk berpartisipasi dalam pengembangan industri kelapa sawit. Hal tersebut terbukti dari data 2021 bahwa luas perkebunan kelapa sawit mencapai 16,83 juta hektar, dengan penguasaan terbesar dikelola oleh Perkebunan Besar Swasta (PBS) (Suanti & Rhendy, 2024).

Seiring dengan perluasan areal tersebut, selama tiga dekade terakhir Indonesia berkembang menjadi produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia. Laporan yang disampaikan FAO (2024) menunjukkan bahwa sekitar 58% kebutuhan minyak sawit dunia dipenuhi oleh produksi dari Indonesia. Selain itu, sekitar 50,48% luas areal kelapa sawit dunia berada di Indonesia. Pesatnya peningkatan luas lahan serta meluasnya pengelola perkebunan menjadikan komoditas kelapa sawit sebagai sektor strategis yang memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian nasional. Hal ini terbukti dari tingginya nilai ekspor CPO yang mencapai USD 23 miliar (Reily & Ekarina, 2018). Selain itu, industri kelapa sawit juga menjadi sumber penghidupan bagi 2 juta petani kecil, serta menyediakan sumber lapangan pekerjaan bagi 7,8 juta tenaga kerja di sektor industri kelapa sawit (Tim Riset PASPI, 2018). Sehingga perkembangan industri kelapa sawit tidak hanya berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi, namun juga berperan dalam menurunkan angka kemiskinan dan meningkatkan distribusi pendapatan masyarakat secara luas (Rifin et al., 2020).

Meskipun demikian, upaya pemerintah Indonesia dalam mengembangkan komoditas kelapa sawit melalui berbagai regulasi yang memfasilitasi perluasan lahan dan peningkatan produktivitas secara simultan masih menghadapi beberapa tantangan (Marhaento et al., 2023). Apabila membandingkan data historis terkait perkembangan luas areal (TM: tanaman menghasilkan) dengan produktivitas tanaman, terlihat bahwa pertumbuhan keduanya tidak berjalan secara paralel. Pada periode 1995 – 2024 pertumbuhan tanaman menghasilkan (TM) naik sebesar 8,61% sementara produktivitas tanaman hanya naik 0,44%.

Perubahan iklim menjadi salah satu tantangan utama bagi sektor pertanian, yang ditandai dengan perubahan pola iklim yang semakin dinamis dan tidak menentu, sehingga memicu peningkatan cuaca ekstrem, kenaikan suhu serta peningkatan muka air laut (Arum et al., 2023; Surmaini et al., 2015). Selain itu terjadinya anomali iklim yang ditandai dengan fenomena ENSO (El Nino Southern Oscillation) yang semakin sering terjadi menjadi ancaman yang serius bagi sektor pertanian. Anomali ENSO muncul melalui fase El Nino yang ditandai dengan penurunan curah hujan dan kekeringan, serta La Nina yang menyebabkan kenaikan curah hujan. Dampak dari perubahan iklim menyebabkan kerugian ekonomi Callahan & Mankin (2023) dan mendorong kenaikan harga komoditas (Cai & Sakemoto, 2022).

Berdasarkan perkembangan produksi kelapa sawit dunia (TBS: tandan buah segar) pada periode 1980 – 2022, tercatat adanya penurunan pada tahun 1998 dan 2007. Penurunan tersebut berkaitan dengan pengaruh anomali iklim, khususnya fenomena La Nina kuat, yang menyebabkan peningkatan curah hujan secara signifikan dan penurunan produksi kelapa sawit dunia. Selain itu, anomali iklim El Nino juga memberikan dampak terhadap kinerja sektor perkebunan kelapa sawit. Pada tahun 2023, fenomena El-Nino menyebabkan penurunan nilai tambah sektor perkebunan di Indonesia sebesar -1,52%.

Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim (Go et al., 2024). Kerentanan ini ditunjukkan dengan meningkatnya risiko serangan hama dan penyakit baru akibat perubahan kondisi lingkungan (Murphy et al., 2021), penurunan produktivitas hingga sepertiga lebih rendah dari potensi aktualnya (Woittiez et al., 2017), serta potensi kerugian ekonomi akibat fluktuasi curah hujan yang tidak menentu (Oettli et al., 2018).

Perkebunan kelapa sawit di Indonesia tersebar luas meliputi wilayah Sumatera, Kalimantan, sebagian Sulawesi, dan Papua (Suanti & Rhendy, 2024). Mengingat kondisi geografis Indonesia yang sangat beragam, BMKG membagi wilayah Indonesia ke dalam tiga zona iklim utama berdasarkan pola curah hujan, yakni zona Monsun, Ekuatorial, dan Lokal (BMKG, 2023). Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh perubahan iklim terhadap produktivitas kelapa sawit, namun kajian komparatif lintas zona iklim pada skala makro di Indonesia masih sangat terbatas. Di sisi lain, meskipun BMKG menyediakan data variabilitas iklim yang terperinci, ketersediaan stasiun pengamatan yang tidak merata terutama di daerah terpencil menimbulkan kesenjangan spasial yang signifikan dalam cakupan data (Abubakar & Idi, 2024). Dalam mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini memanfaatkan data iklim berbasis penginderaan jauh dari NASA *Prediction of Worldwide Energy Resources* (NASA POWER), yang menawarkan cakupan spasial menyeluruh dengan kontinuitas data jangka panjang pada lokasi-lokasi spesifik di seluruh wilayah Indonesia. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan variabilitas iklim dan produktivitas kelapa sawit pada berbagai zona iklim. Variabel iklim yang digunakan dalam penelitian ini meliputi suhu minimum, suhu rata-rata, suhu maksimum dan curah hujan.

1.2 Tinjauan Pustaka

1.2.1 Karakteristik Zona Iklim dan Dinamika Perubahan Iklim di Indonesia

Pengelompokan zona iklim di Indonesia didasarkan dari perbedaan karakteristik pola curah hujan yang disebabkan oleh kondisi geografis dan pengaruh angin monsun. Namun, saat ini perubahan iklim telah menjadi isu global yang berdampak signifikan terhadap sektor pertanian, di mana Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar dunia sangat bergantung pada kondisi iklim yang stabil. Fenomena ini ditandai dengan perubahan variabilitas iklim alami akibat aktivitas manusia yang mengubah komposisi atmosfer global, yang memicu kenaikan suhu serta frekuensi cuaca ekstrem (Change, 2007). Bagi kelapa sawit, peningkatan suhu di atas 30°C dapat mengurangi laju fotosintesis dan meningkatkan tekanan evaporasi pada tanaman (Paterson et al., 2017). Tantangan ini semakin kompleks dengan adanya anomali iklim seperti El Niño Southern Oscillation (ENSO). Fase El Niño memicu kekeringan ekstrim yang dapat menurunkan hasil panen secara drastis, sementara fase La Niña menyebabkan curah hujan berlebih yang berisiko menimbulkan banjir dan merusak tanaman (Varghese et al., 2024).

Secara fisiologis, kelapa sawit sangat responsif terhadap fluktuasi curah hujan karena memiliki sistem perakaran serabut yang dangkal. Ketika menghadapi cekaman kekeringan, tanaman akan merespons dengan melakukan penutupan stomata guna mengurangi kehilangan air, namun proses ini berdampak pada penurunan produktivitas hingga sepertiga lebih rendah dari potensi aktualnya. Dampak variabilitas iklim ini juga sering kali menunjukkan efek tunda (*time-lag*) karena fluktuasi curah hujan selama musim tanam sangat mempengaruhi proses pembentukan bunga dan buah sawit (Woittiez et al., 2017). Kondisi lingkungan yang tidak menentu ini pun diperburuk dengan meningkatnya risiko serangan hama dan penyakit baru, yang secara kolektif mengancam resiliensi perkebunan kelapa sawit (Murphy et al., 2021).

Luasnya wilayah Indonesia menyebabkan perbedaan distribusi curah hujan yang terbagi ke dalam tiga zona iklim utama, yaitu Monsun, Ekuatorial, dan Lokal (BMKG, 2024). Zona Ekuatorial dicirikan oleh distribusi hujan yang relatif merata sepanjang tahun, sehingga diindikasikan lebih tahan terhadap variasi curah hujan akibat fenomena ENSO dibandingkan zona lainnya (Santoso et al., 2022). Sebaliknya, pada zona monsun, periode musim kemarau yang lebih panjang saat El Niño berpotensi menghambat pertumbuhan tanaman akibat kekurangan air yang signifikan. Sementara itu, zona lokal memiliki pola curah hujan yang sangat dipengaruhi oleh topografi setempat (Paterson & Lima, 2018).

1.2.2 Kondisi Agronomis Kelapa Sawit

Tanaman kelapa sawit memerlukan kondisi agroklimat yang spesifik untuk mencapai pertumbuhan dan produktivitas yang optimal, terutama curah hujan tahunan antara 1.700-3.000 mm yang terdistribusi merata sepanjang tahun tanpa periode kering yang signifikan atau tanpa bulan kering (Hijri Darlan et al., 2016; Siregar et al., 1997). Sistem perakaran kelapa sawit yang berupa akar serabut dan relatif dangkal menyebabkan tanaman ini sangat bergantung pada ketersediaan air di lapisan tanah atas, sehingga rentan terhadap perubahan kondisi kelembaban tanah (Febrianto *et al.*, 2019). Suhu lingkungan ideal yang mendukung pembentukan tandan buah segar (TBS) berkisar antara 24-28°C, di mana ketersediaan air tanah yang stabil menjadi faktor pembatas utama bagi metabolisme tanaman. Periode kering lebih dari 2 bulan dalam 1 tahun dapat mengganggu penyerapan hara dan secara bertahap menurunkan potensi hasil produksi. Sebagai mekanisme perlindungan terhadap cekaman air, kelapa sawit merespons dengan melakukan penutupan stomata guna mengurangi kehilangan air melalui transpirasi, meskipun hal ini juga menghambat penyerapan karbon dioksida untuk fotosintesis (Corley & Tinker, 2015; Satria et al., 2025).

Secara morfologis, cekaman kekeringan ditandai dengan munculnya daun tombak yang tidak membuka secara normal dan fenomena patahnya pelepah atau “sengkleh” karena hilangnya tekanan turgor pada jaringan tanaman. Dampak yang lebih kritis terjadi pada siklus reproduksi yaitu kekeringan meningkatkan angka aborsi bunga dan menggeser diferensiasi seks bunga menjadi lebih dominan jantan, sehingga jumlah bunga betina yang terbentuk berkurang drastis (Evizal et al., 2020). Efek negatif ini tidak langsung terlihat pada saat kekeringan berlangsung, melainkan melalui masa jeda atau *lag period* selama 7 hingga 24 bulan sebelum akhirnya terjadi penurunan produksi TBS secara nyata di lapangan (Legros et al., 2009).

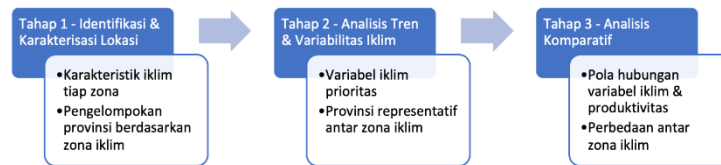
Estimasi penurunan produktivitas akibat defisit air untuk wilayah Asia Tenggara berkisar antara 10-3%, namun pada stadium kekeringan yang sangat parah (defisit >500 mm/tahun), kehilangan hasil bisa mencapai angka 54-65% (Litbang, 2011; Satria et al., 2025). Tanaman muda pada rentang umur 3-5 tahun sangat rentan terhadap cekaman ini. Penerapan strategi pengelolaan agronomi seperti pemanfaatan mulsa organik, pembangunan rorak, dan sistem irigasi yang tepat menjadi krusial untuk mempertahankan keberlanjutan produksi di era perubahan iklim (Satibi et al., 2019).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui tiga tahap analisis yang saling berkaitan (Gambar 1). Pada tahap pertama, dilakukan identifikasi dan karakterisasi lokasi penelitian berdasarkan klasifikasi zona iklim menurut BMKG, serta wilayah penghasil kelapa sawit berdasarkan BDSP. Selanjutnya pada tahap kedua dilakukan analisis tren dari variabel iklim dan

produktivitas untuk mengidentifikasi variabel iklim yang secara signifikan mengalami perubahan, serta menentukan provinsi yang representatif dari setiap zona iklim berdasarkan pola perubahan tersebut. Pada tahap ketiga dilakukan analisis komparatif untuk mendapatkan pola hubungan dari perubahan variabel iklim dan produktivitas kelapa sawit pada antar zona iklim.



Gambar 1 Tahapan analisis penelitian

2.2 Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian ini membagi lokasi penelitian pada level provinsi penghasil kelapa sawit ke dalam tiga zona iklim yaitu Monsun, Ekuatorial, dan Lokal yang didasarkan dari pola curah hujan (BMKG, 2026). Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data sekunder dengan rentang waktu pengamatan dari tahun 1990 – 2023 yang dibagi menjadi dua yaitu periode 1990 – 2006 dan 2007 – 2023. Data variabel iklim yang meliputi data suhu minimum, suhu maksimum, suhu rata-rata dan curah hujan yang diperoleh dari NASA Power dengan menggunakan spesifik lokasi (*single point*) masing-masing wilayah pengamatan. Keutamaan dari penggunaan data NASA Power yaitu terletak pada kontinuitas temporal yang panjang, bebas dari missing data stasiun, serta kemampuannya mencakup titik koordinat spesifik pada setiap lokasi yang dikaji (Ngurah et al., 2022). Selanjutnya data variabel produktivitas kelapa sawit dikumpulkan dari Basis Data Statistik Pertanian, Kementerian Pertanian. Adapun detail informasi data diperoleh ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Jenis dan sumber data penelitian

Jenis Data	Sumber Data
Suhu minimum	NASA Power https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/
Suhu maksimum	
Suhu rata – rata	
Curah hujan	
Produktivitas kelapa sawit	Basis Data Statistik Pertanian, Kementerian Pertanian https://bdsp2.pertanian.go.id/bdsp/id/komoditas
Zona iklim	BMKG https://iklim.bmkg.go.id/id/i-tmy/

2.3 Metode Statistik

Penelitian ini menggunakan uji statistik *Mann-Kendall* untuk mendeteksi tren perubahan variabel iklim dan produktivitas kelapa sawit pada tahun pengamatan (1990 – 2023). Nilai koefisien Kendall's τ yang positif mengindikasikan tren peningkatan, sedangkan nilai negatif mengindikasikan tren penurunan. Selanjutnya dilakukan estimasi besaran perubahan dengan menggunakan analisis *Sen's Slope*. Selain itu uji *Mann-Whitney* digunakan untuk menguji perbedaan distribusi variabel iklim antar dua sub-periode pengamatan pada skala bulanan (1990 – 2006) dan (2007 – 2023). Pada tahap akhir, digunakan analisis deskriptif dengan menggunakan metode grafis. Pendekatan ini bertujuan memvisualisasi pola hubungan serta memperjelas perbedaan karakteristik antar zona iklim.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Distribusi Wilayah Penghasil Kelapa Sawit Berdasarkan Zona Iklim

Dalam penelitian ini, analisis perubahan variabilitas iklim dan produksi kelapa sawit didasarkan dari pengelompokan wilayah sentra penghasil kelapa sawit pada level provinsi ke dalam zona iklim yang berbeda. Menurut BMKG zona iklim dibagi menjadi tiga yaitu monsun, ekuatorial, dan lokal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyebaran wilayah penghasil kelapa sawit di Indonesia terkonsentrasi berada di zona iklim ekuatorial dan monsun, sedangkan untuk zona iklim lokal tidak teridentifikasi sebagai wilayah sentra penghasil kelapa sawit. Rincian lebih lanjut mengenai pembagian wilayah produksi kelapa sawit berdasarkan zona iklim disajikan pada Tabel 2.

Dominasi wilayah sentra kelapa sawit pada zona iklim ekuatorial dapat dijelaskan oleh karakteristik iklim yang relatif stabil sepanjang tahun, dengan distribusi curah hujan yang merata dan suhu optimal bagi pertumbuhan kelapa sawit. Kelapa sawit membutuhkan suhu optimal pertumbuhan adalah 24-28°C, meskipun kelapa sawit dapat beradaptasi pada suhu 15-33°C. Curah hujan optimal adalah 2.000-2.500 mm per tahun, namun tanaman ini juga dapat tumbuh baik pada 1.100-5.000 mm per tahun (Satria et al., 2025). Ketersediaan air tanah yang stabil di wilayah ekuatorial menjadi faktor krusial karena sistem perakaran kelapa sawit yang berupa akar serabut dan relatif dangkal sangat tergantung pada ketersediaan air di lapisan tanah atas (Febrianto et al., 2019). Hal ini terkonfirmasi dari hasil analisis deskriptif yang menunjukkan curah hujan tahunan wilayah di zona ekuatorial lebih tinggi (2890.72 mm/tahun) dibandingkan zona iklim monsun (2488.69 mm/tahun). Kondisi ini erat dikaitkan dengan pengaruh *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ) yang berperan dalam mendatangkan uap air secara konsisten ke wilayah ekuatorial sepanjang tahun (McGee et al., 2014).

Selanjutnya, zona monsun juga menunjukkan kontribusi signifikan sebagai wilayah sentra produksi kelapa sawit, meskipun memiliki pola curah hujan yang lebih fluktuatif akibat adanya periode kering dan basah yang dipengaruhi oleh angin monsun. Memperhatikan kondisi suhu, di zona monsun menunjukkan karakteristik yang lebih ekstrim dibandingkan zona ekuatorial. Rerata suhu maksimal di zona monsun (30.60 °C) secara signifikan lebih tinggi dibandingkan zona ekuatorial (29.39 °C). Secara fisiologis, peningkatan suhu di atas ambang batas optimal dapat memicu mekanisme perlindungan berupa penutupan stomata guna mengurangi kehilangan air melalui transpirasi, namun beresiko menghambat penyerapan karbondioksida (Corley & Tinker, 2003; Schönbeck et al., 2022).

Tabel 2 Pengelompokan Zona Iklim Dan Provinsi Sentra Kelapa Sawit Di Indonesia (1990 – 2023)

Zona Iklim	Provinsi Sentra Kelapa Sawit	Produktivitas (kg/ha)	Rerata Curah Hujan (mm/tahun)	Suhu Maksimum (°C)	Suhu Minimum (°C)	Suhu Rata-rata (°C)
Ekuatorial	Riau, Aceh, Kalimantan Barat, Sumatera Utara, Kalimantan Timur, Sumatera Selatan, Jambi, Sumatera Barat, dan Bengkulu	3145.712	2890.72	29.39	20.79	24.56
Monsunal	Kalimantan Selatan, Lampung, Sulawesi Selatan	2896.353	2488.69	30.60	20.07	24.54
Lokal	-	-	-	-	-	-

Sumber: BDSP, NASA Power (2026), data diolah

Selain itu, fluktuasi harian yang tajam dapat meningkatkan laju evapotranspirasi dan risiko stres pada tanaman kelapa sawit. Kondisi stres yang berkepanjangan pada wilayah monsunal ini dapat mengganggu penyerapan hara dan meningkatkan angka aborsi bunga betina, yang secara bertahap menurunkan potensi hasil produksi (Evizal et al., 2020). Keadaan ini ditunjukkan dengan nilai produktivitas di wilayah zona monsunal lebih rendah dibandingkan wilayah ekuatorial. Fenomena penurunan produktivitas akibat cekaman iklim pada kelapa sawit tidak terjadi secara instan, melainkan menunjukkan efek tunda (*time-lag*) universal berkisar antara 10–24 bulan. Secara teknis, jika terjadi penurunan curah hujan atau peningkatan defisit air pada tahun berjalan, dampak penurunan produktivitas TBS akan muncul dalam dua gelombang waktu yang berbeda. Gelombang pertama muncul pada 18–24 bulan setelah cekaman, yang merepresentasikan fase diferensiasi seks (*sex differentiation*) pada meristem apikal tajuk. Keterbatasan fotoasimilat memicu bias hormonal Hal ini meningkatkan rasio inisiasi bunga jantan (*male inflorescence*) dan menghentikan perkembangan primordia bunga betina (Corley & Tinker, 2015). Gelombang kedua muncul pada 10–12 bulan setelah cekaman, yang bertepatan dengan fase kritis perkembangan fisik bunga (*inflorescence development*) sesaat sebelum seludang (*spathe*) membuka. Cekaman lingkungan pada fase ini memicu aborsi massal pada bunga betina yang telah terbentuk akibat ketidakmampuan tanaman menyuplai energi (*carbon starvation*) (Legros et al., 2009; Woittiez et al., 2017).

3.2 Perubahan Variabilitas Iklim dan Produktivitas Kelapa Sawit

Dalam melihat perubahan variabilitas iklim dilakukan analisis tren dengan uji *Mann-Kendal* dan *Sen's Slope* untuk melihat arah dan besaran perubahan dari variabel penelitian selama periode pengamatan 1990 – 2023. Berdasarkan Tabel 3, seluruh provinsi di Zona Ekuatorial dan Monsunial menunjukkan tren curah hujan yang meningkat secara signifikan dari periode 1990 – 2023. Pada zona ekuatorial, Provinsi Bengkulu dan Kalimantan Barat tercatat memiliki laju peningkatan curah hujan tertinggi dengan nilai *Sen's Slope* masing-masing sebesar 47,75 mm/tahun dan 45,00 mm/tahun. Apabila diakumulasikan dalam satu dekade, wilayah ini mengalami peningkatan curah hujan sebesar 450–477 mm. Peningkatan ketersediaan air ini secara teoritis memberikan keuntungan bagi kelapa sawit dalam memitigasi defisit air, terutama pada fase kritis diferensiasi bunga (Sukarman et al., 2021), dimana pada fase ini kelapa sawit sangat bergantung pada ketersediaan air di lapisan tanah atas untuk menjaga tekanan turgor jaringan guna mencegah fenomena patah pelepah atau "sengkleh" (Evizal et al., 2020; Gupta & Mishra, 2019).

Tabel 3 Hasil Analisis Tren Mann-Kendall Variabilitas Iklim Tahunan (1990 – 2023)

No	Provinsi	Curah Hujan (mm/tahun)		Suhu Maksimum (°C)		Suhu Minimum (°C)		Suhu Rata-rata (°C)	
		Kendall's	Sen's Slope	Kendall's	Sen's Slope	Kendall's	Sen's Slope	Kendall's	Sen's Slope
Zona Ekuatorial									
1	Riau	0.3533**	25.1176	0.3148**	0.0123	0.4212**	0.0124	0.4234**	0.0099
2	Sumatera Utara	0.2335*	17.875	0.1344 ^{ns}	0.0044	0.0687 ^{ns}	0.0014	0.3019*	0.0099
3	Kalimantan Barat	0.4496***	45.000	0.3298**	0.0115	0.4603**	0.0191	0.6015**	0.0127
4	Jambi	0.5294***	35.9166	0.2997*	0.0130	0.1810 ^{ns}	0.0073	0.3831**	0.0113
5	Aceh	0.2533**	18.3888	0.2895*	0.0122	0.0576 ^{ns}	0.0023	0.2268*	0.0064
6	Kalimantan Timur	0.3298***	21.0833	0.0322 ^{ns}	0.0018	0.4807**	0.0207	0.1628 ^{ns}	0.0037

7	Sumatera Selatan	0.2533**	21.0909	0.149 ^{ns}	0.0092	0.3853* **	0.0222	0.4355* **	0.0137
8	Bengkulu	0.3832***	47.7500	- 0.0107 ^{ns}	-0.0007	0.2696* *	0.0100	0.2547* *	0.0096
9	Sumatera Barat	0.2692**	27.8181	0.4032* **	0.0138	0.246**	0.0073	0.3265* **	0.0095
Zona Monsunal									
1	Kalimantan Selatan	0.3191***	24.913	0.1091 ^{ns}	0.0106	0.3604* **	0.0248	0.3085* *	0.0119
2	Lampung	0.3191***	16.2857	0.0018 ^{ns}	0.0000	0.2574* *	0.0105	0.0699 ^{ns}	0.0042
3	Sulawesi Selatan	0.3023 ^{ns}	12.3333	0.3023* *	0.0200	0.1891 ^{ns}	0.0119	0.5098* **	0.0149

Sumber: NASA Power (2026), data diolah

Keterangan: *, **, ***) signifikan di 90%, 95% and 99%; ns = tidak signifikan

Selanjutnya pada variabel suhu terjadi peningkatan yang konsisten, dimana hal ini mengindikasikan terjadinya pemanasan lokal di sentra perkebunan kelapa sawit. Provinsi Kalimantan Barat dan Sumatera Selatan menunjukkan laju pemanasan sebesar 0,12°C–0,13°C per dekade. Dari kedua provinsi ini terjadi tren pemanasan siang hari (suhu maksimum) paling ekstrim di Sulawesi Selatan (Zona Monsunal) dengan laju 0,02°C per tahun atau 0,2°C per dekade. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah monsunial mengalami tekanan termal siang hari yang lebih progresif dibanding wilayah ekuatorial. Secara fisiologis, peningkatan suhu di atas ambang optimal (24-28°C) dapat mengganggu fungsi fotosistem II dan memicu penurunan signifikan kadar klorofil, yang secara bertahap menurunkan potensi hasil produksi (Azzeme et al., 2016; Satria et al., 2025). Fenomena *night-time warming* Suhu Minimum (Malam Hari) terlihat sangat kuat di Kalimantan Selatan (0,24°C/dekade) dan Sumatera Selatan (0,22°C/dekade). Kenaikan suhu malam hari yang lebih tinggi dibandingkan suhu siang hari (seperti di Sumatera Selatan) menunjukkan penyempitan rentang suhu harian (*Diurnal Temperature Range*), yang secara fisiologis dapat memicu peningkatan laju respirasi tanaman pada malam hari (Pimentel, 2022). Selain itu, peningkatan suhu udara ini juga meningkatkan defisit tekanan uap air (VPD) yang memicu penutupan stomata tanaman sebagai mekanisme perlindungan terhadap cekaman air, meskipun hal tersebut menghambat penyerapan karbondioksida untuk fotosintesis (Corley & Tinker, 2003; Schönbeck et al., 2022).

Laju pemanasan yang ditemukan dalam penelitian ini, yakni berkisar antara 0,1°C hingga 0,2°C per dekade, sejalan dengan laporan IPCC mengenai tren pemanasan global di wilayah tropis. Namun, pada skala lokal intensitas kenaikan suhu ini juga dipengaruhi oleh masifnya perubahan tutupan lahan menjadi perkebunan kelapa sawit (Fawzi & Iswari, 2020; IPCC, 2022). Konversi lahan hutan menjadi area monokultur terbuka di masa awal tanam cenderung meningkatkan albedo dan suhu permukaan, yang memperkuat efek pemanasan antropogenik di wilayah tersebut (Maillard et al., 2023).

Dalam mengidentifikasi waktu terjadinya pergeseran iklim yang paling signifikan, dilakukan uji Mann-Whitney pada skala bulanan antara periode I (1990–2006) dan periode II (2007–2023). Dinamika pembasahan (curah hujan) secara spasial, Provinsi Kalimantan Barat dan Jambi menunjukkan konsistensi pembasahan yang paling masif, di mana hampir seluruh bulan (kecuali September dan Januari) mengalami peningkatan curah hujan yang signifikan secara statistik. Pada Zona Monsunal, Provinsi Lampung dan Kalimantan Selatan mengalami peningkatan curah hujan yang signifikan pada periode transisi menuju musim kemarau (April dan Juni), dimana ini mengindikasikan adanya perpendekan durasi bulan kering secara efektif pada periode terbaru. Sebaliknya, Provinsi Sulawesi Selatan menunjukkan anomali dengan adanya penurunan curah hujan yang

signifikan pada bulan Januari ($Z = 2,566$), mempertegas tingginya variabilitas iklim di wilayah monsunal timur.

Tren pemanasan suhu udara (*tas*) ditemukan jauh lebih konsisten dibandingkan curah hujan. Sebagian besar provinsi di kedua zona menunjukkan nilai Z negatif yang signifikan pada periode Mei hingga November. Provinsi Riau dan Jambi menunjukkan pola pemanasan yang sangat kuat dari pertengahan hingga akhir tahun, dengan tingkat signifikansi tertinggi ($P < 0,01$) pada bulan Juli hingga September. Provinsi Sulawesi Selatan mengalami pemanasan yang persisten dari Maret hingga Agustus. Nilai Z mencapai $-3,118$ pada bulan Mei, mengonfirmasi bahwa puncak pemanasan di wilayah monsunal terjadi tepat sebelum memasuki puncak musim kemarau. Konsistensi pemanasan pada semester kedua tahunan (Mei–November) bertepatan dengan periode dimana radiasi matahari mencapai puncaknya. Peningkatan suhu pada periode ini meningkatkan defisit tekanan uap air (*Vapor Pressure Deficit/VPD*), yang jika melampaui ambang batas optimal, akan memicu penutupan stomata pada tanaman kelapa sawit meskipun ketersediaan air tanah mencukupi (Pradiko et al., 2017; Schönbeck et al., 2022).

Tabel 4 Hasil Analisis Uji Perbandingan *Man Whitney*

Provinsi		JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DES
Riau	ch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	tas	0.861 _{ns}	0.741 _{ns}	0.878 ⁿ _s	0.672 ⁿ _s	0.258 ⁿ _s	1.912 [*]	0.982 ⁿ _s	1.516 ⁿ _s	1.602 ⁿ _s	0.586 _{ns}	2.411 [*]	0.276 _{ns}
Sumatera Utara	ch	2.032 _{**}	0.241 _{ns}	-	0.121 ⁿ _s	-	0.947 ⁿ _s	0.551 ⁿ _s	0.224 ⁿ _s	1.154 ⁿ _s	0.568 _{ns}	0.362 ⁿ _s	1.774 _*
	tas	0.448 _{ns}	0.948 _{ns}	0.482 ⁿ _s	0.224 ⁿ _s	1.619 ⁿ _s	1.102 ⁿ _s	2.051 [*]	2.946 [*] _{**}	1.327 ⁿ _s	0.965 _{ns}	0.069 ⁿ _s	1.361 _{ns}
Kalimantan Barat	ch	0.310 _{ns}	2.532 _{**}	3.170 [*] _{**}	-	2.618 [*] _{**}	2.446 [*] _*	-	2.412 [*] _*	1.016 ⁿ _s	2.291 _{**}	3.531 [*] _{**}	1.877 _*
	tas	1.827 _*	1.500 _{ns}	0.172 ⁿ _s	0.689 ⁿ _s	1.551 ⁿ _s	1.447 ⁿ _s	2.447 [*] _*	2.653 [*] _{**}	2.980 [*] _{**}	2.223 _{**}	2.102 [*] _*	0.174 _{ns}
Jambi	ch	1.275 _{ns}	1.257 _{ns}	2.274 [*] _*	3.083 [*] _{**}	2.480 [*] _*	-	1.998 [*] _*	-	1.275 ⁿ _s	1.774 _*	2.360 [*] _*	1.533 _{ns}
	tas	1.016 _{ns}	1.293 _{ns}	0.517 ⁿ _s	0.517 ⁿ _s	2.102 [*] _*	2.532 [*] _*	2.653 [*] _{**}	2.430 [*] _*	2.655 [*] _{**}	1.826 _*	0.0355 _{**}	1.757 _*
Aceh	ch	1.085 _{ns}	0.706 _{ns}	0.499 ⁿ _s	0.878 ⁿ _s	0.396 ⁿ _s	1.068 ⁿ _s	0.052 ⁿ _s	-	2.153 [*] _*	1.688 [*] _*	0.655 _{ns}	0.758 ⁿ _s
	tas	0.207 _{ns}	0.810 _{ns}	0.155 ⁿ _s	0.138 ⁿ _s	1.568 ⁿ _s	0.483 ⁿ _s	0.947 ⁿ _s	-	1.705 [*] _*	1.051 ⁿ _s	0.499 _{ns}	0.758 ⁿ _s
Kalimantan Timur	ch	0.861 _{ns}	0.362 _{ns}	0.431 ⁿ _s	2.756 [*] _{**}	0.344 ⁿ _s	1.326 ⁿ _s	3.462 [*] _{**}	1.257 ⁿ _s	0.775 ⁿ _s	0.982 _{ns}	0.930 ⁿ _s	1.172 _{ns}
	tas	1.189 _{ns}	0.620 _{ns}	1.171 ⁿ _s	0.620 ⁿ _s	1.395 ⁿ _s	1.275 ⁿ _s	0.345 ⁿ _s	2.206 [*] _*	1.326 ⁿ _s	0.190 _{ns}	0.241 ⁿ _s	0.034 _{ns}
Sumatera Selatan	ch	0.930 _{ns}	0.138 _{ns}	1.481 ⁿ _s	3.531 [*] _{**}	1.016 ⁿ _s	-	0.517 ⁿ _s	0.827 ⁿ _s	0.431 ⁿ _s	0.138 _{ns}	1.447 ⁿ _s	0.207 _{ns}
	tas	1.361 _{ns}	1.654 _*	1.292 ⁿ _s	0.879 ⁿ _s	1.860 [*] _*	2.482 [*] _*	2.190 [*] _*	2.516 [*] _*	2.258 [*] _*	2.103 _{**}	1.619 ⁿ _s	1.929 _*
Bengkulu	ch	1.947 _*	0.327 _{ns}	-	3.686 [*] _{**}	1.498 ⁿ _s	3.325 [*] _{**}	0.241 ⁿ _s	-	0.844 ⁿ _s	0.155 _{ns}	2.738 [*] _{**}	0.155 _{ns}
	tas	1.102 _{ns}	1.860 _*	0.896 ⁿ _s	0.844 ⁿ _s	2.429 [*] _*	2.205 [*] _*	2.481 [*] _*	-	1.774 [*] _*	1.843 [*] _*	0.138 _{ns}	0.121 ⁿ _s
Sumatera Barat	ch	0.431 _{ns}	2.205 _{**}	2.980 [*] _{**}	1.223 ⁿ _s	1.016 ⁿ _s	2.016 [*] _*	0.121 ⁿ _s	-	0.878 ⁿ _s	1.240 ⁿ _s	0.448 _{ns}	0.052 _{ns}

	tas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		0.672 _{ns}	1.016 _{ns}	0.551 ⁿ _s	0.413 ⁿ _s	2.534 [*] _s	1.378 ⁿ _s	2.532 [*] _s	3.067 [*] _{**}	1.086 ⁿ _s	1.292 _{ns}	0.207 ⁿ _s	1.671 _*
Kalimantan Selatan	ch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0.138 _{ns}	1.912 _*	2.239 [*] _s	0.844 ⁿ _s	0.500 ⁿ _s	2.239 [*] _s	1.964 [*] _s	1.792 [*] _s	0.568 ⁿ _s	0.672 _{ns}	2.257 [*] _s	0.672 _{ns}
	tas	0.396 _{ns}	0.638 _{ns}	1.240 ⁿ _s	1.568 ⁿ _s	2.585 [*] _{**}	1.705 ^e _s	1.413 ⁿ _s	1.464 ⁿ _s	0.172 ⁿ _s	0.413 _{ns}	0.913 ⁿ _s	0.689 _{ns}
Lampung	ch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1.808 _*	1.498 _{ns}	1.395 ⁿ _s	2.791 [*] _{**}	1.533 ⁿ _s	2.273 [*] _s	0.500 ⁿ _s	1.344 ⁿ _s	0.500 ⁿ _s	0.655 _{ns}	0.810 ⁿ _s	1.877 _*
	tas	1.447 _{ns}	1.550 _{ns}	0.930 ⁿ _s	1.465 ⁿ _s	1.706 ^e _s	0.638 ⁿ _s	1.016 ⁿ _s	0.689 ⁿ _s	0.414 ⁿ _s	0.568 _{ns}	0.052 ⁿ _s	0.844 _{ns}
Sulawesi Selatan	ch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2.566 _{**}	0.999 _{ns}	0.878 ⁿ _s	0.189 ⁿ _s	0.431 ⁿ _s	1.206 ⁿ _s	1.395 ⁿ _s	1.946 [*] _s	1.774 [*] _s	1.774 _*	0.809 ⁿ _s	0.655 _{ns}
	tas	0.500 _{ns}	1.103 _{ns}	2.446 [*] _s	2.308 [*] _s	3.118 [*] _{**}	2.360 [*] _s	1.895 [*] _s	2.016 [*] _s	0.258 ⁿ _s	1.638 _{ns}	0.982 ⁿ _s	1.808 _*

Sumber: NASA Power (2026), data diolah

Keterangan: *), **), ***) signifikan di 90%, 95% and 99%; ns = tidak signifikan
+) periode 1990-2006 lebih tinggi, -) periode 2007-2023 lebih tinggi

Ditemukan pola bahwa pada bulan-bulan di mana curah hujan meningkat signifikan (misalnya November di Riau), suhu udara cenderung tetap meningkat atau stabil. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan (yang seharusnya memberikan efek pendinginan melalui evaporasi dan tutupan awan) tidak cukup kuat untuk meredam laju pemanasan global di tingkat lokal (Fawzi & Iswari, 2020). Kondisi "semakin basah namun semakin panas" ini menjadi tantangan baru bagi fisiologi kelapa sawit di Indonesia. mengingat kenaikan suhu malam hari yang konsisten juga dapat meningkatkan laju respirasi pemeliharaan, sehingga mengurangi energi yang tersedia untuk pertumbuhan tandan (Pimentel, 2022).

Analisis tren produktivitas kelapa sawit selama periode 1990 – 2023 mengungkapkan pola pertumbuhan yang positif di sebagian besar wilayah studi, namun dengan laju kenaikan (*Sen's Slope*) yang sangat bervariasi antar provinsi (Gambar 1 dan Tabel 5). Pada Zona Ekuatorial, seluruh provinsi menunjukkan tren meningkat, dengan 66,7% di antaranya signifikan secara statistik. Provinsi Bengkulu, Sumatera Selatan, dan Kalimantan Timur mencatatkan laju kenaikan tertinggi, masing-masing sebesar 66,9 kg/ha/tahun, 59,9 kg/ha/tahun, dan 50,3 kg/ha/tahun. Laju kenaikan yang masif di wilayah-wilayah ini sejalan dengan temuan pada Tabel 3, di mana provinsi-provinsi tersebut juga mengalami peningkatan curah hujan yang signifikan (*wetting trend*). Hal ini mengindikasikan bahwa di Zona Ekuatorial, ketersediaan air yang semakin melimpah mampu mengkompensasi tren pemanasan yang terjadi (Ardiyanto *et al.*, 2021). Kondisi ini sangat krusial mengingat kelapa sawit memerlukan pasokan air yang stabil untuk mendukung penyerapan hara dan menjaga tekanan turgor tanaman agar tidak terjadi aborsi bunga betina (Evizal *et al.*, 2020; Hijri Darlan *et al.*, 2016; Legros *et al.*, 2009).

Zona Monsunal menunjukkan dinamika yang lebih kompleks. Provinsi Sulawesi Selatan dan Kalimantan Selatan berhasil mempertahankan tren pertumbuhan yang signifikan dengan laju kenaikan masing-masing 38,6 kg/ha/tahun dan 31,8 kg/ha/tahun. Namun, temuan paling kritis muncul di Provinsi Lampung, yang menjadi satu-satunya wilayah dengan tren produktivitas menurun (-16,25 kg/ha/tahun). Meskipun secara statistik tidak signifikan, penurunan ini secara substansial sangat kontras dengan tren nasional. Jika dikaitkan dengan Tabel 3, Lampung memiliki laju peningkatan curah hujan paling rendah di antara wilayah monsunal lainnya, namun tetap mengalami pemanasan suhu minimum yang signifikan. Tekanan termal yang tidak dibarengi dengan peningkatan ketersediaan air yang memadai diduga kuat menjadi penyebab degradasi produktivitas di wilayah ini (Ardiyanto *et al.*, 2021). Secara fisiologis, cekaman panas dan air yang terjadi

secara bersamaan dapat memicu kerusakan klorofil dan gangguan fotosistem II, yang memaksa tanaman mengalihkan energi untuk mekanisme pertahanan (Azzeme et al., 2016; Satria et al., 2025).

Secara fisiologis, mekanika penutupan stomata pada *Elaeis guineensis* dipicu oleh peningkatan transpirasi yang melebihi laju konduksi air ke daun. Hal ini menurunkan tekanan turgor pada sel penjaga (*guard cells*) akibat gradien tekanan uap air yang ekstrem antara rongga substomata dan atmosfer. Gejala awal penurunan konduktansi stomata mulai terdeteksi saat VPD melampaui 1 kPa. Namun, dampak signifikan terhadap penurunan laju penyerapan CO₂ akibat penutupan celah stomata secara masif baru akan teramati secara nyata ketika VPD mencapai ambang batas kritis sekitar 1,8 kPa (Dufrene & Saugier, 1993; Kallarackal et al., 2004). Tanaman kelapa sawit sebenarnya memiliki resiliensi terhadap nilai VPD yang tinggi, dengan syarat ketersediaan air di dalam profil tanah berada pada kondisi yang mencukupi untuk memenuhi permintaan evaporasi atmosfer (Listia et al., 2019). Namun, akibat minimnya peningkatan curah hujan di wilayah monsun Lampung pasokan air tanah gagal mengompensasi tingginya permintaan atmosferik tersebut. Penutupan stomata yang berkepanjangan pada akhirnya mengorbankan pendinginan evaporatif (*evaporative cooling*), meningkatkan suhu daun di atas optimal (24–28°C), serta memacu laju respirasi malam hari yang menguras cadangan karbohidrat untuk pembentukan buah (Dislich et al., 2017; Paterson et al., 2015). Secara keseluruhan, laju kenaikan produktivitas di Indonesia mayoritas (rata-rata >20 kg/ha/tahun) menunjukkan bahwa faktor teknologi (benih unggul dan pemupukan) masih mampu mengatasi tekanan perubahan iklim sejauh ini. Namun, munculnya tren penurunan di Lampung menjadi sinyal peringatan (*early warning*) bahwa pada titik tertentu, kenaikan suhu dan defisit air akan melampaui kemampuan adaptasi teknologi saat ini (Murtiaksono et al., 2009).



Gambar 2 Sebaran produktivitas kelapa sawit di Indonesia (1990-2023)
Sumber: Ilustrasi pribadi (2026)

Tabel 5 Hasil Analisis Tren *Mann-Kendall* Produktivitas Kelapa Sawit (1990 – 2023)

No	Provinsi	Kendall's	Sen's Slope (kg/ ha)	Arah tren	Keterangan
Zona Ekuatorial					
1	Riau	0.3904**	28.2857	Meningkat	Signifikan
2	Sumatera Utara	0.0339 ^{ns}	3.2499	Meningkat	Tidak signifikan
3	Kalimantan Barat	0.3298***	21.2727	Meningkat	Signifikan
4	Jambi	0.508***	39.4545	Meningkat	Signifikan
5	Aceh	0.0588 ^{ns}	5.5769	Meningkat	Signifikan
6	Kalimantan Timur	0.6595***	50.375	Meningkat	Signifikan

No	Provinsi	Kendall's	Sen's Slope (kg/ ha)	Arah tren	Keterangan
7	Sumatera Selatan	0.7529***	59.923	Meningkat	Signifikan
8	Bengkulu	0.5865***	66.999	Meningkat	Signifikan
9	Sumatera Barat	0.0731 ^{ns}	11.999	Meningkat	Tidak Signifikan
Zona Monsunal					
1	Kalimantan Selatan	0.2732**	31.8399	Meningkat	Signifikan
2	Lampung	-0.1658 ^{ns}	-16.25	Menurun	Tidak Signifikan
3	Sulawesi Selatan	0.426***	38.6428	Meningkat	Signifikan

Sumber: BDSP (2026), data diolah

Keterangan: *), **), ***) signifikan di 90%, 95% and 99%; ns = tidak signifikan

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah sentra produksi kelapa sawit di Indonesia didominasi oleh zona iklim ekuatorial dan monsunial, dengan karakteristik variabilitas iklim yang berbeda antar zona. Secara umum, seluruh wilayah penelitian mengalami peningkatan curah hujan dan suhu selama periode 1990–2023, yang mengindikasikan terjadinya tren pembasahan (wetting) dan pemanasan (warming) di sentra perkebunan kelapa sawit Indonesia. Zona ekuatorial menunjukkan kondisi agroklimat yang relatif lebih stabil dengan distribusi curah hujan yang merata dan suhu yang lebih optimal, sehingga mendukung produktivitas kelapa sawit yang lebih tinggi dibandingkan zona monsunial. Sebaliknya, wilayah monsunial mengalami tekanan iklim yang lebih ekstrim akibat fluktuasi curah hujan dan peningkatan suhu yang lebih progresif, terutama pada periode musim kemarau. Meskipun sebagian besar provinsi masih menunjukkan tren peningkatan produktivitas kelapa sawit, ditemukan adanya indikasi penurunan produktivitas di wilayah dengan tekanan termal tinggi dan peningkatan ketersediaan air yang relatif rendah, seperti Provinsi Lampung. Strategi adaptasi dan pengelolaan perkebunan kelapa sawit perlu disusun secara spesifik wilayah dengan mempertimbangkan karakteristik agroklimat lokal guna menjaga keberlanjutan produksi kelapa sawit di Indonesia.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Badan Pengelola Dana Perkebunan (BPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia atas dukungan dalam pemberian Dana Penelitian dalam skema Lomba Riset Sawit (LRS) Mahasiswa 2025, sehingga kegiatan penelitian ini dapat berjalan dengan lancar.

REFERENCES

- Abubakar, I. M., & Idi, B. Y. (2024). Statistical Analysis of NASA POWER Meteorological Data for the Assessment of Climate Variability in Adamawa State 1Abubakar. *ETSIJ*, 15(2).
- Ardiyanto, A., Murtalaksono, K., Wahjunie, E. D., & Sutandi, A. (2021). Pengaruh Komponen Neraca Air Terhadap Produktivitas Kelapa Sawit Pada Berbagai Jenis Tanah : Studi Kasus Di Kalimantan Tengah Dan Barat a Water Balance ' S Effect on Oil Palm Productivity Under Varying Soil Types : Case Study in Central and West. 29(1), 11–20.
- Arum, M. R., Utami, A. W., & Irham, I. (2023). *Climate Change and Rice Production in East Java Province, Indonesia*. 400–413. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-122-7_38
- Azzeme, A. M., Abdullah, S. N. A., Aziz, M. A., & Wahab, P. E. M. (2016). Oil palm drought inducible DREB1 induced expression of DRE/CRT- and non-DRE/CRT-containing genes in lowland transgenic tomato under cold and PEG treatments. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 129–151. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.12.025>

- Cai, X., & Sakemoto, R. (2022). El Niño and Commodity Prices: New Findings From Partial Wavelet Coherence Analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 10(May), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.893879>
- Callahan, C. W., & Mankin, J. S. (2023). Persistent effect of El Niño on global economic growth. *Science*, 380(6649), 1064–1069.
- Change, C. (2007). The physical science basis. *Contribution of Working*.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2015). *The Oil Palm*. Wiley Blackwell.
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2003). The Oil Palm, Fourth Edition. In *Agricultural Systems* (Vol. 83, Nomor 2). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.06.012>
- Dislich, C., Keyel, A. C., Salecker, J., Kisel, Y., Meyer, K. M., Auliya, M., Barnes, A. D., Corre, M. D., Darras, K., Faust, H., Hess, B., Klasen, S., Knohl, A., Kreft, H., Meijide, A., Nurdiansyah, F., Otten, F., Pe'er, G., Steinebach, S., ... Wiegand, K. (2017). A review of the ecosystem functions in oil palm plantations, using forests as a reference system. *Biological Reviews*, 92(3), 1539–1569. <https://doi.org/10.1111/brv.12295>
- Dufrene, E., & Saugier, B. (1993). Gas Exchange of Oil Palm in Relation to Light, Vapour Pressure Deficit, Temperature and Leaf Age. In *Functional Ecology*. British Ecological Society.
- Listia, E., Pradiko, I., Syarovy, M., Hidayat, F., Ginting, E.N., & Farrasati, R. (2019). Pengaruh ketinggian tempat terhadap performa fisiologistanaman kelapa sawit (*Elaeis Guineensis* Jacq.). *Jurnal Tanah dan Iklim*, 43(1), 33–42.
- Evizal, R., Wibowo, L., Novpriasyah, H., Yunika Sari, R., & Erry Prasmatiwi, F. (2020). Keragaan Agronomi Tanaman Kelapa Sawit pada Cekaman Kering Periodik. *Journal of Tropical Upland Resources ISSN*, 02(01), 60–68.
- Fawzi, N. I., & Iswari, M. Y. (2020). Analisis Heat Island pada Perkebunan Kelapa Sawit: Studi Kasus di Kabupaten Kayong Utara, Kalimantan Barat. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 8(2), 106–115. <https://doi.org/10.14710/jwl.8.2.106-115>
- Febrianto, E. B., Tarigan, M., Azri, I., Studi, P., Perkebunan, B., Tinggi, S., Pertanian, I., & Perkebunan, A. (2019). Evaluasi Karakter Agronomi Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) Varietas DXP AVROS Pada Kondisi Cekaman Kekeringan Di Main Nursery Evaluation Of Palm Oil Agronomic Characters (*Elaeis guineensis* Jacq.) Variety Of DxP Avros On The Drought Stress Conditio. *BERNAS Agricultural Research Journal*, 15(1), 202–211.
- Go, Y.-H., Tan, Y.-L., & Yiew, T.-H. (2024). Sensitivity of oil palm yield in Indonesia to climate change: evidence from threshold cointegration models. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05635-w>
- Gupta, R., & Mishra, A. (2019). Climate change induced impact and uncertainty of rice yield of agro-ecological zones of India. *Agricultural Systems*, 173(February), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.009>
- Haryana, A., Indarto, J., & Avianto, N. (2010). *NASKAH KEBIJAKAN (POLICY PAPER) KELAPA SAWIT INDONESIA SECARA BERKELANJUTAN*.
- Hijri Darlan, N., Pradiko, I., dan Hasril Siregar, W. H., & Sawit El Niño Kekeringan Sumatera Bagian Utara Sumatera Bagian Selatan, K. (2016). Effect of El Niño 2015 on Oil Palm Performance in Central and Southern Sumatera. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 40(2), 113–120. www.bom.gov.au
- IPCC. (2022). Land-climate interactions. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.004>

- Kallarackal, J., Jeyakumar, P., & George, S. (2004). Water use of irrigated oil palm at three different arid locations in Peninsular India. *Journal of Oil Palm ...*, 16(1), 45–53. <https://www.cabdirect.org/abstracts/20043089511.html>
- Legros, S., Mialet-Serra, I., Caliman, J. P., Siregar, F. A., Clement-Vidal, A., Fabre, D., & Dingkuhn, M. (2009). Phenology, growth and physiological adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to sink limitation induced by fruit pruning. *Annals of Botany*, 104(6), 1183–1194. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp216>
- Litbang. (2011). Adaptasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian. *Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian*, 13.
- Maillard, O., Vides-Almonacid, R., Salazar, Á., & Larrea-Alcazar, D. M. (2023). Effect of Deforestation on Land Surface Temperature in the Chiquitania Region, Bolivia. *Land*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/land12010002>
- Marhaento, H., Putra, E. T. S., Ma'aruf, A., Wibowo, T. W., Nissauqodry, S. V., & Astikadewi, P. (2023). *Produksi Sawit Indonesia Berbasis Tipologi Intensifikasi* (Nomor November).
- McGee, D., Donohoe, A., Marshall, J., & Ferreira, D. (2014). Changes in ITCZ location and cross-equatorial heat transport at the Last Glacial Maximum, Heinrich Stadial 1, and the mid-Holocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 390, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.12.043>
- Murphy, D. J., Goggin, K., & Paterson, R. R. M. (2021). Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00058-3>
- Murtalaksono, K., Darnosarkoro, W., Sutarta, E. S., Siregar, H. H., & Hidayat, Y. (2009). Effort to Increase Oil Palm Production through Application Technique of Soil and Water Conservation. *J. Tanah Trop*, 14(2), 135–142.
- Oettli, P., Behera, S. K., & Yamagata, T. (2018). Climate Based Predictability of Oil Palm Tree Yield in Malaysia. *Scientific Reports*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20298-0>
- Paterson, R. R. M., Kumar, L., Shabani, F., & Lima, N. (2017). World climate suitability projections to 2050 and 2100 for growing oil palm. *Journal of Agricultural Science*, 155(5), 659–702. <https://doi.org/10.1017/S0021859616000605>
- Paterson, R. R. M., Kumar, L., Taylor, S., & Lima, N. (2015). Future climate effects on suitability for growth of oil palms in Malaysia and Indonesia. *Scientific Reports*, 5, 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep14457>
- Paterson, R. R. M., & Lima, N. (2018). Climate change affecting oil palm agronomy, and oil palm cultivation increasing climate change, require amelioration. *Ecology and Evolution*, 8(1), 452–461. <https://doi.org/10.1002/ece3.3610>
- Pimentel, C. (2022). Plant Responses to High-Temperature Stress. *Archives of Agriculture Research and Technology (AART)*, 3(3), 1–2. <https://doi.org/10.54026/aart/1043>
- Pradiko, I., Rahutomo, S., & Siregar, H. H. (2017). Anomali-anomali Iklim Dan Implikasinya Terhadap Produktivitas Kelapa Sawit Di Indonesia. In *Warta PPKS* (hal. 111–121).
- Reily, M., & Ekarina. (2018). Rekor tertinggi, ekspor minyak sawit 2017 tembus US\$ 22,9 miliar. *Katadata News*.
- Rifin, A., Feryanto, Herawati, & Harianto. (2020). Assessing the impact of limiting Indonesian palm oil exports to the European Union. *Journal of Economic Structures*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40008-020-00202-8>
- Santoso, A. B., Supriana, T., & Girsang, M. A. (2022). Pengaruh Curah Hujan pada Produksi Padi Gogo di Indonesia. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(4), 606–613. <https://doi.org/10.18343/jipi.27.4.606>

- Satibi, M., Nasamsir, N., & Hayata, H. (2019). Pembuatan Rorak pada Perkebunan Kopi Arabica (*Coffea arabica*) Untuk Meningkatkan Produktivitas. *Jurnal Media Pertanian*, 4(2), 74. <https://doi.org/10.33087/jagro.v4i2.85>
- Satria, R. E., Sofyan, E. T., Sule, M. I. S., Suriadikusumah, A., & Irwandhi. (2025). Systematic Literature Review: Strategi Peningkatan Produktivitas Kelapa Sawit Dalam Menghadapi Perubahan Iklim. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 12(1), 81–88. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2025.012.1.8>
- Schönbeck, L. C., Schuler, P., Lehmann, M. M., Mas, E., Mekarni, L., Pivovarov, A. L., Turberg, P., & Grossiord, C. (2022). Increasing temperature and vapour pressure deficit lead to hydraulic damages in the absence of soil drought. *Plant Cell and Environment*, 45(11), 3275–3289. <https://doi.org/10.1111/pce.14425>
- Siregar, H. H., Adiwiganda, R., & Poeloengan, Z. (1997). Pedoman pewilayahan agroklimat komoditas kelapa sawit. *Warta PPKS*, 5(3), 109–113.
- Suanti, A. A., & Rhendy, K. . (2024). OUTLOOK KOMODITAS PERKEBUNAN KELAPA SAWIT. In *E-Book*. Sekeretarian Jenderal Kementerian Pertanian.
- Sukarman, Wirianata, H., Budiharjo, K., Primananda, S., & Purwantisari, S. (2021). *Estimasi Produksi Tandan Kelapa Sawit Berdasarkan Analisis Ketersediaan Air dengan Teknik Oil Palm Dissection*. 9, 291–299.
- Surmaini, E., Runtunuwu, E., & Las, I. (2015). Upaya sektor pertanian dalam menghadapi perubahan iklim. *Jurnal Penelitian*, 30(98), 1–7.
- Tim Riset PASPI. (2018). Perubahan komposisi ekspor sawit dan perannya dalam neraca perdagangan Indonesia. In *Analisis Isu Strategis Sawit IV*.
- Varghese, R., Behera, S., & Behera, M. D. (2024). Tropical ocean teleconnections with gross primary productivity of monsoon-Asia. *Science of the Total Environment*, 938(May), 173337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173337>
- Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2017). Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. *European Journal of Agronomy*, 83, 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>