

Interaksi Iklim-Tanah dalam Mengendalikan Produktivitas Kelapa Sawit pada Kondisi Variabilitas Curah Hujan di Ekosistem Lahan Mineral dan Gambut

Nurhayati^{1,*}, Kaffi Hanzallah², Ratna Mauli Lubis¹, Diapari Siregar¹, Sri Hafnida Ritonga¹, dan Muhammad Rizwan¹

¹) Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Islam Sumatera Utara, Medan, Indonesia

²) Alumni Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Islam Sumatera Utara, Medan, Indonesia

*) Corresponding author: nurhayati@uisu.ac.id

Abstrak

Produktivitas kelapa sawit dipengaruhi oleh interaksi antara variabilitas iklim, karakteristik tanah, ketersediaan air, dan pengelolaan tanaman. Perbedaan karakteristik lahan mineral dan gambut dapat menghasilkan respons produktivitas yang berbeda terhadap perubahan curah hujan. Penelitian ini bertujuan menganalisis stabilitas produktivitas, variabilitas curah hujan, serta keterkaitan iklim dan karakteristik tanah dengan produktivitas kelapa sawit pada kedua ekosistem. Penelitian menggunakan reanalisis data sekunder periode 2019–2023 dari lahan mineral di Kebun Air Tenang/PTPN II Sawit Seberang, Kabupaten Langkat, dan lahan gambut di PT Umbul Mas Wisesa, Kabupaten Labuhan Batu Selatan. Variabel yang dianalisis meliputi curah hujan, jumlah hari hujan, produktivitas, serta sifat kimia tanah. Reanalisis dilakukan menggunakan koefisien variasi (CV) produktivitas dan curah hujan, indeks intensitas hujan sebagai rasio curah hujan terhadap jumlah hari hujan, serta analisis korelasi eksploratif. Hasil menunjukkan bahwa lahan mineral memiliki CV produktivitas sekitar 0,85%, sedangkan lahan gambut 10,75%. Sebaliknya, CV curah hujan lahan mineral mencapai sekitar 17,70%, lebih tinggi daripada lahan gambut sebesar 11,87%. Lahan gambut menunjukkan kecenderungan hubungan negatif antara curah hujan dan produktivitas, sedangkan hubungan hari hujan relatif lemah. Analisis sifat tanah menunjukkan pola keterkaitan yang kompleks dan pentingnya keseimbangan hara. Temuan ini mengindikasikan karakter buffering response pada lahan mineral dan sensitivity response pada lahan gambut. Kesimpulannya, ketahanan produksi kelapa sawit perlu dievaluasi berdasarkan produktivitas dan stabilitas produksi serta mempertimbangkan interaksi iklim–tanah–rezim air.

Kata kunci: Kelapa Sawit; Variabilitas Curah Hujan; Lahan Mineral; Lahan Gambut; Stabilitas Produksi

Abstract

Oil palm productivity is shaped by interactions among climate variability, soil characteristics, water availability, and crop management. Differences between mineral and peat soils may produce contrasting productivity responses to rainfall variability. This study aimed to analyze productivity stability, rainfall variability, and the relationships of climate and soil characteristics with oil palm productivity in the two ecosystems. The study used a reanalysis of secondary data for 2019–2023 from mineral soil at Air Tenang Estate/PTPN II Sawit Seberang, Langkat Regency, and peatland at PT Umbul Mas Wisesa, South Labuhan Batu Regency. The analyzed variables included rainfall, number of rainy days, productivity, and selected soil chemical properties. Reanalysis was conducted using coefficients of variation (CV) for productivity and rainfall, a rainfall intensity index calculated as rainfall divided by the number of rainy days, and exploratory correlation analysis. The results showed that the mineral site had a productivity CV of approximately 0.85%, whereas the peat site had a CV of 10.75%. In contrast, rainfall variability was higher on mineral soil, with a CV of approximately 17.70%, compared with 11.87% on peatland. The peat site showed a negative tendency between rainfall and productivity, while the relationship between rainy days and productivity was weak. Soil-property analysis revealed complex associations and highlighted the importance of nutrient balance. The findings indicate a buffering response on mineral soil and a

sensitivity response on peatland. Overall, oil palm climate resilience should be assessed through both productivity level and production stability while considering climate–soil–water regime interactions.

Keywords: *oil palm; rainfall variability; mineral soil; peatland; production stability*

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu komoditas perkebunan penting di Indonesia. Produktivitas kelapa sawit sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama ketersediaan air, suhu, karakteristik tanah, status hara, dan pengelolaan perkebunan. Dalam konteks perubahan iklim, perubahan pola curah hujan dan peningkatan kejadian cuaca ekstrem menjadi tantangan penting bagi keberlanjutan produksi kelapa sawit. Kajian sistematis menunjukkan bahwa perubahan suhu dan pola curah hujan dapat memengaruhi stres tanaman, kelembapan tanah, pertumbuhan, dan produktivitas kelapa sawit (Wulandari et al., 2025; Ramachandrudu et al., 2026).

Pengaruh curah hujan terhadap produktivitas tidak selalu bersifat linear. Kekurangan air dapat menyebabkan stres tanaman dan menghambat proses fisiologis, sedangkan kelebihan air dapat menyebabkan kejenuhan tanah, gangguan aerasi akar, pencucian unsur hara, dan perubahan kondisi perakaran. Respons tanaman juga dipengaruhi oleh kondisi tanah dan kemampuan sistem perkebunan mengelola air. Analisis data komersial kelapa sawit menunjukkan bahwa surplus air dan defisit air merupakan faktor lingkungan penting yang perlu dipertimbangkan bersama faktor pengelolaan dalam menjelaskan variasi hasil (Cock et al., 2016).

Permasalahan tersebut menjadi lebih kompleks ketika kelapa sawit dibudidayakan pada tipe tanah yang berbeda. Lahan mineral dan lahan gambut memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda, terutama dalam hal retensi air, drainase, kapasitas tukar kation, keasaman, kandungan bahan organik, dan dinamika unsur hara. Pada lahan gambut, kondisi muka air dan drainase sangat menentukan lingkungan perakaran. Penelitian pada perkebunan kelapa sawit di lahan gambut tropis menunjukkan bahwa tingkat drainase berhubungan dengan respons fotosintesis dan ketahanan tanaman terhadap tekanan atmosfer (McCalmont et al., 2023).

Selain faktor air, status dan keseimbangan hara merupakan komponen penting dalam produktivitas kelapa sawit. Efisiensi pemanfaatan K dan Mg dapat berbeda antar lokasi karena perbedaan kondisi tanah, curah hujan, kelembapan tanah, dan tekstur tanah (Prabowo et al., 2023). Pada perkebunan kelapa sawit Indonesia, ketidakseimbangan pasokan hara juga dapat menjadi faktor pembatas hasil, terutama ketika pasokan N, P, K,

dan Mg tidak sesuai dengan kebutuhan tanaman (Lim et al., 2023). Pada lahan gambut, pendekatan DRIS menunjukkan bahwa produktivitas tinggi berkaitan dengan keseimbangan beberapa unsur hara, bukan sekadar tingginya satu unsur secara individual (Mubarok et al., 2024; Khoiri et al., 2025). Pengelolaan amelioran dan pemupukan spesifik lokasi juga dapat memperbaiki beberapa sifat kimia gambut dan status hara tanaman (Utami et al., 2024).

Berdasarkan kondisi tersebut, artikel ini menggunakan reanalisis data sekunder untuk menghasilkan indikator baru berupa stabilitas produksi, variabilitas iklim, indeks intensitas hujan, serta pola hubungan iklim–tanah–produktivitas. Pertanyaan utama penelitian adalah bagaimana karakteristik tanah dan rezim air memoderasi respons produktivitas kelapa sawit terhadap variabilitas curah hujan pada lahan mineral dan gambut. Penelitian ini bertujuan membandingkan stabilitas produktivitas pada kedua ekosistem, menganalisis variabilitas dan intensitas curah hujan, mengevaluasi hubungan variabilitas iklim dengan produktivitas, mengidentifikasi pola keterkaitan sifat tanah dengan produktivitas, serta menyusun kerangka interaksi iklim–tanah–produktivitas sebagai dasar strategi adaptasi perubahan iklim yang spesifik ekosistem.

METODE

a. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan reanalisis data sekunder untuk mengevaluasi respons produktivitas kelapa sawit terhadap variabilitas iklim pada dua ekosistem dengan karakteristik tanah yang berbeda di Sumatera Utara. Lokasi penelitian mencakup lahan mineral di Kebun Air Tenang/PTPN II Sawit Seberang, Kabupaten Langkat, dan lahan gambut di PT Umbul Mas Wisesa, Kabupaten Labuhan Batu Selatan. Dataset yang dianalisis meliputi variabel iklim berupa curah hujan dan jumlah hari hujan, variabel produksi berupa produksi tandan buah segar (TBS) dan produktivitas, serta berbagai parameter kimia tanah. Integrasi data iklim, produksi, dan sifat tanah digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan stabilitas produksi, pola respons produktivitas terhadap variabilitas curah hujan, serta keterkaitan karakteristik tanah dengan respons tanaman pada kedua ekosistem.

b. Periode dan Variabel

Data iklim dan produktivitas yang dianalisis mencakup periode 2019–2023. Variabel iklim terdiri atas curah hujan dan jumlah hari hujan, sedangkan karakteristik tanah

meliputi N-total, P, K, Ca, Mg, Na, pH, kapasitas tukar kation (KTK), dan kejenuhan basa. Dataset tersebut digunakan sebagai basis reanalisis untuk mengembangkan pendekatan analitik yang berbeda dari analisis penelitian sumber. Data dasar ditransformasikan menjadi indikator variabilitas iklim dan stabilitas produksi, yang meliputi koefisien variasi curah hujan, koefisien variasi produktivitas, serta indeks intensitas hujan berdasarkan rasio curah hujan terhadap jumlah hari hujan. Selanjutnya, pola hubungan antara variabel iklim, karakteristik tanah, dan produktivitas dianalisis secara komparatif pada lahan mineral dan lahan gambut. Dengan pendekatan tersebut, artikel ini tidak mereproduksi data mentah bulana maupun tahunan dari data sekunder, tetapi menggunakan dataset yang sama untuk menghasilkan interpretasi baru mengenai climate response signature dan interaksi iklim–tanah–produktivitas.

c. Analisis Data

Stabilitas produktivitas kelapa sawit dianalisis menggunakan koefisien variasi (Coefficient of Variation/CV), yang dihitung berdasarkan rasio antara standar deviasi dan nilai rata-rata produktivitas, kemudian dinyatakan dalam persentase. Nilai CV yang semakin rendah menunjukkan tingkat variasi produktivitas yang semakin kecil sehingga mengindikasikan stabilitas produktivitas yang semakin tinggi. Pendekatan ini digunakan untuk membandingkan kemampuan relatif lahan mineral dan lahan gambut dalam mempertahankan produktivitas selama periode pengamatan.

$$CV = (SD / \bar{X}) \times 100\% \quad (1)$$

Selain stabilitas produksi, penelitian ini menggunakan indeks intensitas hujan (Rainfall Intensity Index/RI) sebagai indikator eksploratif untuk menggambarkan distribusi curah hujan secara agregat tahunan. Nilai RI merupakan rasio antara total curah hujan tahunan dan jumlah hari hujan dalam satu tahun. Nilai tersebut memberikan gambaran mengenai rata-rata jumlah curah hujan yang diterima pada setiap hari hujan, tetapi tidak dimaksudkan sebagai pengganti pengukuran intensitas meteorologis pada setiap kejadian hujan.

$$RI = CH / HH \quad (2)$$

Analisis korelasi digunakan untuk mengevaluasi arah dan kekuatan hubungan antara variabel iklim, yang meliputi curah hujan, jumlah hari hujan, dan indeks intensitas hujan, dengan produktivitas kelapa sawit. Analisis yang sama digunakan untuk mengidentifikasi pola keterkaitan antara karakteristik kimia tanah dan produktivitas.

Karena data iklim dan produktivitas yang dianalisis hanya mencakup lima observasi tahunan selama periode 2019–2023 pada masing-masing ekosistem, hasil korelasi diperlakukan sebagai analisis eksploratif. Koefisien korelasi digunakan untuk menggambarkan arah dan kekuatan asosiasi antarvariabel, bukan sebagai dasar untuk menetapkan hubungan sebab-akibat. Interpretasi pola hubungan dilakukan secara kontekstual dengan mempertimbangkan perbedaan karakteristik tanah, kondisi lingkungan tumbuh, dan rezim air pada lahan mineral dan lahan gambut.

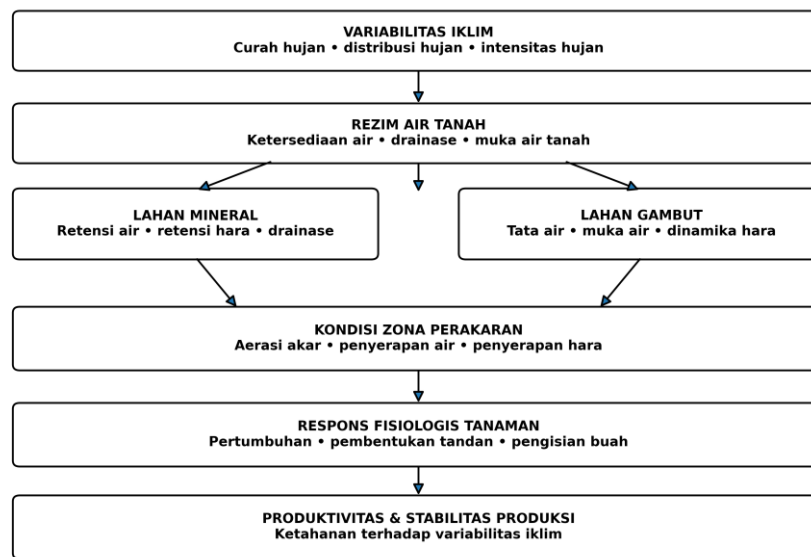
d. Pendekatan komparatif

Perbandingan antar-ekosistem dilakukan dengan mempertimbangkan koefisien variasi curah hujan dan produktivitas, arah serta kekuatan hubungan antara curah hujan dan produksi, hubungan jumlah hari hujan dengan produksi, pola indeks intensitas hujan, serta keterkaitan karakteristik kimia tanah dengan produktivitas kelapa sawit. Seluruh indikator tersebut dianalisis secara terpadu untuk mengidentifikasi perbedaan respons produktivitas terhadap kondisi iklim dan karakteristik tanah pada lahan mineral dan lahan gambut. Hasil komparasi selanjutnya digunakan untuk menyusun climate response signature atau pola respons iklim spesifik masing-masing ekosistem, yang menggambarkan karakter ketahanan dan sensitivitas produktivitas kelapa sawit terhadap variabilitas lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Variabilitas curah hujan dan stabilitas produktivitas

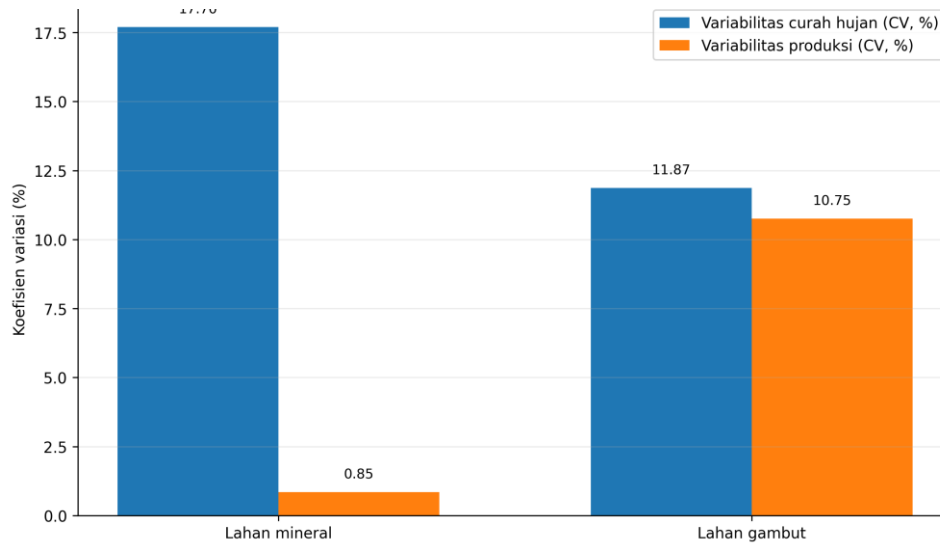
Analisis data menunjukkan kontras yang kuat antara lahan mineral dan lahan gambut. Lahan mineral mempunyai produktivitas rata-rata sekitar 11,37 ton ha⁻¹ dengan CV produktivitas sekitar 0,85%, sedangkan lahan gambut mempunyai produktivitas rata-rata sekitar 21,75 ton ha⁻¹ dengan CV sekitar 10,75%. Sebaliknya, CV curah hujan pada lahan mineral sekitar 17,70%, lebih tinggi dibandingkan lahan gambut sekitar 11,87%. Pola tersebut menunjukkan bahwa besarnya variabilitas curah hujan tidak otomatis menentukan besarnya fluktuasi produksi. Lahan mineral memperlihatkan indikasi kapasitas penyangga produksi yang lebih kuat, sedangkan lahan gambut menunjukkan produktivitas lebih tinggi tetapi stabilitas yang lebih rendah.



Gambar 1. Kerangka Interaksi Iklim–Tanah–Produktivitas Kelapa Sawit

b. Kontras variabilitas iklim dan stabilitas produksi

Perbandingan koefisien variasi memperlihatkan pola yang menarik: lahan mineral memiliki variabilitas curah hujan yang lebih tinggi, tetapi produktivitas jauh lebih stabil. Sebaliknya, lahan gambut memiliki variabilitas curah hujan yang lebih rendah, tetapi produktivitas lebih berfluktuasi. Pola tersebut menunjukkan bahwa respons produksi tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan besarnya perubahan curah hujan. Kondisi tanah, rezim air, lingkungan perakaran, keseimbangan hara, dan pengelolaan kemungkinan berperan sebagai faktor yang memoderasi respons tanaman. Pendekatan seperti ini sejalan dengan temuan bahwa respons hasil kelapa sawit perlu dibaca bersama kondisi lingkungan dan faktor pengelolaan, bukan hanya melalui satu peubah iklim (Cock et al., 2016).



Gambar 2. Perbandingan Variabilitas Curah Hujan dan Variabilitas Produksi Kelapa Sawit pada Lahan Mineral dan Gambut

Tabel 1. Matriks Respons Iklim Spesifik Ekosistem

Dimensi	Lahan mineral	Lahan gambut	Interpretasi
Variabilitas curah hujan	Tinggi	Sedang	Variabilitas hujan tidak otomatis menentukan fluktuasi produksi
Variabilitas produksi	Sangat rendah	Lebih tinggi	Produksi gambut relatif lebih sensitif
Curah hujan–produksi	Hubungan lemah	Negatif lebih kuat	Rezim air berpotensi lebih penting daripada total hujan
Hari hujan–produksi	Lemah	Sangat lemah	Frekuensi hujan saja belum cukup
Peran tanah	Retensi air dan hara	Tata air dan dinamika hara	Tanah berperan sebagai moderator
Prioritas adaptasi	Konservasi air dan kesuburan	Pengelolaan muka air dan hara	Strategi perlu spesifik ekosistem
Climate response signature	Buffering	Sensitivity	Karakter respons berbeda

c. Respons produktivitas pada lahan mineral

Hasil reanalisis menunjukkan bahwa respons produktivitas kelapa sawit pada lahan mineral relatif stabil terhadap variabilitas curah hujan selama periode pengamatan. Curah hujan dan jumlah hari hujan menunjukkan hubungan yang relatif lemah dengan produktivitas, sementara variasi produktivitas antartahun berada pada kisaran yang relatif sempit. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi curah hujan selama periode pengamatan belum menghasilkan perubahan produktivitas yang sebanding. Pola tersebut memberikan indikasi adanya karakter respons yang relatif teredam atau buffering response pada ekosistem lahan mineral. Istilah buffering response dalam penelitian ini merupakan

interpretasi terhadap pola data dan bukan bukti mekanisme kausal. Kemampuan sistem mempertahankan produktivitas kemungkinan merupakan hasil interaksi berbagai faktor, termasuk karakteristik tanah, ketersediaan dan keseimbangan hara, kondisi drainase, lingkungan perakaran, serta pengelolaan perkebunan. Hal ini sejalan dengan Prabowo et al. (2023) yang menunjukkan bahwa efisiensi pemanfaatan K dan Mg pada kelapa sawit dapat berbeda menurut kondisi tapak, kelembapan tanah, curah hujan, dan karakteristik tanah.

d. Respons produktivitas pada lahan gambut

Pada ekosistem lahan gambut, produktivitas kelapa sawit menunjukkan fluktuasi yang relatif lebih besar dibandingkan lahan mineral selama periode pengamatan. Hubungan antara curah hujan dan produktivitas cenderung berarah negatif, sedangkan hubungan antara jumlah hari hujan dan produktivitas relatif lemah. Pola tersebut menunjukkan kecenderungan bahwa peningkatan curah hujan dalam dataset diikuti oleh penurunan produktivitas, meskipun kecenderungan tersebut belum dapat dinyatakan sebagai hubungan sebab-akibat. Hasil regresi pada analisis awal juga belum signifikan secara statistik, sehingga hubungan yang teridentifikasi perlu dipandang sebagai pola asosiasi eksploratif. Kondisi hidrologis menjadi penting karena muka air tanah, drainase, kelembapan gambut, dan aerasi zona perakaran dapat menentukan apakah tambahan curah hujan menjadi sumber air yang menguntungkan atau justru meningkatkan kondisi terlalu basah. McCalmont et al. (2023) menunjukkan bahwa tingkat drainase dan kondisi muka air berhubungan dengan respons fisiologis kelapa sawit pada gambut, sedangkan Anggata et al. (2024) menunjukkan bahwa pola hujan dan fluktuasi muka air dapat memengaruhi dinamika hara air tanah. Oleh karena itu, respons produktivitas pada gambut lebih tepat dipahami dalam kerangka rezim air daripada hanya berdasarkan jumlah curah hujan tahunan.

e. Indeks intensitas hujan sebagai indikator tambahan

Total curah hujan tahunan belum sepenuhnya menggambarkan pola distribusi air yang diterima tanaman selama satu tahun. Dua periode dengan jumlah curah hujan tahunan yang relatif sama dapat memiliki jumlah hari hujan dan distribusi volume hujan yang berbeda sehingga menghasilkan kondisi ketersediaan air yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan indeks intensitas hujan agregat (Rainfall Intensity Index/RI), yang dihitung sebagai rasio total curah hujan tahunan terhadap jumlah hari hujan. Pendekatan ini menggeser fokus dari sekadar kuantitas curah hujan menuju pola penerimaan air berdasarkan frekuensi kejadian hujan. Namun, RI merupakan indikator

agregat tahunan dan tidak dapat disamakan dengan intensitas hujan aktual pada setiap kejadian. Indeks ini belum menangkap hujan ekstrem, durasi hujan, jeda antarahujan, maupun distribusi bulanan atau harian. Penelitian lanjutan perlu menggunakan data hujan harian untuk menghitung intensitas aktual, frekuensi hujan ekstrem, panjang periode tanpa hujan, dan distribusi hujan antarbulan.

f. Stabilitas produksi sebagai indikator ketahanan iklim

Produktivitas rata-rata yang tinggi tidak selalu menunjukkan bahwa suatu sistem perkebunan memiliki tingkat ketahanan yang lebih tinggi terhadap variabilitas iklim. Hasil reanalisis menunjukkan bahwa lahan gambut memiliki produktivitas rata-rata lebih tinggi dibandingkan lahan mineral, tetapi juga mempunyai CV produktivitas yang lebih besar. Sebaliknya, lahan mineral memiliki produktivitas rata-rata lebih rendah tetapi variasi produksi jauh lebih kecil. Pola tersebut menunjukkan perbedaan antara kapasitas produksi dan stabilitas produksi. Produktivitas rata-rata menggambarkan kemampuan suatu sistem mencapai tingkat produksi tertentu, sedangkan CV menggambarkan perubahan relatif produksi selama periode pengamatan. Karena itu, evaluasi ketahanan iklim perlu memasukkan kedua dimensi tersebut. Perspektif ini sejalan dengan literatur yang menempatkan stabilitas produktivitas dan kemampuan beradaptasi sebagai bagian penting dari respons perkebunan terhadap perubahan iklim (Wulandari et al., 2025; Ramachandrudu et al., 2026). Dalam konteks penelitian ini, lahan gambut menunjukkan karakter “produktivitas tinggi–stabilitas lebih rendah”, sedangkan lahan mineral menunjukkan karakter “produktivitas lebih rendah–stabilitas lebih tinggi”. Kategorisasi ini merupakan gambaran komparatif, bukan penilaian bahwa salah satu ekosistem lebih unggul secara keseluruhan.

g. Keterkaitan sifat tanah pada lahan mineral

Hasil reanalisis menunjukkan bahwa hubungan antara unsur hara dan parameter kimia tanah dengan produktivitas kelapa sawit bersifat kompleks dan tidak dapat dijelaskan melalui pengaruh satu unsur secara terpisah. Korelasi yang kuat di antara beberapa parameter tanah menunjukkan adanya keterkaitan antarunsur, sehingga perubahan satu parameter dapat berjalan bersamaan dengan perubahan parameter lainnya. Hubungan negatif antara beberapa unsur hara dan produktivitas juga tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai bukti bahwa peningkatan unsur tersebut menyebabkan penurunan produksi. Pola tersebut dapat dipengaruhi oleh perbedaan blok, umur tanaman, sejarah pemupukan, kondisi hidrologis, faktor pembatas lain, serta kemungkinan dilution effect. Prabowo et al.

(2023) menunjukkan bahwa efisiensi pemanfaatan K dan Mg dapat berbeda antar lokasi akibat perbedaan lingkungan, sedangkan Lim et al. (2023) menunjukkan bahwa ketidakseimbangan pasokan N, P, K, dan Mg dapat menjadi faktor pembatas hasil pada perkebunan kelapa sawit.

Tingginya korelasi antarvariabel tanah juga memiliki implikasi terhadap analisis multivariat. Apabila variabel yang berkorelasi kuat dimasukkan secara bersamaan ke dalam model regresi, terdapat potensi multikolinearitas sehingga kontribusi individual masing-masing variabel sulit dipisahkan. Oleh karena itu, hasil korelasi dalam penelitian ini lebih tepat digunakan untuk mengidentifikasi pola keterkaitan dan kelompok variabel yang saling berhubungan, bukan untuk menetapkan satu unsur sebagai faktor penyebab utama perubahan produktivitas. Pendekatan pengelolaan hara sebaiknya diarahkan pada keseimbangan hara dan kondisi tapak, bukan sekadar peningkatan dosis satu unsur.

h. Keterkaitan sifat tanah pada lahan gambut

Pada ekosistem lahan gambut, karakteristik tanah menunjukkan kondisi yang berbeda dibandingkan lahan mineral, terutama reaksi tanah yang relatif masam dan kandungan bahan organik yang tinggi. Hasil reanalisis menunjukkan bahwa fosfor (P) dan kalsium (Ca) memiliki arah hubungan positif dengan produktivitas, sedangkan hubungan produktivitas dengan parameter hara lainnya bervariasi. Pola tersebut mengindikasikan bahwa produktivitas kelapa sawit pada lahan gambut tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan satu unsur secara individual, tetapi kemungkinan dipengaruhi oleh keseimbangan dan interaksi antarunsur. Mubarok et al. (2024) dan Khoiri et al. (2025) menunjukkan pentingnya keseimbangan hara pada kelapa sawit gambut, sementara Utami et al. (2024) menunjukkan bahwa amelioran dan pemupukan spesifik lokasi dapat memperbaiki beberapa sifat gambut dan status hara tanaman. Dengan demikian, hubungan P dan Ca dengan produktivitas dalam penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai indikasi awal mengenai pentingnya keseimbangan hara, bukan bukti bahwa peningkatan P atau Ca secara langsung meningkatkan produktivitas.

Dalam konteks interaksi iklim–tanah, keseimbangan hara menjadi semakin penting karena perubahan kondisi air dapat memengaruhi dinamika dan ketersediaan unsur hara. Pengelolaan produktivitas pada gambut karena itu perlu mengintegrasikan tata air, kondisi lingkungan perakaran, keseimbangan hara, dan praktik pemupukan. Pendekatan pengelolaan yang hanya berorientasi pada peningkatan dosis pupuk tertentu berpotensi

kurang efektif apabila tidak mempertimbangkan keseimbangan antarunsur dan kondisi hidrologis.

i. Interaksi iklim–tanah dan climate response signature

Temuan utama penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara variabilitas iklim dan produktivitas kelapa sawit lebih tepat dipahami dalam kerangka interaksi antara kondisi iklim, karakteristik tanah, dan pengelolaan tanaman, bukan sebagai hubungan langsung antara curah hujan dan produksi. Secara konseptual, hubungan tersebut dapat dirumuskan sebagai $P = f(C, S, C \times S, M)$, dengan P sebagai produktivitas, C sebagai variabilitas iklim, S sebagai karakteristik tanah, $C \times S$ sebagai interaksi iklim–tanah, dan M sebagai faktor pengelolaan. Kerangka tersebut menunjukkan bahwa respons produktivitas dapat berbeda ketika tanaman tumbuh pada lingkungan tanah dan rezim air yang berbeda.

Berdasarkan pola hasil reanalisis, lahan mineral menunjukkan karakter respons yang relatif stabil terhadap variabilitas curah hujan. Variabilitas curah hujan yang relatif lebih tinggi tidak diikuti oleh fluktuasi produktivitas yang sebanding, sebagaimana tercermin dari CV produktivitas yang sangat rendah. Pola ini disebut sebagai indikasi buffering response, yaitu kondisi ketika sistem produksi relatif mampu mempertahankan tingkat produktivitas meskipun terjadi perubahan kondisi iklim selama periode pengamatan. Sebaliknya, lahan gambut menunjukkan variabilitas produktivitas yang lebih tinggi dan kecenderungan hubungan negatif antara curah hujan dan produktivitas. Pola tersebut memberikan indikasi sensitivity response, yaitu respons produktivitas yang relatif lebih fluktuatif terhadap perubahan kondisi lingkungan, khususnya kondisi yang berkaitan dengan rezim air. Istilah buffering response dan sensitivity response dalam penelitian ini merupakan karakterisasi pola berdasarkan reanalisis dan bukan ukuran kausal atau parameter sensitivitas yang telah dibuktikan secara eksperimental.

Implikasinya adalah strategi adaptasi perubahan iklim pada perkebunan kelapa sawit tidak dapat diterapkan secara seragam. Pada lahan mineral, strategi lebih diarahkan pada pemeliharaan kapasitas penyangga melalui konservasi air, pemeliharaan kesuburan dan bahan organik tanah, serta efisiensi pengelolaan hara. Pada lahan gambut, strategi perlu memberikan perhatian lebih besar terhadap pengaturan tata air, pemantauan muka air tanah, pemeliharaan kondisi perakaran, dan keseimbangan hara. Pendekatan adaptasi berbasis karakteristik ekosistem lebih relevan dibandingkan pendekatan yang hanya menggunakan curah hujan sebagai indikator tekanan iklim.

KESIMPULAN DAN SARAN

Perbedaan karakter respons produktivitas kelapa sawit terhadap variabilitas curah hujan antara lahan mineral dan lahan gambut. Lahan mineral memiliki produktivitas rata-rata sekitar 11,37 ton ha⁻¹ dengan CV produktivitas sekitar 0,85%, sedangkan lahan gambut sekitar 21,75 ton ha⁻¹ dengan CV sekitar 10,75%. CV curah hujan lahan mineral sekitar 17,70%, lebih tinggi dibandingkan lahan gambut sekitar 11,87%. Pola tersebut mengindikasikan bahwa lahan mineral memiliki kapasitas penyangga produksi yang relatif lebih kuat, sedangkan lahan gambut memiliki produktivitas rata-rata lebih tinggi tetapi stabilitas lebih rendah. Hubungan curah hujan dengan produktivitas pada gambut cenderung negatif, tetapi belum signifikan secara statistik pada dataset lima tahun sehingga harus dipahami sebagai asosiasi eksploratif. Analisis sifat tanah menunjukkan hubungan yang kompleks dan pentingnya keseimbangan hara serta rezim air dalam menjelaskan respons produktivitas. Temuan ini mendukung penggunaan konsep climate response signature berupa buffering response pada lahan mineral dan sensitivity response pada lahan gambut sebagai kerangka interpretasi komparatif. Saran penelitian selanjutnya adalah menggunakan data iklim dan produktivitas dengan resolusi bulanan atau harian serta menambahkan data muka air tanah, suhu, vapor pressure deficit, kelembapan tanah, pemupukan, umur tanaman, dan faktor pengelolaan agar mekanisme interaksi iklim–tanah–produktivitas dapat diuji lebih kuat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak pengelola perkebunan yang telah menyediakan data iklim, produksi, dan analisis tanah yang menjadi dasar reanalisis ini, serta kepada pihak akademik yang mendukung pengembangan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggata, F. U., Lim, S.-F., Mah, Y.-S., Busman, N. A., Nagamitsu, M., Sangok, F., & Melling, L. (2024). Long-term rainfall and water table influence on groundwater nutrient dynamics from an oil palm plantation. *Water Science*, 38(1), 569–586. <https://doi.org/10.1080/23570008.2024.2417514>
- Cock, J., Kam, S. P., Cook, S., Donough, C., Lim, Y. L., Jines-Leon, A., Lim, C. H., Primananda, S., Yen, B. T., Mohanaraj, S. N., Samosir, Y. M. S., & Oberthür, T. (2016). Learning from commercial crop performance: Oil palm yield response to

- management under well-defined growing conditions. *Agricultural Systems*, 149, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.09.002>
- Khoiri, I., Radian, & Abdurrahman, T. (2025). DRIS analysis of nutrient balance for high-yielding oil palm plantations in peatlands. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 30(4), 754–764. <https://doi.org/10.18343/jipi.30.4.754>
- Lim, Y. L., Tenorio, F. A., Monzon, J. P., Sugianto, H., Donough, C. R., Rahutomo, S., Agus, F., Slingerland, M. A., Darlan, N. H., Dwiyahreni, A. A., Farrasati, R., Mahmudah, N., Muhamad, T., Nurdwiansyah, D., Palupi, S., Pradiko, I., Saleh, S., Syarovy, M., Wiratmoko, D., & Grassini, P. (2023). Too little, too imbalanced: Nutrient supply in smallholder oil palm fields in Indonesia. *Agricultural Systems*, 210, 103729. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103729>
- McCalmont, J., Kho, L. K., Teh, Y. A., Chocholek, M., Rumpang, E., Rowland, L., Basri, M. H. A., & Hill, T. (2023). Oil palm (*Elaeis guineensis*) plantation on tropical peatland in South East Asia: Photosynthetic response to soil drainage level for mitigation of soil carbon emissions. *Science of the Total Environment*, 858, 159356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159356>
- Mubarok, H., Sudradjat, Agusta, H., & Pulunggono, H. B. (2024). Evaluation of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) productivity on peatlands based on DRIS analysis of leaf nutrient content in Siak District of Indonesia. *Australian Journal of Crop Science*, 18(6), 342–351. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.06.pne56>
- Prabowo, N. E., Foster, H. L., & Nelson, P. N. (2023). Potassium and magnesium uptake and fertiliser use efficiency by oil palm at contrasting sites in Sumatra, Indonesia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 126, 263–278. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10289-7>
- Ramachandrudu, K. R., Harsha Vardhan, K., Premalatha, R. P., & Subbanna, A. R. N. S. (2026). Climate change and oil palm: Impacts and adaptation strategies for resilient production. *Frontiers in Climate*, 8, 1862586. <https://doi.org/10.3389/fclim.2026.1862586>
- Utami, S. N. H., Kusumawardani, P. N., Maftu'ah, E., Noor, M., Masganti, Wakhid, N., Nurhayati, Sulaeman, Y., & Karolinoerita, V. (2024). Empty fruit bunch oil palm ash and biochar improved peat soil properties, NPK status on leaves, and the growth of immature oil palm plantations. *Applied and Environmental Soil Science*, 2024, 1133527. <https://doi.org/10.1155/aess/1133527>

Wulandari, R., Abas, A. A., & Abdullah, A. (2025). Understanding the impact of climate change on oil palm plantation: A systematic literature review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1621217. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1621217>