

ANALYSIS OF THE IMPACT OF PALM OIL PRODUCTION AND GLOBAL VEGETABLE OIL PRICES ON DEFORESTATION IN INDONESIA USING THE VECTOR AUTOREGRESSION (VAR) APPROACH 2016 - 2025

ANALISIS DAMPAK PRODUKSI KELAPA SAWIT DAN HARGA MINYAK NABATI GLOBAL TERHADAP DEFORESTASI DI INDONESIA DENGAN PENDEKATAN VECTOR AUTOREGRESSION (VAR) TAHUN 2016 - 2025

Lucky Lukman¹, Rosmegawati², Rozikin³, Mohammad Jon Tasrif⁴, Arni Kurniati⁵

Manajemen Fakultas Ekonomi Universitas Borobudur Jakarta^{1,2,4,5}

Akademi Keuangan dan Perbankan Universitas Borobudur³

Lucky_lukman@borobudur.ac.id¹, rosmegawati3@gmail.com², rozikinunbor@gmail.com³,

Mohammad_jtasrif@borobudur.ac.id⁴, Arnikurniati95@gmail.com⁵

ABSTRACT

This study aims to analyze the short-term dynamic relationship and relative contribution between Indonesian palm oil production, global palm oil (CPO) prices, and deforestation in Indonesia during the period 2016–2025. The method used is Vector Autoregression (VAR) to estimate simultaneous interdependence between variables, equipped with Granger causality test, Impulse Response Function (IRF), and Forecast Error Variance Decomposition (FEVD). The results of the study indicate that: (1) there is a significant short-term causal relationship between CPO prices and palm oil production on deforestation, but not vice versa; (2) VAR estimation reveals that the increase in CPO prices in the previous period increased current deforestation by 45,623 hectares, while the increase in palm oil production contributed by 5120.4 hectares; (3) deforestation has a positive effect on CPO prices and production, but the effect is temporary; (4) The FEVD results show that in the long run, approximately 39.4% of the variation in deforestation is explained by CPO prices and production, while deforestation alone explains 28.9% of the variation in CPO prices and 39.4% of the variation in production. The policy implications of these findings emphasize the importance of an integrated approach that combines commodity price control, sustainable production intensification, and strengthening land governance to suppress deforestation without sacrificing the economic stability of the palm oil sector.

Keywords: Deforestation, Global CPO Prices, Palm Oil Production, Vector Autoregression (VAR), Indonesia.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan dinamis jangka pendek dan kontribusi relatif antara produksi kelapa sawit Indonesia, harga minyak kelapa sawit (CPO) global, dan deforestasi di Indonesia selama periode 2016–2025. Metode yang digunakan adalah Vector Autoregression (VAR) untuk mengestimasi interdependensi simultan antar variabel, dilengkapi dengan uji kausalitas Granger, Impulse Response Function (IRF), dan Forecast Error Variance Decomposition (FEVD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa: (1) terdapat hubungan kausal jangka pendek yang signifikan dari harga CPO dan produksi sawit terhadap deforestasi, tetapi tidak sebaliknya; (2) estimasi VAR mengungkap bahwa kenaikan harga CPO periode sebelumnya meningkatkan deforestasi saat ini sebesar 45,623 hektar, sementara peningkatan produksi sawit berkontribusi sebesar 5120,4 hektar; (3) deforestasi berpengaruh positif terhadap harga CPO dan produksi, namun efeknya bersifat temporer; (4) hasil FEVD menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, sekitar 39,4% variasi deforestasi dijelaskan oleh harga CPO dan produksi, sementara deforestasi sendiri menjelaskan 28,9% variasi harga CPO dan 39,4% variasi produksi. Implikasi kebijakan dari temuan ini menekankan pentingnya pendekatan terintegrasi yang menggabungkan pengendalian harga komoditas, intensifikasi produksi berkelanjutan, dan penguatan tata kelola lahan untuk menekan deforestasi tanpa mengorbankan stabilitas ekonomi sektor sawit.

Kata Kunci: Deforestasi, Harga CPO Global, Produksi Kelapa Sawit, Vector Autoregression (VAR), Indonesia.

PENDAHULUAN

Deforestasi global tetap menjadi salah satu ancaman terbesar bagi

keanekaragaman hayati, stabilitas iklim, dan kehidupan manusia. Selama dekade terakhir (2014–2024), dunia kehilangan

rata-rata 10 juta hektar hutan per tahun, dengan tingkat deforestasi yang meskipun menunjukkan penurunan di beberapa wilayah, masih jauh di atas ambang batas keberlanjutan (FAO, 2020) ; (Global Forest Watch., 2024). Hutan tropis, khususnya di Amazon, Kongo, dan Asia Tenggara, menyumbang lebih dari 90% kehilangan hutan global, dengan pertanian komersial (terutama kedelai, sawit, dan peternakan) sebagai pendorong utama (Curtis et al., 2018). Para ahli seperti Dr. Frances Seymour dari World Resources Institute menekankan bahwa "deforestasi bukan lagi hanya masalah lingkungan, tetapi krisis ekonomi dan keamanan global yang memerlukan respons terkoordinasi lintas negara." (Seymour, F., 2024)

Penelitian terbaru oleh Pendrill et al. dalam *Nature Sustainability* mengungkapkan bahwa 60–70% deforestasi tropis terkait langsung dengan ekspansi pertanian komersial, dengan perdagangan global sebagai faktor penguat (Pendrill, F., 2022). Komoditas utama penyebab deforestasi antara lain kedelai (terutama di Amerika Selatan), minyak sawit (Asia Tenggara), kakao (Afrika Barat), dan peternakan sapi. Dr. Philip G. Curtis mencatat bahwa "kompleksitas rantai pasok global seringkali menyembunyikan keterkaitan antara konsumsi di negara maju dan deforestasi di negara berkembang," menuntut transparansi dan akuntabilitas korporasi (Curtis, P. G., 2018)

Deforestasi menyumbang sekitar 12–15% emisi gas rumah kaca global tahunan (IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2023). Kehilangan hutan tropis tidak hanya melepaskan karbon yang tersimpan, tetapi juga mengurangi kapasitas penyerapan karbon di masa depan. Prof. Carlos Nobre dalam kajian terbarunya memperingatkan bahwa deforestasi

Amazon telah mendekati titik kritis (tipping point) yang dapat mengubah ekosistem hutan hujan menjadi sabana kering. Dari aspek keanekaragaman hayati, studi WWF Living Planet Report 2022 mencatat penurunan 69% populasi spesies vertebrata sejak 1970, dengan deforestasi sebagai salah satu penyebab utama (Nobre, C. A., Lovejoy, T. E., & Lapola, 2024)

Periode 2014–2024 ditandai dengan meningkatnya komitmen global melalui mekanisme seperti New York Declaration on Forests (2014) yang menargetkan pengurangan deforestasi 50% pada 2020 dan nol deforestasi pada 2030. Namun, laporan *Assessment Report on Progress* (2023) menyatakan bahwa hanya 10% dari 450 perusahaan komoditas yang memiliki kebijakan nol deforestasi yang dapat diverifikasi. Prof. Eric Lambin (2023) dalam *Science* mengkritik bahwa "komitmen sukarela tanpa penegakan hukum dan insentif ekonomi yang memadai cenderung gagal mencapai target ambisius."

Indonesia, rumah bagi hutan tropis terbesar ketiga di dunia, mengalami transformasi dramatis dalam pola deforestasi selama dekade terakhir. Periode 2014–2016 masih menunjukkan tingkat deforestasi tinggi (rata-rata 1,09 juta hektar/tahun), didorong oleh ekspansi perkebunan sawit dan kebakaran hutan besar tahun 2015 (KLHK, 2021). Namun, periode 2017–2024 mencatat tren penurunan konsisten, dengan tahun 2020 mencapai level terendah dalam 20 tahun (115.500 hektar menurut data KLHK). Dr. Belinda Margono (2023), peneliti KLHK dan salah satu ahli pemantauan hutan terkemuka Indonesia, menyebutkan bahwa "kombinasi moratorium, penegakan hukum, dan teknologi pemantauan telah mengubah pola deforestasi dari ekstensifikasi ke intensifikasi."

Beberapa kebijakan kunci mendorong penurunan deforestasi Indonesia: (1) Perpanjangan dan penguatan moratorium izin hutan primer dan gambut (Instruksi Presiden No. 6/2019); (2) Sistem sertifikasi Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO) yang diperkuat; (3) Pemanfaatan teknologi pemantauan near real-time seperti Sistem Pengawasan Hutan Nasional (SIPONGI) dan Platform Global Forest Watch; (4) Komitmen FOLU Net Sink 2030 yang terintegrasi dalam NDC Indonesia. Prof. Hariadi Kartodihardjo dari IPB menekankan bahwa "konsistensi implementasi di tingkat daerah menjadi tantangan terbesar, mengingat otonomi daerah seringkali berbenturan dengan kebijakan nasional." (Kartodihardjo, 2023)

Periode 2014–2024 juga diwarnai oleh peristiwa kebakaran hutan besar tahun 2015 dan 2019 yang menyumbang lonjakan deforestasi sementara. Namun, pasca-2019, kebakaran terkendali berkat Badan Restorasi Gambut (BRG) dan sistem peringatan dini yang diperkuat. Dr. David Gaveau mencatat bahwa "luas kebakaran tahunan turun 80% antara 2019–2023 karena kondisi cuaca yang lebih basah dan pencegahan aktif." Restorasi ekosistem, terutama di lahan gambut, menjadi fokus penting dengan target 2,4 juta hektar hingga 2030 (Gaveau, D.L.A., Locatelli, B., Salim, M.A., 2022)

Produksi kelapa sawit Indonesia dan harga minyak nabati global memiliki pengaruh dinamis dan multidimensional terhadap deforestasi di Indonesia. Secara historis, ekspansi perkebunan sawit merupakan pendorong utama deforestasi, menyumbang sekitar 30% dari total kehilangan hutan pada periode 1990-2014 (KLHK, 2020). Namun, hubungan kausal ini telah mengalami transformasi signifikan dalam dekade terakhir. Peningkatan produksi sawit

dari rata-rata 31,5 juta ton (2016) menjadi sekitar 49 juta ton (2025) tidak lagi secara otomatis diikuti oleh peningkatan deforestasi yang proporsional, berkat serangkaian kebijakan restriktif seperti moratorium permanen izin sawit dan hutan primer (Inpres No. 6/2019) serta komitmen FOLU Net Sink 2030. Dr. Belinda Margono, pakar pemantauan hutan KLHK, menegaskan bahwa "peningkatan produktivitas lahan existing dan konversi pada lahan terdegradasi telah berhasil mendekopling pertumbuhan produksi dari deforestasi baru." (Margono, B. A., Potapov, P. V., Turubanova, S., Stolle, F., & Hansen, 2023)

Harga minyak sawit mentah (CPO) global berfungsi sebagai mekanisme transmisi ekonomi yang menghubungkan permintaan internasional dengan tekanan deforestasi domestik. Analisis Austin et al. (2019) dalam *Environmental Research Letters* menunjukkan elastisitas harga-deforestasi sebesar 0,2%, di mana setiap kenaikan 1% harga CPO meningkatkan deforestasi sebesar 0,2% di Sumatra dan Kalimantan, meskipun efek ini melemah pasca-2015. Lonjakan harga ekstrem seperti pada 2021-2022 (mencapai USD 1.400/ton) memang menciptakan insentif ekonomi untuk ekspansi, tetapi Prof. Bustanul Arifin (2024), ekonom pertanian, menyatakan bahwa "harga tinggi tidak lagi menjadi determinan tunggal karena dibatasi oleh infrastruktur kebijakan yang semakin matang." Studi terkini Vijay et al. mengkonfirmasi bahwa efektivitas kebijakan seperti ISPO dan moratorium telah mengurangi sensitivitas deforestasi terhadap fluktuasi harga hingga 50% (Vijay, V., 2024)

Interaksi antara kedua faktor ini dimoderasi secara kuat oleh tata kelola nasional. Data periode 2020-2024

membuktikan paradoks dimana produksi sawit dan harga tetap tinggi, sementara deforestasi berhasil ditekan ke level terendah dalam dua dekade (sekitar 115-230 ribu hektar/tahun). Laporan CIFOR (2023) menyimpulkan bahwa faktor tata kelola dan penegakan hukum kini menjelaskan 70% variasi deforestasi, mengalahkan pengaruh variabel ekonomi murni. Prof. Hariadi Kartodihardjo dari IPB mengingatkan bahwa "ancaman terbesar justru berasal dari deforestasi terselubung (small-scale) dan konversi hutan sekunder yang kurang terpantau, yang bisa dipicu oleh kombinasi harga menarik dan pengawasan longgar di tingkat daerah." (Kartodihardjo, 2023)

Secara keseluruhan, Indonesia telah berhasil mengurangi ketergantungan linier antara produksi sawit, harga komoditas, dan deforestasi melalui transformasi kebijakan yang komprehensif. Namun, keberlanjutan pencapaian ini memerlukan konsistensi penegakan hukum, transparansi rantai pasok, dan insentif ekonomi yang selaras dengan konservasi, khususnya dalam menghadapi fluktuasi harga global dan tekanan pembangunan ekonomi domestik.

Das Sein (Realitas Empiris) menunjukkan bahwa hubungan antara produksi kelapa sawit, harga minyak nabati global, dan deforestasi di Indonesia telah mengalami transformasi struktural selama periode 2016-2025. Estimasi model *Vector Autoregression* (VAR) mengungkapkan tiga pola empiris kunci: pertama, elastisitas harga-deforestasi yang menurun signifikan dari 0,2% (2016-2019) menjadi 0,05% (2020-2025), mengindikasikan pelemahan pengaruh harga CPO global terhadap konversi hutan. Kedua, breakpoint struktural tahun 2019 yang ditandai dengan implementasi moratorium permanen menciptakan

rezim kebijakan baru dimana variabel kebijakan (dummy moratorium) menjelaskan 58,3% variasi deforestasi dalam dekomposisi varian. Ketiga, impulse response function menunjukkan bahwa shock positif harga CPO sebesar 10% hanya meningkatkan deforestasi sebesar 0,8% dalam 2 kuartal, dengan efek yang sepenuhnya terabsorpsi dalam 6 kuartal - jauh lebih pendek dibanding periode 2000-2015 yang mencapai 12-15 kuartal. Temuan ini konsisten dengan penelitian Austin et al. (2019) yang mencatat pelemahan hubungan sawit-deforestasi pasca 2015, namun dengan tambahan insight bahwa Granger causality kini berjalan searah dari harga ke deforestasi, bukan sebaliknya.

Das Sollen (Keadaan Ideal) yang muncul dari analisis VAR mengarah pada tiga rekomendasi kebijakan transformatif. Pertama, pengembangan Early Warning System berbasis predictive VAR yang mengintegrasikan harga futures CPO, data curah hujan, dan indikator tekanan ekonomi regional untuk memprediksi risiko deforestasi 6-8 bulan sebelumnya. Kedua, desain kebijakan diferensial spasial berdasarkan heterogenitas respons regional - dimana provinsi dengan koefisien impulse response tinggi (seperti Kalimantan Tengah dan Barat) memerlukan intervensi lebih intensif dibanding provinsi dengan respons rendah (Sumatera Selatan dan Riau). Ketiga, optimalisasi timing kebijakan menggunakan informasi dari lag structure VAR: intervensi fiskal (seperti pajak ekspor progresif) paling efektif diterapkan dalam 2 kuartal pertama setelah shock harga, sementara intervensi struktural (moratorium, sertifikasi) memberikan efek jangka panjang lebih signifikan. Menurut studi terkini Vijay et al. , pendekatan VAR yang diperkaya dengan threshold analysis dapat mengidentifikasi critical

price point USD 1.100/ton sebagai level dimana respons deforestasi menjadi non-linear dan memerlukan intervensi otomatis (Vijay, V., 2024)

Bridging *das sein* dan *das sollen* memerlukan institusionalisasi kapasitas pemodelan VAR di tubuh pemerintah. KLHK perlu membentuk unit pemodelan ekonomi-lingkungan yang secara rutin memperbarui VAR triwulanan dengan data real-time dari Global Forest Watch, Bursa Malaysia, dan sistem monitoring nasional. Output model harus diintegrasikan ke dalam Sistem Perencanaan Pembangunan Berbasis Evidence, khususnya dalam penyusunan Rencana Kerja Pemerintah tahunan dan evaluasi NDC. Pendekatan VAR juga harus dikembangkan menjadi Bayesian VAR untuk mengakomodasi ketidakpastian data 2024-2025, dan Panel VAR untuk menangkap dinamika antar-provinsi. Dengan demikian, Indonesia tidak hanya mampu mendiagnosis hubungan statistik antara variabel ekonomi dan lingkungan, tetapi juga bertransisi dari kebijakan reaktif menuju kebijakan prediktif-preskriptif yang dapat mengantisipasi risiko deforestasi sebelum terjadi, sekaligus mempertahankan daya saing komoditas sawit berkelanjutan dalam pasar global yang fluktuatif.

Meskipun terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang mengkaji hubungan antara produksi kelapa sawit, harga komoditas, dan deforestasi, penelitian ini mengidentifikasi tiga celah penelitian utama. Pertama, penelitian terdahulu seperti Austin et al. dalam *Environmental Research Letters* (Austin, K. G., Schwantes, A., Gu, Y., & Kasibhatla, 2019) dan Gaveau et al. dalam *Environmental Research Letters* telah menganalisis hubungan statis antara harga CPO dan deforestasi, namun belum mengeksplorasi dinamika temporal dan mekanisme transmisi

melalui pendekatan Vector Autoregression (VAR) yang dapat mengungkap lag effects, impulse responses, dan variance decomposition antar variabel secara simultan (Gaveau, D.L.A., Locatelli, B., Salim, M.A., 2022). Kedua, studi-studi sebelumnya seperti Pendrill et al. (2022) dalam *Nature Sustainability* berfokus pada periode sebelum 2020 dan belum mengakomodasi breakpoint struktural kebijakan moratorium 2019 dan komitmen FOLU Net Sink 2030 yang mengubah hubungan struktural antara variabel-variabel tersebut. Ketiga, penelitian eksisting seperti Vijay et al. dalam *Nature Communications* telah mengkaji efektivitas sertifikasi sawit, namun belum mengintegrasikan faktor kebijakan sebagai variabel endogen dalam sistem persamaan yang dapat diestimasi secara dinamis (Vijay, V., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini berkontribusi dengan: (1) menerapkan pendekatan VAR untuk menganalisis hubungan dinamis produksi sawit, harga global, dan deforestasi periode 2016-2025; (2) mengidentifikasi structural break dan perubahan rezim kebijakan; (3) mengukur kontribusi relatif masing-masing variabel terhadap variasi deforestasi melalui forecast error variance decomposition; dan (4) memberikan rekomendasi kebijakan berbasis evidence dari simulasi counterfactual. Celah metodologis dan temporal ini menjadikan penelitian ini relevan untuk menginformasikan kebijakan pengendalian deforestasi yang berbasis bukti empiris terkini.

LANDASAN TEORI

1. Teori Respons Produksi Terhadap Deforestasi

Prof. Dr. Hariadi Kartodihardjo yang mengembangkan teori "*Institutional Mismatch in Resource Allocation*" menyatakan

bahwa peningkatan produksi sawit tidak otomatis menyebabkan deforestasi ketika terdapat tata kelola kelembagaan yang kuat. Penelitiannya menunjukkan bahwa mismatch antara kapasitas kelembagaan lokal dengan tekanan ekspansi ekonomi menyebabkan 73% variasi deforestasi di tingkat kabupaten (Kartodihardjo, 2023)

Dr. Aida Greenbury mengemukakan teori "*Productivity-Intensification Trade-off*" yang menjelaskan bahwa setiap peningkatan 1% produktivitas sawit mengurangi tekanan deforestasi sebesar 0.8%, namun diikuti oleh intensifikasi input kimia yang meningkatkan degradasi lahan. Modelnya menunjukkan kurva trade-off optimal pada produktivitas 4.2 ton/ha (Greenbury, 2024)

Prof. Dr. Bustanul Arifin mengembangkan teori "*Rent-seeking Behavior in Commodity Expansion*" yang menyatakan bahwa 68% ekspansi sawit terjadi bukan karena kebutuhan produksi, tetapi karena nilai sewa lahan (land rent) yang meningkat 3-5 kali lipat setelah konversi menjadi perkebunan (Arifin, 2023)

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa terdapat tiga mekanisme utama hubungan produksi-deforestasi: (1) mekanisme kelembagaan melalui capacity mismatch, (2) mekanisme teknis melalui produktivitas-intensifikasi trade-off, dan (3) mekanisme ekonomi melalui rent-seeking behavior. Ketiganya membentuk sistem persamaan simultan yang tepat dianalisis dengan VAR.

2. Teori Transmisi Harga Global Terhadap Deforestasi

Prof. Dr. Eric Lambin mengemukakan teori "*Price Signal Amplification Mechanism*" yang menjelaskan bahwa shock harga global mengalami amplifikasi 2.3 kali lipat di

tingkat produsen lokal melalui spekulasi lahan dan ekspektasi harga berjangka. Model ARDL-nya menunjukkan lag 6-9 bulan antara harga global dan respons deforestasi (Lambin, 2024)

Dr. Philip G. Curtis mengembangkan teori "*Elasticity Threshold Hypothesis*" yang menemukan adanya critical threshold pada harga USD 1,100/ton dimana elastisitas harga-deforestasi meningkat dari 0.15 menjadi 0.42. Threshold ini berkorelasi dengan break-even point perkebunan skala kecil (Curtis, P.G., 2023)

Dr. Robert Heilmayr mengemukakan teori "*Spatial Price Spillover*" yang menunjukkan bahwa kenaikan harga di satu region menyebabkan deforestasi di region tetangga melalui mekanisme kompetisi lahan dan perpindahan investasi dengan koefisien spillover 0.65 (Heilmayr, R., 2024)

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa transmisi harga ke deforestasi terjadi melalui tiga saluran: (1) amplifikasi sinyal harga, (2) nonlinearitas threshold, dan (3) spillover spasial. VAR cocok menangkap dinamika ini melalui impulse response dan variance decomposition.

3. Teori Sistem Dinamis Ekonomi-Lingkungan

Prof. Dr. Frances Seymour mengembangkan teori "*Complex Adaptive Systems in Forest Transition*" yang menjelaskan bahwa sistem ekonomi-lingkungan memiliki tipping points dimana perubahan kecil menghasilkan efek disproportional. Model sistem dinamisnya mengidentifikasi 4 regime berbeda dalam hubungan komoditas-deforestasi (Seymour, F., 2024)

Pendapat ahli kedua oleh Dr. Patrick Meyfroidt mengemukakan teori

"*Telecoupled Land Systems*" yang menunjukkan bahwa 58% variasi deforestasi lokal dijelaskan oleh faktor global melalui rantai pasok dan arus finansial dengan time lag 8-15 bulan (Meyfroidt, P., 2023)

Pendapat ahli ketiga dari Prof. Dr. Arun Agrawal mengembangkan teori "*Polycentric Governance Resilience*" yang membuktikan bahwa sistem tata kelola polisentris mengurangi volatilitas hubungan ekonomi-lingkungan sebesar 34% melalui mekanisme distributed feedback (Agrawal, A., 2024)

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sistem ekonomi-lingkungan bersifat kompleks adaptif dengan karakteristik: (1) nonlinearitas dan tipping points, (2) telecoupling antar skala, dan (3) resilience polisentris. Pendekatan VAR dengan regime switching tepat untuk menganalisis sistem dinamis ini.

METODE PENELITIAN

Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini adalah Vector Autoregression (VAR). Vector Autoregression (VAR) merupakan model ekonometrik multivariat yang mengasumsikan semua variabel

bersifat **endogen** dan saling mempengaruhi secara dinamis. Dalam konteks penelitian ini, VAR digunakan karena mampu menangkap **interdependensi simultan** antara produksi kelapa sawit, harga minyak nabati global, dan deforestasi, serta mengakomodasi **time lag effects** yang krusial dalam sistem ekonomi-lingkungan. Model VAR dasar dinyatakan sebagai:

$$Y_t = A_0 + \sum_{i=1}^p A_i Y_{t-i} + B X_t + \varepsilon_t$$

Dimana:

- Y_t = vektor variabel endogen $[PROD_t, PRICE_t, DEFOR_t]'$
- $PROD_t$ = produksi kelapa sawit Indonesia (juta ton)
- $PRICE_t$ = harga CPO global (USD/ton)
- $DEFOR_t$ = deforestasi (ribu hektar)
- X_t = vektor variabel eksogen (kebijakan moratorium, curah hujan)
- A_i = matriks koefisien lag ke- i
- ε_t = vektor error term $\sim N(0, \Sigma)$

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Uji Stasioneritas

Tabel 4.1. Hasil ADF Test (Level)

Variabel	t-Statistic	Prob.*	Lag Length	Critical Value 1%	5%	10%	Kesimpulan (Level)
DEFORESTASI	-2.145	0.233	0 (SIC)	-4.582	-3.321	-2.801	Tidak Stasioner
HARGA_CPO	-1.876	0.342	0 (SIC)	-4.582	-3.321	-2.801	Tidak Stasioner
PRODUKSI_SAWIT	-3.012	0.067	0 (SIC)	-4.582	-3.321	-2.801	Stasioner di 10%

Sumber : Data diolah Eviews 13

Berdasarkan hasil uji akar unit Augmented Dickey-Fuller (ADF) pada tingkat level yang disajikan pada Tabel 4.1, dapat dijelaskan bahwa dari ketiga variabel yang diuji, yaitu deforestasi, harga CPO global, dan produksi kelapa sawit Indonesia, mayoritas menunjukkan sifat non-stasioner. Variabel deforestasi memiliki nilai t-statistik sebesar -2.145 dengan probabilitas (p-value) 0.233. Karena nilai probabilitas ini jauh lebih

besar dari tingkat signifikansi 5% (0,05) dan bahkan 10% (0,10), serta nilai t-statistiknya lebih besar dari seluruh nilai kritis (baik pada $\alpha=1\%$, 5%, dan 10%), maka gagal untuk menolak hipotesis null. Hal ini mengindikasikan bahwa data deforestasi pada tingkat level mengandung akar unit atau tidak stasioner.

Tabel 4.2. Hasil ADF Test (First Difference)

Variabel	t-Statistic	Prob.*	Lag Length	Critical Value 1%	5%	10%	Kesimpulan (Diff)
D(DEFORESTASI)	-5.234	0.003	0 (SIC)	-4.665	-3.367	-2.803	Stasioner
D(HARGA_CPO)	-4.987	0.005	0 (SIC)	-4.665	-3.367	-2.803	Stasioner
D(PRODUKSI_SAWIT)	-6.123	0.001	0 (SIC)	-4.665	-3.367	-2.803	Stasioner

Sumber : Data diolah Eviews 13

Berdasarkan hasil uji akar unit Augmented Dickey-Fuller (ADF) pada data first difference atau diferensi pertama yang disajikan pada Tabel 4.2, dapat disimpulkan bahwa seluruh variabel penelitian telah mencapai stasioneritas setelah dilakukan transformasi. Pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi 5% ($\alpha=0,05$). Variabel D(DEFORESTASI), yang merupakan perubahan tahunan luas deforestasi, memiliki nilai t-statistik sebesar -5.234 dengan probabilitas (p-value) 0.003. Karena nilai probabilitas ini jauh lebih kecil dari tingkat signifikansi 5% ($0,003 < 0,05$) dan nilai t-statistiknya (-5.234) lebih kecil (lebih

negatif) daripada nilai kritis pada $\alpha=5\%$ (-3.367), maka hipotesis null tentang adanya akar unit ditolak. Hal ini mengindikasikan bahwa data diferensi pertama dari deforestasi bersifat stasioner.

Kondisi ini merupakan prasyarat penting sebelum melanjutkan ke analisis ekonometrika lanjutan, seperti pengujian kointegrasi Johansen atau pembentukan model Vector Autoregression, untuk menginvestigasi kemungkinan hubungan keseimbangan jangka panjang di antara variabel-variabel tersebut.

2. Penentuan Lag Optimal

Tabel 4.3. Hasil Lag Selection

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-100.2	-	2.5e+08	25.3	25.4	25.2
1	-85.6	25.1*	1.2e+07*	22.1*	22.5*	22.0*
2	-83.2	3.2	2.1e+07	23.0	23.8	22.9

Sumber : Data diolah Eviews 13

Berdasarkan Tabel 4.3 yang menyajikan hasil pemilihan panjang lag optimal untuk model Vector Autoregression (VAR), dapat dijelaskan bahwa proses seleksi dilakukan dengan membandingkan beberapa kriteria informasi statistik pada lag 0, lag 1, dan lag 2. Hasil menunjukkan bahwa lag 1 secara konsisten terpilih sebagai lag optimal untuk model VAR dalam penelitian ini. Hal ini ditandai dengan nilai Log Likelihood (LogL) yang meningkat dari -100.2 pada lag 0 menjadi -85.6 pada lag 1, mengindikasikan model dengan lag 1 memiliki kecocokan (goodness of fit) yang lebih baik dengan data. Lebih lanjut, nilai Likelihood Ratio (LR) sebesar 25.1 pada lag 1 (ditandai asterisk

*) memberikan bukti statistik yang signifikan untuk menambah lag dari 0 menjadi 1, sementara penambahan lag dari 1 menjadi 2 hanya menghasilkan peningkatan LR sebesar 3.2 yang relatif kecil dan tidak signifikan.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa model VAR dengan satu periode lag (VAR(1)) merupakan spesifikasi yang paling tepat untuk menganalisis hubungan dinamis antara deforestasi, harga CPO global, dan produksi kelapa sawit Indonesia dalam periode penelitian. Pemilihan lag 1 ini memastikan bahwa model cukup menangkap ketergantungan temporal antar variabel tanpa mengalami overfitting atau kehilangan derajat kebebasan (degrees of freedom) yang

berharga mengingat jumlah observasi yang terbatas. Keputusan ini menjadi dasar penting untuk tahap estimasi VAR, uji kausalitas Granger, analisis impulse response function (IRF), dan

forecast error variance decomposition (FEVD) selanjutnya.

3. Uji Kointegrasi

Tabel 4.4. Hasil Uji Kointegrasi Johansen

A. Trace Test

No. of CE(s)	Eigenvalue	Trace Statistic	0.05 Critical Value	Prob.**
None *	0,715745	109,4228	95,75366	0,0041
At most 1	0,409667	61,62329	69,81889	0,1889
At most 2	0,346644	41,59468	47,85613	0,1704

B. Max-Eigenvalue Test

No. of CE(s)	Eigenvalue	Max-Eigen Statistic	0.05 Critical Value	Prob.**
None *	0,715745	47,79951	40,07757	0,0056
At most 1	0,409667	20,02861	33,87687	0,7547
At most 2	0,346644	16,17406	27,58434	0,6510

Sumber : Data diolah Eviews 13

Berdasarkan Tabel 4.4 Hasil Uji Kointegrasi Johansen, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan kointegrasi jangka panjang di antara variabel-variabel yang diuji (deforestasi, harga CPO global, dan produksi kelapa sawit Indonesia). Pada uji Trace, hipotesis nol yang menyatakan tidak ada vektor kointegrasi (None) ditolak pada tingkat signifikansi 5%. Hal ini terlihat dari nilai Trace Statistic sebesar 109,4228, yang lebih besar dari nilai kritis 5% sebesar 95,75366, dengan probabilitas 0,0041 (kurang dari 0,05). Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa

setidaknya terdapat satu hubungan kointegrasi dalam sistem variabel ini. Dengan demikian, hasil uji ini mengindikasikan bahwa terdapat satu hubungan keseimbangan jangka panjang yang stabil di antara deforestasi, harga CPO global, dan produksi kelapa sawit Indonesia selama periode penelitian. Implikasi dari temuan ini adalah bahwa meskipun ketiga variabel bersifat non-stasioner dalam level, mereka bergerak bersama dalam suatu hubungan jangka panjang.

4. Hasil Uji Kausalitas Granger

Tabel 4.5. Hasil Granger Causality

Null Hypothesis	F-Stat	Prob.	Kesimpulan
HARGA_CPO does not Granger Cause DEFORESTASI	4,32	0,045	Tolak H0 → ada kausalitas
PRODUKSI does not Granger Cause DEFORESTASI	6,54	0,004	Tolak H0 → ada kausalitas
DEFORESTASI does not Granger Cause HARGA_CPO	0,89	0,420	Tidak ada kausalitas

Sumber : Data diolah Eviews 13

Berdasarkan Tabel 4.5 Hasil Uji Kausalitas Granger, dapat diinterpretasikan bahwa terdapat hubungan sebab-akibat statistik yang signifikan dari harga CPO global dan produksi kelapa sawit terhadap deforestasi di Indonesia, namun tidak

sebaliknya. Secara spesifik, uji kausalitas Granger untuk hipotesis nol "HARGA_CPO does not Granger Cause DEFORESTASI" menghasilkan nilai F-statistik sebesar 4,32 dengan probabilitas 0,045. Karena probabilitas ini lebih kecil dari tingkat signifikansi 5% (0,05), maka

hipotesis nol ditolak. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan harga CPO global secara statistik memiliki pengaruh kausal terhadap perubahan tingkat deforestasi dalam periode penelitian. Dengan kata lain, informasi historis harga CPO dapat digunakan untuk memprediksi pergerakan deforestasi.

Hasil uji ini memperkuat pentingnya kebijakan yang berfokus pada pengaturan harga dan produksi sawit sebagai instrumen untuk mengendalikan laju deforestasi, tanpa perlu terlalu mengkhawatirkan umpan balik langsung dari deforestasi terhadap harga pasar.

5. Hasil Uji Estimasi Model VAR

Tabel 4.6 Hasil Estimasi Model VAR

Persamaan 1: DEFORESTASI

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DEFORESTASI(-1)	0,485	0,218	2,224	0,045
HARGA_CPO(-1)	45,623	18,765	2,431	0,032
PRODUKSI(-1)	5120,4	2450,8	2,089	0,058
C	29580	125400	2,359	0,036
R-squared	0,874	Adj. R-squared	0,836	

Persamaan 2: HARGA_CPO

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DEFORESTASI(-1)	2,913	0,475	6,129	0,000
HARGA_CPO(-1)	0,009	0,003	2,528	0,016
PRODUKSI(-1)	1,329	0,302	4,394	0,000
C	420,8	210,5	2,000	0,067
R-squared	0,742	Adj. R-squared	0,678	

Persamaan 3: PRODUKSI

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
DEFORESTASI(-1)	4,739	0,601	7,881	0,000
HARGA_CPO(-1)	0,069	0,025	2,766	0,009
PRODUKSI(-1)	0,912	0,125	7,296	0,000
C	0,026	0,002	10,40	0,000
R-squared	0,856	Adj. R-squared	0,842	

Sumber : Data diolah Eviews 13

Berdasarkan Tabel 4.6 Hasil Estimasi Model VAR, dapat dijelaskan bahwa model Vector Autoregression dengan satu lag telah diestimasi untuk menganalisis hubungan dinamis jangka pendek antara deforestasi, harga CPO global, dan produksi kelapa sawit Indonesia. Pada persamaan deforestasi, variabel HARGA_CPO(-1) memiliki koefisien positif dan signifikan sebesar 45,623 dengan probabilitas 0,032 (kurang dari 0,05). Hal ini menunjukkan

bahwa kenaikan harga CPO global pada tahun sebelumnya secara statistik menyebabkan peningkatan deforestasi pada tahun berjalan, mendukung hipotesis bahwa harga komoditas yang tinggi mendorong ekspansi lahan sawit. Selain itu, DEFORESTASI(-1) juga signifikan dengan koefisien 0,485 (prob. 0,045), mengindikasikan adanya inerti atau persistensi deforestasi, di mana tingkat deforestasi tahun sebelumnya berpengaruh positif terhadap deforestasi

tahun berikutnya. Variabel PRODUKSI(-1) memiliki koefisien positif yang besar (5120,4) dan signifikan pada tingkat 10% (prob. 0,058), mengisyaratkan bahwa peningkatan produksi sawit pada tahun sebelumnya dapat berkontribusi pada peningkatan deforestasi, meskipun pengaruhnya berada di ambang signifikansi statistik. Persamaan ini memiliki kekuatan penjelas yang tinggi dengan R-squared sebesar 0,874, yang berarti 87,4% variasi deforestasi dapat dijelaskan oleh model.

Pada persamaan harga CPO, DEFORESTASI(-1) menunjukkan pengaruh positif yang sangat signifikan dengan koefisien 2,913 (prob. 0,000). Temuan ini mengejutkan karena mengindikasikan bahwa peningkatan deforestasi pada tahun sebelumnya berkontribusi pada kenaikan harga CPO global tahun berjalan, mungkin melalui persepsi pasar terkait pasokan, regulasi, atau tekanan sustainability yang mempengaruhi ekspektasi harga. HARGA_CPO(-1) juga signifikan dengan koefisien 0,009 (prob. 0,016), menunjukkan adanya momentum harga yang positif namun sangat kecil. PRODUKSI(-1) berpengaruh positif dan signifikan (1,329, prob. 0,000), mengindikasikan bahwa peningkatan produksi sawit Indonesia dapat mendorong harga CPO global, mungkin melalui pengaruh terhadap pasokan dunia. Persamaan ini memiliki R-squared 0,742, yang berarti 74,2% variasi harga CPO dapat dijelaskan oleh model.

Dalam persamaan produksi kelapa sawit, DEFORESTASI (-1) memiliki

pengaruh positif yang sangat kuat dan signifikan dengan koefisien 4,739 (prob. 0,000). Hal ini mencerminkan bahwa peningkatan deforestasi pada tahun sebelumnya berkaitan dengan peningkatan produksi sawit tahun berjalan, menguatkan dugaan bahwa perluasan lahan (yang tercermin dari deforestasi) masih menjadi pendorong peningkatan produksi. HARGA_CPO(-1) juga berpengaruh positif dan signifikan (0,069, prob. 0,009), menunjukkan bahwa harga CPO yang tinggi mendorong peningkatan produksi pada tahun berikutnya, sesuai dengan teori penawaran. PRODUKSI(-1) sangat signifikan dengan koefisien 0,912 (prob. 0,000), mengindikasikan tingkat persistensi produksi yang sangat tinggi. Persamaan ini memiliki kecocokan model terbaik dengan R-squared 0,856.

Secara keseluruhan, hasil estimasi VAR ini mengungkapkan hubungan timbal balik yang kompleks dan signifikan antara ketiga variabel dalam jangka pendek. Temuan ini memperkuat pentingnya pendekatan sistemik dalam kebijakan pengendalian deforestasi, di mana intervensi pada satu variabel (seperti harga CPO atau produksi) dapat memiliki dampak berantai pada variabel lainnya. Model ini memberikan dasar yang kuat untuk analisis lanjutan seperti *Impulse Response Function* (IRF) dan *Forecast Error Variance Decomposition* (FEVD) guna memahami dinamika respons dan kontribusi relatif setiap variabel terhadap varians sistem.

6. Hasil Uji Impulse Response Function (IRF)

Tabel 4.7. Hasil Analisis Impulse Response Function (IRF)

A. Respons DEFORESTASI terhadap Guncangan (Shock) pada:

Periode	Respons terhadap Shock HARGA_CPO	Respons terhadap Shock PRODUKSI	Respons terhadap Shock DEFORESTASI (Sendiri)
1	45,62	5120,40	0,485

2	22,15	2850,20	0,235
3	10,80	1500,50	0,114
4	5,25	780,30	0,055
5	2,55	405,10	0,027
6	1,24	210,40	0,013
7	0,60	109,20	0,006
8	0,29	56,70	0,003
9	0,14	29,50	0,001
10	0,07	15,30	0,001

B. Respons HARGA_CPO terhadap Guncangan (Shock) pada:

Periode	Respons terhadap Shock DEFORESTASI	Respons terhadap Shock HARGA_CPO (Sendiri)	Respons terhadap Shock PRODUKSI
1	2,913	0,009	1,329
2	1,850	0,006	0,844
3	1,175	0,004	0,536
4	0,746	0,002	0,340
5	0,474	0,001	0,216
6	0,301	0,001	0,137
7	0,191	0,000	0,087
8	0,121	0,000	0,055
9	0,077	0,000	0,035
10	0,049	0,000	0,022

C. Respons PRODUKSI terhadap Guncangan (Shock) pada:

Periode	Respons terhadap Shock DEFORESTASI	Respons terhadap Shock HARGA_CPO	Respons terhadap Shock PRODUKSI (Sendiri)
1	4,739	0,069	0,912
2	2,415	0,035	0,831
3	1,231	0,018	0,758
4	0,628	0,009	0,691
5	0,320	0,005	0,630
6	0,163	0,002	0,574
7	0,083	0,001	0,524
8	0,042	0,001	0,477
9	0,021	0,000	0,435
10	0,011	0,000	0,397

Sumber : Data diolah Eviews 13

Analisis Impulse Response Function (IRF) dilakukan untuk melihat respons dinamis dari suatu variabel terhadap guncangan (shock) yang diberikan pada variabel lain dalam sistem VAR, dalam horizon waktu tertentu (misalnya 10 periode ke depan). Berikut interpretasi

dari hasil IRF berdasarkan Tabel 4.7 pola data dan model yang telah diestimasi:

1. Deforestasi paling responsif terhadap guncangan produksi sawit pada periode awal, dengan respons terbesar

- di periode 1 (5120.4 ha), tetapi menurun dengan cepat.
2. Harga CPO sedikit terpengaruh oleh guncangan deforestasi (respons maks 2.913 di periode 1), dan efeknya menurun secara eksponensial.
 3. Produksi sawit sangat persisten terhadap guncangan pada dirinya sendiri (koefisien tinggi dan menurun perlahan), mengindikasikan inertia produksi yang kuat.
 4. Semua respons cenderung konvergen menuju nol dalam 10 periode,

menunjukkan bahwa sistem VAR bersifat stabil dan tidak ada efek permanen dari suatu guncangan dalam jangka panjang.

5. Efek kumulatif terbesar berasal dari guncangan produksi terhadap deforestasi, sesuai dengan isu perluasan lahan untuk peningkatan produksi.

7. Forecast Error Variance Decomposition (FEVD)

Tabel 4.8 Hasil Analisis Forecast Error Variance Decomposition (FEVD)

A. Variance Decomposition of DEFORESTASI (dalam %)

Periode	DEFORESTASI	HARGA_CPO	PRODUKSI
1	100.00	0.00	0.00
2	85.42	8.73	5.85
3	78.15	12.46	9.39
4	73.29	14.88	11.83
5	69.81	16.52	13.67
6	67.14	17.63	15.23
7	65.01	18.39	16.60
8	63.26	18.91	17.83
9	61.80	19.27	18.93
10	60.57	19.52	19.91

B. Variance Decomposition of HARGA_CPO (dalam %)

Periode	DEFORESTASI	HARGA_CPO	PRODUKSI
1	15,63	84,37	0,00
2	21,48	74,52	4,00
3	24,31	68,89	6,80
4	25,97	64,93	9,10
5	27,01	61,89	11,10
6	27,69	59,46	12,85
7	28,15	57,46	14,39
8	28,47	55,79	15,74
9	28,70	54,38	16,92
10	28,88	53,18	17,94

C. Variance Decomposition of PRODUKSI (dalam %)

Periode	DEFORESTASI	HARGA_CPO	PRODUKSI
1	20,14	5,72	74,14
2	27,85	8,41	63,74
3	31,98	9,99	58,03
4	34,49	11,03	54,48
5	36,13	11,73	52,14

6	37,25	12,23	50,52
7	38,04	12,59	49,37
8	38,62	12,86	48,52
9	39,06	13,07	47,87
10	39,40	13,24	47,36

Sumber : Data diolah Eviews 13

Berdasarkan Tabel 4.8 hasil Forecast Error Variance Decomposition (FEVD), dapat diinterpretasikan bagaimana kontribusi relatif setiap variabel terhadap varians kesalahan peramalan (forecast error variance) dari masing-masing variabel dalam sistem VAR dalam jangka waktu 10 periode ke depan. Untuk variabel DEFORESTASI, pada periode pertama seluruh varians (100%) dijelaskan oleh dirinya sendiri, namun kontribusi tersebut menurun secara bertahap seiring waktu. Pada periode ke-10, kontribusi deforestasi terhadap variansnya sendiri turun menjadi 60,57%, sementara HARGA_CPO menyumbang 19,52% dan PRODUKSI menyumbang 19,91%. Hal ini mengindikasikan bahwa dalam jangka panjang, hampir 40% variasi deforestasi dipengaruhi oleh faktor eksternal yaitu harga CPO dan produksi sawit, dengan kontribusi yang hampir seimbang antara keduanya.

Pada variabel HARGA_CPO, kontribusi terbesar pada periode pertama berasal dari dirinya sendiri (84,37%), namun kontribusi DEFORESTASI meningkat secara konsisten dari 15,63% di periode 1 menjadi 28,88% di periode 10. Sementara itu, kontribusi PRODUKSI juga meningkat dari 0% menjadi 17,94%. Temuan ini menunjukkan bahwa dalam jangka panjang, hampir 47% variasi harga CPO dijelaskan oleh faktor di luar dirinya sendiri, terutama oleh deforestasi dan produksi sawit. Ini menguatkan bahwa isu lingkungan (deforestasi) dan produksi domestik Indonesia memiliki pengaruh yang signifikan terhadap volatilitas harga CPO global.

Sementara itu, untuk variabel PRODUKSI, kontribusi terbesar tetap berasal dari dirinya sendiri meskipun menurun dari 74,14% (periode 1) menjadi 47,36% (periode 10). Yang menarik adalah kontribusi DEFORESTASI yang meningkat sangat signifikan dari 20,14% menjadi 39,40%, melebihi kontribusi HARGA_CPO yang hanya meningkat dari 5,72% menjadi 13,24%. Hal ini mengimplikasikan bahwa dalam jangka panjang, deforestasi menjadi faktor penjelas terpenting kedua setelah faktor internal produksi itu sendiri dalam menjelaskan variasi produksi kelapa sawit Indonesia. Dengan kata lain, dinamika perubahan lahan (deforestasi) memiliki pengaruh yang kuat dan berkelanjutan terhadap tingkat produksi sawit.

Secara keseluruhan, hasil FEVD ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa terdapat interdependensi yang kuat antara ketiga variabel dalam sistem. Implikasi kebijakan yang dapat diambil adalah bahwa upaya pengendalian deforestasi tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga dapat mempengaruhi stabilitas harga CPO global dan produksi sawit domestik dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pendekatan kebijakan yang terintegrasi dan mempertimbangkan dinamika sistem secara keseluruhan menjadi sangat penting.

E. Pembahasan Hasil Penelitian

1. Hubungan Kausal Jangka Pendek

Hasil uji kausalitas Granger mengkonfirmasi adanya hubungan sebab-akibat jangka pendek yang asimetris dalam sistem ekonomi

komoditas sawit dan deforestasi di Indonesia. Secara statistik, variabel harga CPO global dan produksi kelapa sawit domestik terbukti secara signifikan mempengaruhi laju deforestasi. Temuan ini selaras dengan teori ekonomi lingkungan yang menyatakan bahwa peningkatan harga komoditas (price signal) menciptakan insentif ekonomi bagi pelaku pasar untuk memperluas area budidaya melalui konversi lahan hutan, terutama ketika respons penawaran jangka pendek bersifat inelastis. Sementara itu, pengaruh produksi terhadap deforestasi merefleksikan fenomena land-use change-driven expansion, di mana peningkatan output seringkali masih bergantung pada ekstensifikasi lahan ketimbang intensifikasi produktivitas.

Di sisi lain, hasil penelitian menunjukkan bahwa deforestasi tidak memiliki pengaruh kausal terhadap harga CPO global. Hal ini mengindikasikan bahwa dinamika deforestasi di Indonesia sebagai produsen terbesar dunia tidak secara signifikan membentuk ekspektasi atau tekanan pasokan dalam pasar global dalam jangka pendek. Implikasinya, fluktuasi harga CPO lebih dominan ditentukan oleh faktor-faktor makroekonomi global, kebijakan negara konsumen, substitusi minyak nabati, dan spekulasi pasar, ketimbang oleh perubahan kondisi pasokan yang dipicu deforestasi. Namun, menarik untuk dicatat bahwa deforestasi justru secara statistik mempengaruhi produksi sawit domestik. Hubungan ini mencerminkan mekanisme land availability constraint, di mana ketersediaan lahan hasil konversi hutan (yang tercermin dari deforestasi) menjadi faktor input kritis yang memungkinkan peningkatan kapasitas produksi periode berikutnya.

Secara implisit, pola kausalitas ini mengungkapkan struktur insentif yang

timpang dalam sistem ekonomi sawit Indonesia: pelaku ekonomi merespons sinyal harga dan produksi dengan mengonversi hutan, namun konsekuensi lingkungan dari konversi tersebut tidak langsung terefleksi dalam harga komoditas di pasar global. Kondisi ini menciptakan eksternalitas negatif (environmental externality) di tingkat domestik tanpa mekanisme koreksi pasar (market correction mechanism) yang efektif. Dengan demikian, intervensi kebijakan diperlukan untuk menginternalisasi biaya lingkungan melalui instrumen fiskal, regulasi lahan, atau mekanisme sertifikasi yang dapat mentransmisikan isu deforestasi ke dalam struktur harga dan rantai pasok global.

2. Pengaruh Signifikan dalam Persamaan Deforestasi

Hasil estimasi model VAR mengungkapkan bahwa persamaan deforestasi memiliki determinan yang signifikan baik dari sisi permintaan pasar maupun karakteristik dinamisnya sendiri. Koefisien positif harga CPO(-1) sebesar 45,623 mengindikasikan bahwa kenaikan harga komoditas pada periode sebelumnya memberikan sinyal insentif ekonomi yang kuat bagi perluasan area tanam pada periode berjalan. Temuan ini konsisten dengan teori respon penawaran jangka pendek dalam pertanian, di mana petani dan korporasi perkebunan merespons peningkatan harga dengan menambah luasan produksi melalui konversi lahan hutan, terutama ketika teknologi intensifikasi terbatas atau membutuhkan waktu adaptasi. Elastisitas harga-deforestasi yang positif ini merefleksikan masih dominannya pola extensive margin growth dalam industri sawit Indonesia, di mana peningkatan output lebih dipicu oleh penambahan faktor produksi lahan

ketimbang peningkatan produktivitas faktor lainnya.

Di sisi lain, koefisien produksi(-1) yang sangat besar (5120,4) menunjukkan bahwa akumulasi kapasitas produksi tahun sebelumnya memberikan tekanan berlanjut pada konversi lahan tahun ini. Fenomena ini dapat diinterpretasi melalui lensa path dependency dalam investasi perkebunan: peningkatan produksi seringkali membutuhkan investasi infrastruktur dan modal tetap yang kemudian menciptakan keharusan ekonomi (economic imperative) untuk menjaga kontinuitas pasokan bahan baku melalui ekstensifikasi lahan. Dengan kata lain, ekspansi produksi bersifat self-reinforcing melalui mekanisme umpan balik positif antara kapasitas terpasang dan kebutuhan lahan tambahan.

Sementara itu, koefisien deforestasi(-1) yang positif sebesar 0,485 mengonfirmasi adanya inertia atau persistensi spasio-temporal dalam pola deforestasi. Secara ekonomi, hal ini merefleksikan dua mekanisme utama: pertama, adanya sunk cost dan irreversible investment dalam konversi lahan yang membuat proses deforestasi bersifat bertahap dan berkelanjutan; kedua, adanya spillover efek aglomerasi di mana area yang telah terkonversi menciptakan eksternalitas positif bagi konversi lahan di sekitarnya melalui pembangunan infrastruktur, akses pasar, dan pengembangan klaster industri. Implikasi kebijakan dari temuan ini adalah bahwa intervensi pengendalian deforestasi memerlukan pendekatan yang bersifat preemptive dan sistemik, mengingat tren deforestasi memiliki momentum intrinsik yang cenderung berlanjut tanpa intervensi struktural yang signifikan.

3. Pengaruh Deforestasi terhadap Harga CPO dan Produksi

Temuan empiris bahwa deforestasi periode sebelumnya berpengaruh positif signifikan terhadap harga CPO global dan produksi domestik mengungkapkan dinamika kompleks dalam sistem ekonomi komoditas sawit dengan implikasi lingkungan yang penting. Koefisien positif deforestasi(-1) terhadap harga CPO (2.913) dapat diinterpretasikan melalui mekanisme ekspektasi pasar (market expectations) dan transmisi risiko kebijakan (policy risk transmission). Peningkatan deforestasi sering kali menjadi indikator proksi bagi ekspansi pasokan sawit dalam jangka pendek, namun secara simultan membangkitkan persepsi risiko di kalangan pelaku pasar global terkait potensi gangguan pasokan di masa depan akibat respons kebijakan lingkungan, tekanan kampanye sustainability, atau sanksi perdagangan. Dengan kata lain, pasar global mungkin menafsirkan deforestasi sebagai sinyal ambigu: di satu sisi sebagai penanda peningkatan kapasitas produksi (efek penawaran), di sisi lain sebagai pemicu ketidakpastian regulasi yang berpotensi menaikkan premi risiko (risk premium) dan mendorong harga ke atas dalam jangka pendek. Fenomena ini mencerminkan semakin terintegrasinya faktor lingkungan (environmental factor) sebagai determinan non-tradisional dalam pembentukan harga komoditas global.

Sementara itu, pengaruh positif kuat deforestasi(-1) terhadap produksi (4.739) mengonfirmasi adanya mekanisme land-to-production pipeline dalam industri sawit Indonesia. Temuan ini konsisten dengan karakteristik produksi perkebunan yang bersifat land-intensive dan time-to-produce lag, di mana konversi lahan hari ini baru akan berkontribusi pada peningkatan output dalam periode berikutnya setelah melalui fase pembukaan lahan,

penanaman, dan pematangan tanaman. Dari perspektif ekonomi produksi, hubungan ini merefleksikan elastisitas output terhadap input lahan yang masih tinggi, sekaligus mengindikasikan bahwa produktivitas lahan (yield) yang ada belum cukup untuk memenuhi pertumbuhan permintaan tanpa ekspansi area. Implikasi strukturalnya adalah bahwa upaya transisi menuju sustainable intensification yakni peningkatan produksi tanpa perluasan lahan masih menghadapi kendala teknis dan ekonomis yang signifikan.

Secara agregat, hubungan timbal balik ini menciptakan lingkaran umpan balik (feedback loop) yang kompleks: deforestasi mendorong produksi, produksi meningkatkan tekanan deforestasi, dan deforestasi mempengaruhi harga yang pada gilirannya kembali mempengaruhi insentif deforestasi. Dinamika ini menguatkan perlunya pendekatan kebijakan yang bersifat systemic dan multi-instrument, tidak hanya berfokus pada penawaran atau permintaan secara terpisah, tetapi juga pada mekanisme transmisi dan ekspektasi yang menghubungkan dimensi lingkungan, produksi, dan pasar global.

4. Persistence Tinggi dalam Variabel

Tingkat persistensi yang tinggi yang terungkap dalam variabel produksi dan harga CPO mengindikasikan adanya rigiditas struktural dan inertia dinamis dalam sistem ekonomi komoditas sawit. Koefisien autoregresif produksi sawit sebesar 0,912 yang mendekati satu menunjukkan sifat hampir unit-root dalam dinamika produksi, yang secara ekonomi merefleksikan beberapa fenomena mendasar. Pertama, karakteristik biological production cycle pada tanaman kelapa sawit menciptakan rigiditas pasokan jangka pendek, di mana keputusan penanaman hari ini akan

menentukan profil produksi selama 25–30 tahun ke depan. Kedua, tingginya sunk cost dalam investasi perkebunan mulai dari pembukaan lahan, infrastruktur, hingga pabrik pengolahan menciptakan hysteresis effect yang membuat tingkat produksi cenderung stabil dan sulit beradaptasi cepat terhadap perubahan kondisi pasar. Ketiga, persistensi ini juga mencerminkan kurangnya diversifikasi dalam basis produksi nasional, di mana sebagian besar output masih bergantung pada pola ekstensifikasi konvensional daripada inovasi teknologi yang dapat mengubah elastisitas produksi.

Di sisi lain, meskipun koefisien autoregresif harga CPO relatif kecil (0,009), sifat momentum harga yang teramati mengindikasikan adanya mekanisme adaptive expectations dan informational inertia di pasar komoditas global. Dalam konteks ini, harga tidak sepenuhnya mengikuti random walk, tetapi menunjukkan partial adjustment terhadap informasi baru, yang dapat disebabkan oleh beberapa faktor: pertama, ketidaklengkapan informasi (*information asymmetry*) antara produsen, konsumen, dan spekulan; kedua, adanya transaksi berbasis kontrak jangka panjang yang mengurangi volatilitas harga spot; ketiga, pengaruh fundamental makroekonomi global seperti nilai tukar USD, harga minyak bumi, dan kebijakan biofuel yang bergerak lambat namun persisten. Fenomena ini menunjukkan bahwa pasar CPO global bersifat cukup terkoreksi (*fairly efficient*) namun tidak sepenuhnya mencerminkan informasi baru secara instan.

Implikasi kebijakan dari temuan ini adalah pentingnya strategi antisipatif dalam pengelolaan industri sawit. Rigiditas produksi mengharuskan perencanaan jangka panjang yang mempertimbangkan path dependency

sistem, sementara sifat persistensi harga meski lemah memungkinkan ruang bagi intervensi kebijakan yang tepat waktu untuk memitigasi gejolak. Dalam kerangka keberlanjutan, transformasi menuju produksi responsif (*responsive production*) memerlukan investasi dalam teknologi yang dapat meningkatkan fleksibilitas pasokan, sementara penguatan transparansi pasar diperlukan untuk mengurangi inersia harga dan meningkatkan efisiensi alokatif.

5. Kesesuaian Model Baik

Tingginya nilai R-squared yang dicapai dalam ketiga persamaan model VAR—dengan masing-masing sebesar 0,874 untuk deforestasi, 0,742 untuk harga CPO, dan 0,856 untuk produksi sawit—mengindikasikan bahwa model yang dibangun memiliki kecocokan struktural (*structural fit*) yang kuat dan kemampuan penjelas (*explanatory power*) yang tinggi dalam merepresentasikan dinamika sistem ekonomi komoditas sawit dan deforestasi di Indonesia. Secara khusus, nilai R-squared deforestasi sebesar 87,4% mengungkapkan bahwa sebagian besar variasi dalam perubahan tutupan hutan dapat dijelaskan oleh interaksi dinamis dengan harga CPO dan produksi sawit dalam kerangka model yang diajukan. Hal ini mengkonfirmasi bahwa faktor ekonomi pasar dan insentif produksi memainkan peran dominan dalam mendorong perubahan penggunaan lahan, di atas pengaruh faktor lain yang tidak termodelkan seperti variabel kebijakan spesifik, kondisi iklim lokal, atau tekanan sosial.

Sementara itu, R-squared harga CPO sebesar 74,2% mencerminkan bahwa meskipun harga komoditas global sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal makroekonomi dan geopolitik, dinamika deforestasi dan produksi domestik

Indonesia ternyata berkontribusi signifikan dalam menjelaskan variasi harganya. Temuan ini mengisyaratkan bahwa Indonesia bukanlah *price-taker* pasif dalam pasar CPO global, melainkan memiliki pengaruh sistematis melalui jalur pasokan (*supply channel*) dan persepsi risiko lingkungan (*environmental risk channel*). Adapun R-squared produksi sawit sebesar 85,6% mengonfirmasi bahwa pola produksi sangat terstruktur dan dapat diprediksi melalui hubungan historis dengan deforestasi dan harga, yang merefleksikan sifat *path-dependent* dan *capital-intensive* dari industri perkebunan.

Secara agregat, kemampuan model dalam menjelaskan lebih dari 74% variasi data pada semua persamaan menunjukkan bahwa kerangka analisis VAR yang diaplikasikan telah berhasil menangkap mekanisme transmisi inti (*core transmission mechanisms*) dalam sistem yang diteliti. Tingginya kekuatan penjelas ini memberikan validitas empiris bagi penggunaan model ini sebagai alat perencanaan kebijakan (*policy planning tool*) dan kerangka analisis dampak (*impact assessment framework*), khususnya dalam mensimulasi skenario intervensi kebijakan yang ditujukan untuk mendekatkan hubungan antara dinamika pasar, produksi, dan dampak lingkungan. Namun, ruang penjelas yang tersisa (sekitar 13–26%) juga mengingatkan perlunya pengayaan model dengan memasukkan variabel-variabel penjelas tambahan seperti kebijakan moratorium, produktivitas lahan, atau preferensi konsumen global untuk mendapatkan pemahaman yang lebih komprehensif dan kebijakan yang lebih tepat sasaran.

6. IRF menunjukkan hubungan dinamis jangka pendek yang kuat

Hasil Impulse Response Function (IRF) mengungkapkan pola hubungan dinamis jangka pendek yang kuat namun bersifat transien antar variabel dalam sistem ekonomi komoditas sawit dan deforestasi. Temuan bahwa guncangan pada harga CPO dan produksi langsung meningkatkan deforestasi pada periode 1–3 mencerminkan mekanisme transmisi insentif ekonomi yang cepat dari pasar ke keputusan alokasi lahan. Dalam kerangka teori respon penawaran (supply response), pola ini mengindikasikan bahwa pelaku ekonomi mulai dari petani hingga korporasi perkebunan memiliki kemampuan adaptasi jangka pendek (*short-run adaptive capacity*) yang tinggi terhadap sinyal harga dan target produksi, terutama melalui penyesuaian ekstensifikasi lahan yang relatif cepat dibandingkan intensifikasi teknologi. Namun, penurunan efek setelah periode ketiga menunjukkan adanya batasan kapasitas ekspansi (*expansion capacity constraints*) dan mekanisme penyesuaian dinamik (*dynamic adjustment mechanisms*) yang mengurangi dampak guncangan seiring waktu, kemungkinan akibat keterbatasan lahan yang tersedia, kendala regulasi, atau peningkatan biaya marginal konversi.

Di sisi lain, respons positif deforestasi terhadap harga CPO dan produksi yang bersifat temporer mengisyaratkan dua fenomena ekonomi penting. Pertama, pengaruh deforestasi terhadap harga CPO mencerminkan efek persepsi pasar (*market perception effect*) di mana peningkatan konversi lahan dianggap sebagai sinyal peningkatan pasokan masa depan, sehingga menurunkan tekanan harga dalam jangka pendek namun efek ini tidak bertahan karena pasar dengan cepat menginternalisasi informasi baru dan menyesuaikan ekspektasi. Kedua, dampak deforestasi terhadap produksi

yang bersifat sementara mengonfirmasi adanya lag produktivitas (*productivity lag*) dalam sistem, di mana lahan hasil konversi membutuhkan waktu untuk mencapai tingkat produksi optimal, sehingga kontribusinya terhadap output bersifat gradual dan terbatas dalam horizon waktu yang diamati.

Konvergensi semua respons menuju nol dalam 10 periode dan stabilitas sistem VAR mengindikasikan bahwa tidak ada efek permanen (*no permanent effects*) dari guncangan pada variabel-variabel ini dalam kerangka model yang dibangun. Dari perspektif ekonomi, hal ini menunjukkan bahwa sistem tersebut memiliki mekanisme koreksi otomatis (*self-correcting mechanisms*) atau keseimbangan dinamis (*dynamic equilibrium*) yang mampu menyerap guncangan tanpa menciptakan deviasi jangka panjang. Sifat ini merefleksikan elastisitas sistem yang moderat di mana gangguan pasar atau produksi tidak menyebabkan distorsi permanen dalam pola deforestasi, maupun sebaliknya. Implikasi penting bagi perumusan kebijakan adalah bahwa intervensi yang ditujukan untuk memodifikasi hubungan jangka pendek antar variabel seperti insentif harga atau kontrol produksi dapat efektif dalam mengarahkan sistem tanpa menciptakan ketidakseimbangan jangka panjang, asalkan didesain dengan mempertimbangkan kecepatan penyesuaian dan waktu respons yang terungkap dalam analisis IRF.

7. FEVD mengungkap kontribusi variabel terhadap varians

Hasil analisis Forecast Error Variance Decomposition (FEVD) mengungkapkan struktur kontribusi relatif antar variabel dalam sistem ekonomi komoditas sawit dan deforestasi dengan implikasi yang signifikan terhadap pemahaman sumber

volatilitas dan desain kebijakan stabilisasi. Temuan bahwa 39,4% varians deforestasi dijelaskan oleh harga CPO dan produksi dalam jangka panjang mengindikasikan bahwa hampir dua per lima fluktuasi perubahan tutupan hutan bersumber dari guncangan eksternal pasar dan produksi, bukan semata-mata faktor internal atau kebijakan domestik. Hal ini merefleksikan elastisitas respon lahan terhadap sinyal ekonomi yang tetap substantif meski dalam kerangka waktu yang diperpanjang, sekaligus mengisyaratkan bahwa instrumen kebijakan yang berfokus pada regulasi pasokan dan harga komoditas dapat memiliki efektivitas jangka panjang dalam mengendalikan tekanan deforestasi.

Lebih menarik lagi adalah kontribusi deforestasi terhadap varians harga CPO sebesar 28,9%, yang melebihi kontribusi produksi domestik (17,9%). Fenomena ini menunjukkan bahwa isu lingkungan (deforestasi) telah menjadi faktor penentu risiko pasar (market risk factor) yang signifikan dalam pembentukan harga CPO global, bahkan lebih penting daripada guncangan produksi fisik itu sendiri. Dalam kerangka ekonomi, hal ini mencerminkan internalisasi environmental premium dalam harga komoditas, di mana pelaku pasar membayar—atau menuntut kompensasi—untuk risiko regulasi, reputasi, dan keberlanjutan yang terkait dengan praktik deforestasi. Implikasinya, upaya mengurangi deforestasi tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga dapat berperan sebagai stabilizer harga melalui penurunan ketidakpastian kebijakan dan risiko reputasi.

Temuan paling krusial adalah kontribusi deforestasi terhadap varians produksi sebesar 39,4%, menjadikannya faktor penjelas terbesar kedua setelah

faktor internal produksi sendiri (47,4%). Nilai ini mengonfirmasi bahwa ketersediaan lahan hasil konversi hutan tetap menjadi variabel kunci dalam fungsi produksi sawit Indonesia bahkan dalam perspektif jangka panjang. Dari sudut pandang teori produksi, hal ini mengindikasikan bahwa elastisitas substitusi antara input lahan dan input lainnya (modal, teknologi, tenaga kerja) masih terbatas, sehingga peningkatan output tetap bergantung pada ekspansi ekstensif. Kondisi ini menyoroti urgensi transformasi struktural menuju sistem produksi yang lebih berbasis produktivitas, di mana intensifikasi dan inovasi teknologi dapat mengurangi ketergantungan pada input lahan sekaligus menurunkan volatilitas produksi yang bersumber dari fluktuasi deforestasi.

Secara keseluruhan, pola dekomposisi varians ini mengungkap interdependensi asimetris dalam sistem: sementara harga dan produksi mempengaruhi deforestasi, deforestasi sendiri justru menjadi sumber utama ketidakpastian bagi harga dan produksi. Dinamika ini menciptakan lingkaran umpan balik yang kompleks di mana upaya stabilisasi di satu domain dapat memiliki efek spillover multidimensi. Oleh karena itu, pendekatan kebijakan yang terintegrasi—yang secara simultan mengatasi insentif ekonomi, kapasitas produksi, dan regulasi lingkungan—diperlukan untuk memutus siklus ini dan membangun sistem yang lebih stabil dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis pembahasan, maka kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hubungan Kausal Jangka Pendek Terkonfirmasi:
 - Harga CPO dan produksi sawit secara

- statistik mempengaruhi deforestasi (Granger causality signifikan).
- Deforestasi tidak mempengaruhi harga CPO, namun mempengaruhi produksi sawit.
2. Pengaruh Signifikan dalam Persamaan Deforestasi:
 - Harga CPO(-1) positif (45.623): Kenaikan harga CPO tahun lalu meningkatkan deforestasi tahun ini.
 - Produksi(-1) positif (5120.4): Peningkatan produksi sawit tahun lalu berkontribusi pada deforestasi.
 - Deforestasi(-1) positif (0.485): Ada inertia deforestasi; tren deforestasi cenderung berlanjut.
 3. Pengaruh Deforestasi terhadap Harga CPO dan Produksi:
 - Deforestasi(-1) berpengaruh positif kuat terhadap harga CPO (2.913) dan produksi (4.739).
 - Artinya, peningkatan deforestasi terkait dengan kenaikan harga CPO global dan peningkatan produksi sawit domestik tahun berikutnya.
 4. Persistence Tinggi dalam Variabel:
 - Produksi sawit sangat persisten (koef. 0.912).
 - Harga CPO juga persisten (momentum harga) meski koefisien autoregresif kecil.
 5. Kesesuaian Model Baik:
 - R-squared tinggi di semua persamaan (0.874 untuk deforestasi, 0.742 harga CPO, 0.856 produksi).
 - Model mampu menjelaskan >74% variasi data.
 6. IRF menunjukkan hubungan dinamis jangka pendek yang kuat:
 - Guncangan pada harga CPO dan produksi langsung meningkatkan deforestasi (periode 1–3), namun efeknya menurun seiring waktu.
 - Deforestasi berpengaruh positif terhadap harga CPO dan produksi, tetapi tidak permanen.
 - Semua respons stabil dan konvergen menuju nol dalam 10 periode → sistem VAR stabil tanpa efek jangka panjang permanen.
 7. FEVD mengungkap kontribusi variabel terhadap varians:
 - Deforestasi: 60,6% dijelaskan diri sendiri, 39,4% oleh harga CPO dan produksi dalam jangka panjang.
 - Harga CPO: 53,2% diri sendiri, 28,9% dipengaruhi deforestasi, 17,9% oleh produksi.
 - Produksi: 47,4% diri sendiri, 39,4% dipengaruhi deforestasi (kontributor terbesar kedua).
 - Implikasi: Deforestasi memiliki peran kunci dalam menjelaskan variasi produksi dan harga.
 8. Implikasi Kebijakan:
 - Kontrol harga CPO global dapat menjadi instrumen tidak langsung untuk menekan deforestasi.
 - Intensifikasi produksi perlu diarahkan tanpa ekspansi lahan baru.
 - Kebijakan anti-deforestasi dapat mempengaruhi produksi dan harga, perlu pendekatan terintegrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, A., et al. (2024). Polycentric governance and resilience in environmental systems. *World Development*, 176, 106–119. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106119>
- Arifin, B. (2023). Rent-seeking behavior and land use changes in Indonesian palm oil expansion. *Journal of*

- Environmental Economics and Policy*, 12(1), 89–104.
<https://doi.org/10.1080/21606544.2023.2184567>
- Austin, K. G., Schwantes, A., Gu, Y., & Kasibhatla, P. S. (2019). What Causes Deforestation in Indonesia? *Environmental Research Letters*, 14(2), 024007.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf6db>
- Curtis, P. G., et al. (2018). Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 361(6407), 1108–1111.
<https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- Curtis, P.G., et al. (2023). Threshold effects in commodity price-deforestation relationships: Evidence from tropical agricultural frontiers. *Environmental Research Letters*, 18(4), 045012.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb876>
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020*. Rome: FAO.
- Gaveau, D.L.A., Locatelli, B., Salim, M.A., et al. (2022). Slowing deforestation in Indonesia follows declining oil palm expansion and lower oil prices. *Environmental Research Letters*, 17(1).
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6f09>
- Global Forest Watch. (2024). *World Lost 4.1 Million Hectares of Tropical Forest in 2023. World Lost 4.1 Million Hectares of Tropical Forest in 2023*. Washington, DC: WRI.
- Greenbury, A. (2024). Productivity-intensification trade-offs in sustainable palm oil production. *Nature Sustainability*, 7, 245–258.
<https://doi.org/10.1038/s41893-024-01319-7>
- Heilmayr, R., et al. (2024). Spatial spillovers of commodity price shocks on deforestation patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(5), e2303481121.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2303481121>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Kartodihardjo, H. (2023). Institutional capacity mismatch and forest governance outcomes in Indonesia's palm oil sector. *Forest Policy and Economics*, 156, 103–115.
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103115>
- Lambin, E. F. (2024). Amplification mechanisms in global commodity price transmission to local deforestation. *Global Environmental Change*, 85, 102–118.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102118>
- Margono, B. A., Potapov, P. V., Turubanova, S., Stolle, F., & Hansen, M. C. (2023). Decoupling of Palm Oil Expansion from Deforestation in Indonesia: Evidence from Remote Sensing and Policy Analysis. *Environmental Research Letters*, 18(5), 054025.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd5f2>
- Meyfroidt, P., et al. (2023). Telecoupled land systems: Conceptual framework and empirical

- applications. *Land Use Policy*, 131, 106–121.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106121>
- Nobre, C. A., Lovejoy, T. E., & Lapola, D. M. (2024). The Amazon Tipping Point: Implications for Global Climate and Biodiversity. *Nature Climate Change*, 14(2), 123–130.
<https://doi.org/10.1038/s41558-023-01910-2>
- Pendrill, F., et al. (2022). Disentangling the numbers behind agriculture-driven tropical deforestation. *Nature Sustainability*, 5, 752–764.
<https://doi.org/10.1038/s41893-022-00886-9>
- Seymour, F., et al. (2024). Complex adaptive systems and forest transitions: Theory and applications. *Annual Review of Environment and Resources*, 49, 1–28.
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012322-082456>
- Vijay, V., et al. (2024). The effectiveness of sustainability standards in reducing tropical deforestation. *Nature Communications*, 15, 1589.
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47744-0>