

Dampak Ekspansi Pertanian terhadap Emisi Karbon Nasional: Studi Empiris Indonesia

Putri Patria Kusuma¹, Sucihatiningih Dian Wisika Prajanti², Amelia Choya Tia
Rosalia³, Bintang Satrio Wibowo⁴, Annisa Wulandari⁵

Program Studi Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomika dan Bisnis, Universitas
Negeri Semarang

Diterima: 9 Oktober, 2025 | Revisi: 22 Juli, 2026 | Disetujui: 27 Juli, 2026 | Diterbitkan: 28 Juli, 2026

ABTSRAK

Peningkatan populasi ternak, input produksi dan perluasan lahan dalam pertanian dapat berpotensi meningkatkan emisi gas rumah kaca. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis dampak penggunaan bahan bakar, penggunaan pupuk, luas lahan pertanian dan jumlah ternak terhadap emisi karbon di Indonesia periode 1990-2022. Penelitian dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang berasal dari World Development Indicators (World Bank) dan FAOSTAT dengan metode Error Correction Model (ECM) untuk mengetahui hubungan jangka pendek dan jangka panjang antara variabel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas lahan pertanian dan jumlah ternak berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon di Indonesia, sedangkan penggunaan pupuk dan penggunaan bahan bakar tidak berpengaruh signifikan. Dalam jangka pendek keseluruhan variabel independent tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi karbon. Namun, jika nilai Error Correction Term (ECT) negatif dan signifikan, maka itu menunjukkan adanya mekanisme penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang, dan setiap penyimpangan jangka pendek akan dipertahankan secara bertahap. Dengan demikian, kebijakan pembangunan pertanian harus berfokus pada pengendalian ekspansi lahan, pengelolaan peternakan yang berkelanjutan, dan penerapan teknologi pertanian rendah karbon untuk mendukung ketahanan pangan dan target penurunan emisi karbon di Indonesia.

Kata Kunci: Emisi Karbon, Pertanian, Ternak, ECM, Pembangunan Berkelanjutan

The Impact of Agricultural Expansion on National Carbon Emissions: An Empirical Study of Indonesia

ABSTRACT

Increasing livestock populations, production inputs and expanding land in agriculture can potentially increase greenhouse gas emissions. The aim of this research is to analyze the impact of fuel use, fertilizer use, agricultural land area and number of livestock on carbon emissions in Indonesia for the period 1990-2022. The research was conducted using secondary data originating from World Development Indicators (World Bank) and FAOSTAT using the Error Correction Model (ECM) method to determine short-term and long-term relationships between variables. The research results show that agricultural land area and number of livestock have a positive and significant effect on carbon emissions in Indonesia, while fertilizer use and fuel use do not have a significant effect. In the short term, all independent variables do not have a significant effect on carbon emissions. However, if the Error Correction Term (ECT) value is negative and significant, then it indicates that there is an adjustment mechanism towards long-term balance, and any short-term deviations will be maintained gradually. Thus, agricultural development policies must focus on controlling land expansion, sustainable livestock management, and implementing low-carbon agricultural technology to support food security and carbon emission reduction targets in Indonesia.

Keywords: Carbon Emissions, Agriculture, Livestock, ECM, Sustainable Development

How to Cite:

Kusuma, P. P., Faidah, R. S. N., Prajanti, S. D. W., Rosalia, A.C.T., Wibowo, B.S & Wulandari, A. (2026). Dampak Ekspansi Pertanian terhadap Emisi Karbon Nasional: Studi Empiris Indonesia. *JDEP (Jurnal Dinamika Ekonomi Pembangunan)*, 9(2), 250-264

***Corresponding Author:**

Email : putripatria98@mail.unnes.ac.id

Alamat : Jl. Raya Banaran, Sekaran, Kec. Gn. Pati,
Kota Semarang

This article is published under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#).



PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara agraris di mana sektor pertanian menjadi pilar utama dalam perekonomian nasional. Permintaan pangan yang relatif besar yang diikuti dengan pertumbuhan penduduk mendorong produksi pertanian mengalami perluasan yang cukup signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Produksi pertanian yang semakin luas disebabkan oleh beberapa faktor salah satunya adalah perluasan lahan pertanian yang bertujuan untuk meningkatkan hasil panen, akan tetapi sering kali mengorbankan kawasan hutan atau lahan gambut yang berfungsi sebagai penyerap karbon alami. Sehingga hal ini menimbulkan permasalahan yang tidak hanya berdampak pada degradasi lingkungan namun juga akan berdampak terhadap kenaikan emisi karbon dioksida (CO₂). Pembangunan berkelanjutan menjadi pedoman bagi semua sektor dalam perekonomian. Sehingga permasalahan terkait dengan menemukan, menyelesaikan, serta mewujudkan kondisi sosial yang ideal menjadi tantangan fundamental yang dihadapi oleh berbagai negara di dunia.

Pertumbuhan sektor pertanian di Indonesia menjadi pilar penting dalam pembangunan ekonomi nasional, terutama menjamin ketahanan pangan dan penyerapan tenaga kerja. Akan tetapi, seiring dengan berjalannya waktu muncul kekhawatiran mengenai dampak lingkungan terutama semakin tinggi emisi karbon di atmosfer. Emisi karbon yang dihasilkan dari ekspansi pertanian berasal dari penggunaan bahan bakar, penggunaan pupuk kimia, perluasan lahan yang tidak terkontrol, hingga penggunaan ternak untuk pertanian. Hal ini sejalan dengan temuan IPCC (2019) yang menyatakan bahwa sektor pertanian, kehutanan, dan alih fungsi lahan (AFOLU) menyumbang sekitar 23% dari total emisi gas rumah kaca global.

Salah satu faktor penting yang berpengaruh terhadap emisi karbon dari sektor pertanian adalah ukuran atau luasan lahan pertanian. Di Indonesia, perubahan penggunaan lahan hutan menjadi lahan untuk pertanian atau perkebunan, khususnya untuk kelapa sawit dan padi turut memberikan kontribusi besar terhadap emisi karbon yang disebabkan oleh pelepasan karbon dari biomassa serta tanah. Proses perubahan ini umumnya melibatkan pembakaran bahan organik yang menyebabkan emisi karbon dalam jumlah besar ke udara. Lahan gambut menyimpan jumlah karbon yang sangat besar dan apabila dikeringkan akan mengeluarkan emisi CO₂ dan CH₄ (Hooijer et al., 2010; Pujiati et al., 2024; Prajanti et al., 2025). Berbagai studi juga menjelaskan bahwa perluasan area pertanian di suatu kawasan terutama hutan menghasilkan emisi karbon yang cukup besar diakibatkan oleh penggundulan hutan secara besar.

Menurut data Global Forest Watch (2022) menjelaskan bahwa perkembangan area pertanian, khususnya untuk kebun kelapa sawit di Sumatera dan Kalimantan menjadi salah satu penyebab berkurangnya tutupan hutan primer. Austin et al. (2019) dalam penelitiannya menjelaskan adanya perluasan lahan pertanian berkaitan dengan emisi karbon yang berasal dari penebangan pohon dan kersakan hutan. Kurang lebih 65% akibat deforestasi yang berkaitan dengan konsumsi global disebabkan oleh sektor pertanian serta Indonesia merupakan salah satu dari tiga negara yang memiliki kontribusi besar terhadap deforestasi yang didorong oleh kenaikan konsumsi.

Akan tetapi, tidak semua perluasan lahan pertanian berdampak negatif pada iklim, tergantung dengan jenis sistem atau kegiatan pertanian yang digunakan. Sistem agroforestri dan pertanian yang berkelanjutan dapat mengurangi emisi karbon, namun penerapan dari intensifikasi penggunaan lahan tanpa memperhatikan aspek berkelanjutan akan memberikan dampak buruk yakni meningkatkan emisi karbon. Sehingga sangat penting bagi Indonesia melakukan penilaian secara spasial mengenai dampak perluasan lahan pertanian terhadap emisi karbon sebagai dasar dalam merumuskan kebijakan pembangunan yang rendah karbon.

Produksi pertanian saat ini, yang sering disebut sebagai pertanian modern, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap emisi gas rumah kaca, terutama berupa gas karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan di nitrogen dioksida (N_2O). Kegiatan seperti penggunaan pupuk buatan, pembakaran sumber energi fosil, pengolahan tanah hingga pergeseran penggunaan lahan merupakan penyebab utama emisi karbon dalam sektor pertanian (Appiah et al., 2018). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan hasil pertanian, terutama di negara berkembang berhubungan dengan peningkatan emisi karbon karena ketergantungan pada bahan luar seperti pupuk kimia dan pestisida yang banyak menggunakan energi. Study penelitian yang dilakukan oleh Burney et al. (2010) menjelaskan dalam hasil temuannya bahwa peningkatan kegiatan pertanian menyumbang kurang lebih 40% terhadap kenaikan emisi CO_2 global.

Penggunaan pupuk, terutama penggunaan pupuk nitrogen, secara tidak langsung menyebabkan peningkatan emisi karbon karena melepaskan gas nitrogen oksida (N_2O), yang merupakan gas rumah kaca yang lebih kuat dibandingkan dengan CO_2 . Penggunaan pupuk yang terlalu banyak, tanpa memperhatikan prinsip pertanian yang berkelanjutan akan memperparah emisi atmosfer. Beberapa studi lain menjelaskan bahwa sektor pertanian yang ada di Indonesia belum sepenuhnya menerapkan cara yang ramah lingkungan dalam penggunaan pupuk. Untuk itu, masyarakat perlu lebih memperhatikan hal ini agar dampak lingkungan akibat peningkatan produksi bisa diminimalkan. Selain beberapa faktor yang dijelaskan sebelumnya, jumlah hewan ternak atau *livestock* yang digunakan dalam pertanian dapat berdampak terhadap emisi karbon. Produksi ternak menyumbang emisi gas rumah kaca melalui beberapa jalur utama seperti pengelolaan limbah kotoran dan fermentasi enterik pada hewan ruminansia seperti sapi, domba, dan kerbau (Ripple et al., 2014). Fermentasi enterik merupakan proses biologis secara alami dalam sistem pencernaan hewan yang menghasilkan metana (CH_4), di mana metana merupakan gas yang memiliki potensi besar lebih kuat dibandingkan CO_2 . Akibat dari tingginya emisi tersebut menjadikan sektor peternakan menjadi sasaran utama dalam kebijakan mitigasi perubahan iklim. Usaha mitigasi mencakup peningkatan efisiensi pakan untuk menurunkan emisi metana dari hewan, pemanfaatan biogas yang berasal dari limbah hewan, penggantian padang rumput, hingga inovasi dalam sistem produksi yang berkelanjutan. Berdasarkan latar belakang ini, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara empiris pengaruh luas lahan pertanian, produksi pertanian, konsumsi bahan bakar, dan penggunaan pupuk terhadap emisi karbon di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan menggunakan sumber data sekunder yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS), Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO), dan Bank Dunia dengan kurun waktu dari tahun 1990 hingga tahun 2022. Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Error Correction Model (ECM) untuk menganalisis hubungan jangka pendek dan jangka panjang antara variabel perekonomian yang sifatnya dinamis (Ullah et al., 2020; Wooldridge, 2002). ECM dipilih karena mampu menjelaskan proses penyesuaian menuju keseimbangan jangka panjang setelah terjadi guncangan dalam jangka pendek. Model ini pertama kali dikenalkan oleh Engle dan Granger (1987) yang menunjukkan bahwa dua atau lebih variabel tidak stationer namun terkointegrasi akan bergerak dalam jangka panjang.

Langkah awal yang dilakukan dalam pengujian ECM adalah melakukan uji asumsi klasik. Pengujian asumsi klasik dilakukan untuk memastikan bahwa model ECM yang akan diestimasi memenuhi kriteria *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE). Hal ini dikarenakan ECM merupakan model regresi linear dalam bentuk diferensiasi dan lag, sehingga prinsip dari *Ordinary least Square* (OLS) tetap berlaku (White & Cho, 2012). Adapun uji asumsi klasik yang dilakukan adalah uji normalitas, uji autokorelasi, uji heterokedastisitas, hingga uji multikolinearitas. Selain keempat uji asumsi yang telah disebutkan, ECM juga memerlukan pengujian khusus time series yakni (1) uji stationeritas yang dilakukan untuk memastikan bahwa variabel yang digunakan terintegrasi pada orde yang sesuai biasanya pada $I(1)$ atau pada tingkat *first different*, (2) uji kointegrasi guna menentukan apakah terdapat hubungan jangka panjang antar variabel dimana nantinya akan memberikan komponen kesalahan (error term) yang nantinya akan digunakan sebagai variabel ECT dalam model ECM, dan (3) Uji stabilitas model yang nantinya penting untuk memastikan bahwa model ECM stabil dalam periode penelitian. Adapun bentuk persamaan linear dalam penelitian adalah sebagai berikut:

$$CO_2 = \beta_0 + \beta_1 Fuel + \beta_2 Fecom + \beta_3 Land + \beta_4 Livestck + u_i$$

$$dCO_2 = \beta_0 + \beta_1 dFuel + \beta_2 dFecom + \beta_3 dLand + \beta_4 dLivestck + ect + u_i$$

dimana:

CO₂ : merupakan data emisi karbon

Fuel : bahan bakar yang digunakan

Fecom : pupuk yang digunakan dalam pertanian

Land : luas lahan

Livestck: jumlah ternak

Tabel 1.
Definisi Operasional Variabel

Variabel Penelitian	Definisi Operasional Variabel	Sumber Data
Emisi Karbon (CO ₂)	Emisi karbon adalah jumlah emisi karbon dioksida (CO ₂) yang timbul di atmosfer sebagai akibat dari aktivitas ekonomi, yang meliputi sektor pertanian, aktivitas energi dan perubahan penggunaan lahan di suatu wilayah pada suatu periode. Variabel ini sebagai variabel dependen untuk mengukur dampak lingkungan dari aktivitas pertanian.	World Development Indicators (World Bank)
Fuel (Jumlah penggunaan bahan bakar)	Penggunaan bahan bakar adalah jumlah konsumsi bahan bakar fosil yang dipergunakan dalam kegiatan pertanian, misalnya penggunaan traktor, pompa irigasi, mesin panen, dan alat mekanisasi pertanian lainnya. Dengan semakin besarnya penggunaan bahan bakar, semakin besar pula potensi emisi karbon yang dihasilkan.	FAOSTAT
Fecom (Penggunaan Pupuk)	Penggunaan pupuk adalah jumlah pupuk yang diaplikasikan dalam kegiatan budidaya pertanian dalam satu tahun. Penggunaan pupuk, khususnya pupuk nitrogen, dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca karena N ₂ O yang dilepaskan dapat diubah menjadi ekuivalen CO ₂ .	FAOSTAT
Land (Luas Lahan Pertanian)	Luas lahan pertanian adalah luas lahan yang dimanfaatkan untuk pertanian, baik sawah maupun non-sawah, dalam suatu wilayah pada waktu tertentu.	FAOSTAT
Livestck (Jumlah Ternak)	Jumlah ternak adalah total populasi ternak yang dipelihara dalam suatu wilayah pada periode tertentu, seperti sapi, kerbau, kambing, domba, dan unggas. Emisi gas rumah kaca di aktivitas peternakan diwakili dengan metana (CH ₄) dari fermentasi enterik dan pengelolaan kotoran ternak yang diubah ke ekuivalen CO ₂ .	FAOSTAT

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Sebelum melakukan pengujian, asumsi klasik terlebih dahulu diproses untuk memeriksa autokorelasi, multikolinearitas, dan heteroskedastisitas. Dalam regresi linier, autokorelasi mengacu pada kondisi di mana residual atau galat suatu model berkorelasi satu sama lain, terutama pada data deret waktu. Autokorelasi dapat melemahkan validitas model, karena asumsi klasik regresi menyatakan bahwa galat harus independen. Ketika autokorelasi

terjadi, biasanya hal ini menunjukkan bahwa model belum sepenuhnya menangkap struktur temporal data. Akibatnya, estimasi varians menjadi tidak akurat, yang menyebabkan uji signifikansi yang menyesatkan. Salah satu uji statistik yang umum digunakan untuk mendeteksi autokorelasi adalah uji Durbin- Watson dan uji Breusch-Godfrey LM (Gujarati & Porter, 2009).

Tabel 2
Uji Autokorelasi

Pengujian (Test)	Prob > Chi2	Hasil yang ditemukan
Uji Korelasi Serial	0.4019	Tidak Ditemukan
Breusch Godfrey LM Test		Autokorelasi

Sumber: data diolah, 2025

Dari Tabel 1, dilakukan menggunakan Uji Korelasi Serial Breusch-Godfrey (LM). Hasil pengujian menggunakan Uji Korelasi Serial Breusch-Godfrey (LM) pada Tabel 1 menunjukkan bahwa probabilitas > chi2 0.4019, lebih besar dari alfa 5%. Ini berarti model tidak mengandung autokorelasi.

Sementara itu, multikolinearitas terjadi ketika terdapat hubungan linear yang tinggi antara variabel independen dalam model regresi. Keberadaan multikolinearitas menyulitkan estimasi dampak masing-masing variabel secara individual terhadap variabel dependen karena redundansi informasi. Meskipun tidak memengaruhi akurasi prediksi model secara keseluruhan, multikolinearitas membuat koefisien regresi tidak stabil dan meningkatkan galat baku. Untuk mendeteksi multikolinearitas, analisis Variance Inflation Factor (VIF) atau korelasi antar variabel dapat dilakukan. Jika $VIF > 10$, maka multikolinearitas dianggap tinggi (Montgomery et al., 2012). Hasil pengujian model menunjukkan hasil sebagai berikut.

Tabel 3
Uji Multikolinearitas

Variabel	Prob > Chi2
Fuel	1.509051
Fecom	1.081365
Land	1.173219
Livestck	1.303441

Sumber: data diolah, 2025

Berdasarkan hasil uji multikolinearitas yang ditunjukkan oleh nilai Variance Inflation Factor (VIF) pada tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat masalah multikolinearitas dalam model regresi. Semua variabel independen memiliki nilai $1/VIF$ di atas 0,1, atau dengan kata lain, nilai VIF-nya jauh di bawah ambang batas kritis 10, yang umumnya digunakan sebagai indikator multikolinearitas tinggi. Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa model regresi yang digunakan tidak mengalami permasalahan multikolinearitas antar variabel. Kondisi ini menunjukkan bahwa setiap variabel mampu memberikan informasi dalam menjelaskan variabel dependen, tanpa

dadanya hubungan linear yang terlalu kuat satu sama lain. Oleh karena itu, model ini dapat dilanjutkan dalam tahap analisis berikutnya yakni uji heterokedastisitas.

Heteroskedastisitas terjadi pada saat besar kecilnya kesalahan dalam data tidak sama di setiap observasi yang dilakukan. Hal ini berlawanan dengan asumsi homokedastisitas, yang mengharapkan kesalahan memiliki ukuran varians yang tetap. Heteroskedastisitas sering muncul pada data cross-sectional yang berisi unit-unit dengan ukuran atau karakteristik yang berbeda, seperti pendapatan atau pengeluaran rumah tangga. Ketika heteroskedastisitas terjadi, OLS masih memberikan hasil estimasi yang tidak bias, namun tidak lagi efisien, sehingga pengujian statistik seperti uji-t dan uji F tidak dapat diandalkan atau bisa dikatakan tidak valid. Untuk menguji keberadaan heteroskedastisitas, digunakan uji White dan Breusch-Pagan (Greene, 2012).

Tabel 4
Uji Heterokedastisitas

Pengujian (Test)	Prob > Chi2	Hasil yang ditemukan
Breusch-Pagan Test	0.8859	Tidak Ditemukan Heterokedastisitas

Sumber: data diolah, 2025

Setelah melakukan uji LM untuk melihat apakah terjadi autokorelasi, dilakukan uji heteroskedastisitas. Heteroskedastisitas terjadi apabila varians residual dalam model tidak konstan atau tetap. Berdasarkan output pada tabel 3 menunjukkan hasil uji Breusch-Pagan, menunjukkan bahwa nilai probabilitas chi-square ($\text{prob} > \chi^2$) sebesar 0.8859 yang berada di atas tingkat signifikansi 5%. Dengan demikian, secara statistik model tidak menolak hipotesis nol yang menyatakan bahwa varians error adalah konstan. Artinya, model regresi tidak mengindikasikan adanya masalah heterokedastisitas, sehingga asumsi dari uji heterokedastisitas terpenuhi.

Dengan terpenuhinya uji asumsi klasik, khususnya tidak ditemukannya masalah heterokedastisitas dalam model, maka hasil estimasi regresi dapat dianggap lebih reliabel dan tidak bias. Kondisi ini memberikan dasar yang kuat untuk melanjutkan analisis ke tahap selanjutnya, yaitu pengujian *Error Correction Model* (ECM) guna mengkaji hubungan jangka panjang sekaligus dinamika penyesuaian jangka pendek antar variabel. Pada tahap awal, dilakukan estimasi hubungan jangka panjang untuk mengidentifikasi apakah terdapat keseimbangan (*equilibrium*) antar variabel dalam periode waktu tertentu.

Table 5.
ADF Test Results at Level Level

Variabel	P-Value	Alpha (5%)	Information
Fuel	0,1953	0,05	Not Stationary
Fecom	0,2015	0,05	Not Stationary
Land	0,9835	0,05	Not Stationary
Livestck	0,7120	0,05	Not Stationary
CO2	0,1825	0,05	Not Stationary

Sumber: data diolah, 2025

Berdasarkan hasil uji ADF pada tingkat yang disajikan dalam Tabel 4, dapat disimpulkan bahwa dari semua variabel yang diuji, keseluruhan variabel yang menunjukkan hasil yang tidak signifikan pada tingkat dengan tingkat signifikansi (α) 5%. Variabel fuel, fecom, land (luas lahan), livestock (jumlah ternak yang digunakan dalam pertanian) serta CO2 (emisi karbon) tidak stasioner pada tingkat level. Oleh karena itu, untuk keelima variabel yang tidak stasioner, pengujian lebih lanjut diperlukan dengan mentransformasikan data ke tingkat *first difference*. Langkah ini bertujuan untuk menghilangkan ketidakstasioneran dalam data dan memastikan bahwa semua variabel yang digunakan dalam model memenuhi asumsi dasar analisis deret waktu.

Table 6.
ADF Test at Level *First Difference*

Variabel	P-Value	Alpha (5%)	Information
dFuel	0,0000	0,05	Stationary
dFecom	0,0000	0,05	Stationary
dLand	0,0015	0,05	Stationary
dLivestck	0,0002	0,05	Stationary
dCO2	0,0065	0,05	Stationary

Sumber: data diolah, 2025

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 5, setelah pengujian stasioneritas menggunakan uji Augmented Dickey-Fuller (ADF) pada tingkat *first difference*, semua variabel yang diuji menunjukkan nilai probabilitas lebih kecil dari tingkat signifikansi 5%. Dengan demikian, hipotesis nol (H_0) ditolak untuk semua variabel, yang berarti bahwa semua variabel bersifat stasioner pada tingkat *first difference*. Tidak ada variabel yang memerlukan pengujian hingga tingkat *second difference*.

Setelah melakukan pengujian unit root test dengan menggunakan uji Augmented Dickey-Fuller (ADF) menjelaskan bahwa model ECM yang digunakan bisa dilanjutkan dengan mengestimasi model jangka panjang dan jangka pendek. Apabila hubungan jangka panjang terbukti signifikan, maka selanjutnya dapat dibangun model ECM untuk melihat mekanisme penyesuaian dalam jangka pendek. Dengan menggunakan pendekatan ini, tidak hanya diketahui pengaruh variabel independen dalam jangka panjang, namun juga melihat seberapa cepat ketidakseimbangan yang terjadi akan kembali menuju kondisi keseimbangan. Koefisien *error correction term* (ECT) menjadi indikator penting dalam hal ini, karena mencerminkan kecepatan penyesuaian model menuju keseimbangan jangka panjang setelah terjadi shock dalam jangka pendek. Berdasarkan penjelasan masing-masing variabel yang digunakan dan uji ECM dalam jangka panjang dan jangka pendek, ditemukan beberapa variabel yang memengaruhi emisi karbon di Indonesia. Tabel 6 menunjukkan hasil estimasi dalam jangka panjang dan ditemukan dua variabel yang memengaruhi emisi karbon dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 7
Hasil Regresi ECM Jangka Panjang

Variable	Coefficient	Prob
Land	20.18754	0.0008
Fecom	-0.0187	0.7576
Fuel	0.504472	0.5990
Livestck	0.494	0.0313
C	-332.47	0.0018

Sumber: data diolah, 2025

Sementara itu, hasil estimasi jangka pendek yang tertulis pada tabel 7 menunjukkan bahwa seluruh variabel independen yang digunakan belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap variabel dependen dalam jangka pendek. Temuan ini mengindikasikan bahwa perubahan yang terjadi pada setiap variabel belum mampu secara langsung memengaruhi variabel dependen dalam waktu yang relatif singkat.

Tabel 8
Hasil Regresi ECM Jangka Pendek

Variable	Coefficient	Prob
Land	20.187	0.2007
Fecom	-0.087	0.4211
Fuel	0.504	0.6748
Livestck	0.494	0.2318
ECT(-1)	-0.331	0.0172
C	-332.47	0.0018

Sumber: data diolah, 2025

Berdasarkan temuan di atas juga menunjukkan bahwa respon variabel dependen terhadap perubahan pada variabel independen cenderung tidak terjadi secara instan, melainkan membutuhkan waktu untuk penyesuaian. Hal ini juga menguatkan dugaan bahwa mekanisme penyesuaian lebih dominan terjadi dalam jangka panjang, sehingga efek hubungan antar variabel akan terlihat lebih jelas pada saat dianalisis dalam jangka panjang.

Pembahasan

Pengaruh Luas Lahan Pertanian terhadap Emisi Karbon

Berdasarkan hasil estimasi pada Tabel 4 dalam analisis jangka panjang, Berdasarkan hasil estimasi jangka panjang yang ditunjukkan pada tabel, variabel luas lahan pertanian (LAND) memiliki koefisien sebesar 20.18754 dengan nilai *t-statistic* 3.792007 dan probabilitas 0.0008. Nilai probabilitas ini jauh di bawah taraf signifikansi 5% (0.05), yang berarti bahwa variabel luas lahan pertanian berpengaruh signifikan secara statistik terhadap emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jangka panjang. Tanda koefisien yang positif menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1% dalam luas lahan pertanian akan meningkatkan emisi karbon dioksida sebesar 20.18%, dengan asumsi variabel lain konstan.

Hasil ini menunjukkan bahwa ekspansi lahan pertanian berkontribusi besar terhadap peningkatan emisi karbon di Indonesia. Perluasan lahan pertanian umumnya terjadi melalui kegiatan konversi hutan atau lahan alami menjadi area budidaya yang

menyebabkan pelepasan karbon dari vegetasi dan tanah. Proses pembukaan lahan, terutama dengan metode pembakaran, mempercepat emisi CO₂ ke atmosfer. Selain itu, kegiatan pertanian di lahan baru biasanya diikuti dengan peningkatan penggunaan input seperti pupuk dan bahan bakar untuk pengolahan tanah, yang juga berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Temuan ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Pamungkas & Andriani, (2023) yang menyatakan bahwa sistem pertanian konservatif pada lahan yang diperluas dapat menyerap lebih banyak karbon daripada yang dilepaskannya, terutama melalui peningkatan tutupan vegetasi. Lebih lanjut, lahan yang diperluas tidak digunakan secara sembarangan, melainkan untuk bentuk pertanian yang lebih ramah lingkungan, seperti pertanian konservasi. Dalam sistem ini, vegetasi yang dibudidayakan dengan baik, baik tanaman pangan maupun tanaman penutup, dapat menyerap lebih banyak karbon melalui fotosintesis dan akumulasi biomassa di atas dan di bawah tanah.

Hasil ini memperlihatkan bahwa sektor pertanian masih sangat bergantung pada ekspansi horizontal (penambahan lahan) daripada peningkatan produktivitas melalui efisiensi atau inovasi teknologi. Ketergantungan ini berisiko meningkatkan tekanan lingkungan, terutama dalam konteks komitmen Indonesia terhadap pengurangan emisi karbon. Temuan ini mengindikasikan bahwa perluasan lahan pertanian menjadi faktor utama peningkatan emisi karbon di Indonesia dalam jangka panjang. Oleh karena itu, strategi mitigasi emisi harus difokuskan pada pengendalian konversi lahan dan penerapan sistem pertanian rendah emisi. Pemerintah dan pelaku sektor pertanian perlu memperkuat kebijakan tata guna lahan yang berkelanjutan, mendorong rehabilitasi lahan terdegradasi, serta memperluas penerapan teknologi efisien seperti pertanian presisi.

Langkah-langkah tersebut dapat membantu menyeimbangkan kebutuhan peningkatan produksi dengan komitmen terhadap pembangunan hijau dan ketahanan iklim nasional. Sebuah studi oleh Pamungkas & Andriani, (2023) menyatakan bahwa perluasan lahan di area tertentu dapat mendukung pengurangan emisi karbon jika dikelola dengan metode konservatif. Lebih lanjut, lahan yang diperluas tersebut sering kali sebelumnya tidak digunakan atau terdegradasi, seperti semak belukar atau lahan kering yang tidak produktif. Mengubah lahan ini menjadi pertanian berkelanjutan dapat memulihkan fungsi ekologisnya, termasuk kemampuannya untuk menyimpan karbon. Menurut penelitian oleh (Ghimire et al., 2012), memulihkan lahan terdegradasi menggunakan sistem pertanian konservasi secara signifikan meningkatkan kandungan karbon organik tanah dalam 3–5 tahun, sehingga menjelaskan penurunan emisi bersih meskipun terjadi peningkatan total luas lahan pertanian.

Dampak Penggunaan Pupuk terhadap Emisi Karbon

Berdasarkan hasil estimasi model jangka panjang dan jangka pendek, variabel penggunaan pupuk (FECOM) menunjukkan nilai koefisien yang tidak signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO₂). Nilai probabilitas sebesar 0.7576 menunjukkan bahwa angka tersebut berada jauh di atas batas signifikansi 5% (0.05). Kondisi ini mengindikasikan bahwa secara statistik tidak terdapat cukup bukti untuk menolak hipotesis nol. Dengan kata lain, baik dalam dinamika jangka pendek atau jangka panjang, perubahan dalam tingkat

penggunaan pupuk belum terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap variasi emisi karbon di Indonesia selama periode pengamatan. Temuan ini menegaskan bahwa variabel penggunaan pupuk bukanlah faktor penentu yang secara langsung mendorong perubahan emisi karbon dalam kerangka model yang digunakan.

Misalnya, dalam praktik lapangan, petani tidak selalu menggunakan pupuk dengan dosis tinggi atau tepat, sehingga kontribusi emisi mereka bervariasi dan tidak terukur secara konsisten. Misalnya, petani di sawah sering menggunakan pupuk organik campuran, pupuk kandang, atau kompos, yang melepaskan emisi lebih lambat daripada urea. Lebih lanjut, kebijakan mitigasi potensial atau peningkatan efisiensi pupuk di lapangan juga perlu dipertimbangkan. Dengan kata lain, rendahnya koefisien pemupukan dapat mencerminkan bahwa praktik pemupukan di lokasi tersebut cukup efisien secara lingkungan sehingga tidak meningkatkan emisi karbon secara substansial (FAO, 2022).

Pertama, kontribusi emisi dari pupuk pertanian umumnya tidak langsung terhadap emisi CO₂, melainkan lebih dominan menghasilkan gas dinitrogen oksida (N₂O) yang memiliki potensi pemanasan global jauh lebih besar dibandingkan CO₂. Gas N₂O diketahui memiliki *global warming potential* hingga ratusan kali lebih tinggi dibandingkan CO₂ serta menjadi salah satu kontributor utama emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian (Zhong et al., 2025). Selain itu, penggunaan pupuk nitrogen sintetis merupakan salah satu sumber utama emisi N₂O pada lahan pertanian akibat dari proses nitrifikasi dan denitrifikasi di dalam tanah (Manco et al., 2024).

Berbagai studi menjelaskan bahwa peningkatan penggunaan pupuk nitrogen secara signifikan akan mempengaruhi peningkatan emisi N₂O dibandingkan CO₂ dalam pertanian (Luo et al., 2025). Karena penelitian ini hanya berfokus pada emisi karbon dioksida, maka dampak penggunaan pupuk yang sebenarnya signifikan terhadap N₂O namun tidak tercermin kuat dalam model. Dengan kata lain, jenis gas rumah kaca yang dihasilkan dari penggunaan pupuk berbeda dengan variabel dependen yang diteliti, sehingga hubungannya tampak lemah secara statistik. Kedua, penggunaan pupuk di sektor pertanian Indonesia cenderung tidak efisien dan tidak proporsional terhadap hasil produksi maupun perubahan lahan.

Petani kecil sering kali menggunakan pupuk dalam jumlah terbatas karena faktor biaya atau akses, sementara sebagian besar emisi karbon berasal dari aktivitas lain seperti konversi lahan dan pembakaran biomassa. Kondisi ini menyebabkan variasi penggunaan pupuk tidak cukup besar untuk menjelaskan perubahan signifikan dalam total emisi CO₂ nasional. Selain itu, sebagian pupuk anorganik yang digunakan juga tidak sepenuhnya terurai menjadi emisi gas, karena faktor kondisi tanah, kelembapan, dan sistem irigasi yang bervariasi antar wilayah. Ketiga, dari sisi waktu, dampak penggunaan pupuk terhadap emisi karbon membutuhkan periode panjang untuk terakumulasi. Dalam jangka pendek, pengaruhnya kecil karena proses dekomposisi bahan kimia dan pelepasan gas ke atmosfer berlangsung secara bertahap. Bahkan dalam jangka panjang, jika tidak terjadi peningkatan intensitas penggunaan pupuk secara drastis atau tidak disertai dengan ekspansi lahan yang besar, maka kontribusinya terhadap peningkatan CO₂ tetap rendah. Oleh karena itu, meskipun pupuk merupakan salah satu input penting dalam sistem pertanian,

pengaruhnya terhadap emisi karbon di Indonesia cenderung tidak signifikan baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, karena sifat emisi yang tidak langsung, penggunaan yang moderat, serta kontribusi relatif kecil dibandingkan sumber emisi lain seperti lahan dan ternak.

Dampak Penggunaan Bahan Bakar terhadap Emisi Karbon

Berdasarkan hasil estimasi jangka panjang, variabel penggunaan bahan bakar (FUEL) memiliki nilai koefisien sebesar 0.504472 dengan nilai probabilitas 0.5990, yang berarti tidak signifikan secara statistik pada tingkat signifikansi 5%. Temuan ini menunjukkan bahwa baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, perubahan konsumsi bahan bakar dalam sektor pertanian tidak memiliki pengaruh nyata terhadap emisi karbon dioksida (CO₂) di Indonesia selama periode penelitian. Dengan kata lain, fluktuasi penggunaan bahan bakar pertanian belum menjadi faktor dominan yang memengaruhi peningkatan emisi karbon secara agregat.

Salah satu penjelasan utama dari hasil ini adalah karena kontribusi sektor pertanian terhadap total konsumsi bahan bakar nasional relatif kecil. Sebagian besar bahan bakar fosil di Indonesia digunakan oleh sektor transportasi, industri, dan energi listrik, bukan oleh sektor pertanian (Raihan et al., 2022; Lutfi et al., 2025).

Dalam kegiatan pertanian, penggunaan bahan bakar umumnya terbatas pada operasi alat pertanian seperti traktor, pompa air, atau mesin panen. Skala penggunaannya yang kecil dan tidak kontinu membuat pengaruhnya terhadap total emisi CO₂ nasional menjadi tidak signifikan secara statistik, terutama ketika dibandingkan dengan sumber emisi besar lain seperti konversi lahan atau aktivitas peternakan.

Selain itu, penggunaan bahan bakar di sektor pertanian sering kali tidak mengalami pertumbuhan signifikan dari waktu ke waktu. Petani di banyak daerah masih mengandalkan tenaga manusia atau hewan untuk kegiatan pertanian tradisional, dan modernisasi alat pertanian berbasis bahan bakar belum merata. Dengan demikian, variasi penggunaan bahan bakar dari tahun ke tahun cenderung stabil atau bahkan menurun karena adanya peralihan sebagian ke alat berbasis listrik atau teknologi yang lebih hemat energi. Kondisi ini menyebabkan kontribusi emisi dari bahan bakar dalam model ECM tidak cukup besar untuk menunjukkan hubungan signifikan, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Dampak Ternak terhadap Emisi Karbon

Berdasarkan hasil estimasi pada tabel, variabel jumlah ternak (LIVESTCK) menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap emisi karbon (CO₂) dalam jangka panjang (Prob. = 0.0313 < 0.05), tetapi tidak signifikan dalam jangka pendek. Perbedaan ini dapat dijelaskan melalui mekanisme biologis, struktural, dan perilaku produksi di sektor peternakan yang berdampak secara akumulatif terhadap emisi karbon di Indonesia. Dalam jangka pendek, populasi ternak yang meningkat belum secara langsung menghasilkan lonjakan emisi karbon yang besar. Hal ini disebabkan karena aktivitas ternak tidak langsung menghasilkan CO₂ dalam jumlah signifikan setiap tahunnya. Emisi dari sektor peternakan

berasal dari proses biologis seperti fermentasi enterik (pencernaan hewan ruminansia), penguraian limbah ternak (*manuremanagement*), serta konsumsi pakan dan energi untuk pemeliharaan (Jha et al., 2022). Proses-proses ini bersifat bertahap, sehingga efeknya terhadap peningkatan emisi baru akan terasa ketika populasi ternak meningkat secara berkelanjutan dan skala produksi membesar dalam jangka panjang dimana hasil ini selaras dengan temuan (Havrysh et al., 2021).

Sebaliknya, dalam jangka panjang, dampak populasi ternak terhadap emisi karbon menjadi signifikan karena akumulasi dari proses-proses emisi tersebut. Misalnya, peningkatan jumlah ternak ruminansia seperti sapi dan kambing dalam periode panjang akan meningkatkan produksi metana (CH_4) yang berasal dari fermentasi enterik dan kemudian terkonversi menjadi CO_2 ekuivalen dalam perhitungan emisi karbon total. Selain itu, meningkatnya jumlah ternak mendorong ekspansi lahan penggembalaan dan kebutuhan pakan yang menyebabkan konversi lahan pertanian atau hutan menjadi padang rumput, sehingga memperbesar pelepasan karbon dari tanah dan vegetasi. Dengan demikian, efeknya baru signifikan ketika proses-proses tersebut berlangsung terus-menerus dalam jangka panjang. Selain itu, dalam jangka pendek perubahan jumlah ternak terkadang tidak diikuti dengan signifikan dalam sistem produksi.

SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas produksi pertanian memiliki hubungan jangka panjang dengan peningkatan emisi karbon di Indonesia. Berdasarkan estimasi model *Error Correction Model* (ECM), variabel luas lahan pertanian dan jumlah ternak berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO_2) dalam jangka panjang, sedangkan dalam jangka pendek keseluruhan variabel independent tidak menunjukkan pengaruh signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa ekspansi lahan pertanian dan peningkatan populasi ternak menjadi faktor utama yang berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon dari sektor pertanian. Sebaliknya, penggunaan pupuk dan bahan bakar tidak berpengaruh signifikan baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Rendahnya pengaruh pupuk disebabkan oleh emisi yang dihasilkan lebih banyak berupa gas dinitrogen oksida (N_2O), bukan CO_2 , sedangkan konsumsi bahan bakar pertanian relatif kecil dan cenderung stabil.

Oleh karena itu, strategi pembangunan pertanian ke depan perlu diarahkan pada intensifikasi berkelanjutan melalui peningkatan produktivitas tanpa perluasan lahan, efisiensi energi, serta penerapan teknologi pertanian ramah lingkungan. Upaya mitigasi juga perlu difokuskan pada pengendalian konversi lahan, pengelolaan limbah ternak, dan pemanfaatan teknologi hijau seperti biochar, biogas, dan sistem pertanian presisi. Dengan demikian, sektor pertanian dapat tetap mendukung ketahanan pangan nasional sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian target penurunan emisi karbon dan pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Appiah, K., Du, J., & Poku, J. (2018). Causal relationship between agricultural production and carbon dioxide emissions in selected emerging economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(25), 24764–24777.
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-2523-z>
- 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>
- Burney, J. A., Davis, S. J., & Lobell, D. B. (2010). Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(26), 12052–12057.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0914216107>
- Ghimire, R., Adhikari, K. R., Chen, Z. S., Shah, S. C., & Dahal, K. R. (2012). Soil organic carbon sequestration as affected by tillage, crop residue, and nitrogen application in rice–wheat rotation system. *Paddy and Water Environment*, 10(2), 95–102.
<https://doi.org/10.1007/s10333-011-0268-0>
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Havrysh, V., Kalinichenko, A., Brzozowska, A., & Stebila, J. (2021). Life Cycle Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions of Agricultural Residue Feedstock for Bioenergy. *Applied Sciences*, 11(5), 2009.
<https://doi.org/10.3390/app11052009>
- Hooijer, A., Page, S., Canadell, J. G., Silvius, M., Kwadijk, J., Wösten, H., & Jauhiainen, J. (2010). Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences*, 7(5), 1505–1514. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010>
- Jha, S., Nanda, S., Acharya, B., & Dalai, A. K. (2022). A review of thermochemical conversion of waste biomass to biofuels. *Energies*, 15(17), 6312.
<https://doi.org/10.3390/en15176352>
- Luo, X., Zhang, M., Ni, Y., & Shen, G. (2025). Mitigation strategies for NH₃ and N₂O emissions in greenhouse agriculture: Insights into fertilizer management and nitrogen emission mechanisms. *Environmental Technology and Innovation*, 37, 103995.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103995>
- Lutfi, M., Astuti, N. P., Ahmad, A. M., Mustaniroh, S. A., Luqman, A., & Mindarti, L. I. (2025). Energy and greenhouse effect emission analysis in small-scale rice cultivation: A case study in Tulungagung, Indonesia. *Frontiers in Energy Research*, 13, 1579617. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1579617>
- Manco, A., Giaccone, M., Zenone, T., Onofri, A., Tei, F., Farneselli, M., Gabbrielli, M., Allegranza, M., Perego, A., Magliulo, V., & Vitale, L. (2024). An overview of N₂O emissions from cropping systems and current strategies to improve nitrogen use efficiency. *Horticulturae*, 10(7), 746.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae10070754>

- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5th ed.). Wiley.
- Pamungkas, Guntur Bagus, and Vida Andriani. 2023. "Contribution of Land Use Change and Land Cover to Climate Change Coastal Areas and Their Impacts: Evidence in Jayapura City, Papua Province, Indonesia." *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan* 11(1):36–46. doi:10.14710/jwl.11.1.36-46.
- Prajanti, S. D. W., Litaay, C., Widiatningrum, T., Amelia, D. R., & Adzim, F. (2025). Model for implementing sustainable agriculture based on good agricultural practice as a strategy for adapting to the impact of climate change. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 9(2), 23–36. <https://doi.org/10.55214/25768484.v9i2.4406>
- Pujiati, A., Fafurida, Rosalia, A. C. T., Rahman, M. A., & Damayanti, N. (2024). Unveiling the carbon footprint: Investigating the influence of socio-economic factors on carbon emissions through FMOLS analysis. In *Proceedings* (pp. 75–96). Doi: [10.2991/978-94-6463-522-5_7](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-522-5_7)
- Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). Dynamic impacts of economic growth, renewable energy use, urbanization, industrialization, tourism, agriculture, and forests on carbon emissions in Turkey. *Carbon Research*, 1(1), Article 19. <https://doi.org/10.1007/s44246-022-00019-z>
- Raihan, A., Muhtasim, D. A., Khan, M. N. A., Pavel, M. I., & Faruk, O. (2022). Nexus between carbon emissions, economic growth, renewable energy use, and technological innovation towards achieving environmental sustainability in Bangladesh. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100032>
- Ullah, S., Awan, M., & Hasan, M. (2020). Environmental quality and health status: Dynamic ordinary least square estimation for developing Asian countries. *Forman Journal of Economic Studies*, 16, 1–?. <https://doi.org/10.32368/FJES.20201607>
- White, Halbert, and Jin Seo Cho. 2012. "An Alternative Proof That OLS Is BLUE." *Journal of Econometric Methods* 1(1):107. doi:10.1515/2156-6674.1034.
- Wooldridge, J. M. (2002). *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT Press.
- Zhong, L., Wang, P., Gu, Z., Song, Y., Cai, X., Yu, G., Xu, X., & Kuzyakov, Y. (2025). Biochar reduces N₂O emission from fertilized cropland soils: A meta-analysis. *Carbon Research*, 4, 31. <https://doi.org/10.1007/s44246-025-00198-5>.