

PENGARUH UANG ELEKTRONIK, PERTUMBUHAN EKONOMI, DAN RASIO ELEKTRIFIKASI TERHADAP EMISI KARBON DI INDONESIA

Nurah¹, Maryanti²

^{1,2}Departemen Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Andalas, Padang,
Indonesia

Email Korespondensi: nurah2312@gmail.com

Submitted: 10-10-2025; Accepted: 22-12-2025; Published : 26-12-2025

ABSTRAK

Peningkatan aktivitas ekonomi dan percepatan digitalisasi di Indonesia memberikan implikasi penting terhadap upaya penurunan emisi karbon, khususnya dalam rangka memenuhi target nasional *Net Zero Emission 2060*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan uang elektronik, pertumbuhan ekonomi, dan rasio elektrifikasi terhadap emisi karbon di 33 provinsi Indonesia selama periode 2021–2023. Metode yang digunakan adalah regresi data panel melalui *Fixed Effects* dengan pendekatan *Generalized Least Squares* (GLS), yang dipilih untuk mengakomodasi heterogenitas antarprovinsi serta mengatasi potensi heteroskedastisitas dan autokorelasi pada data panel pendek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan uang elektronik berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi karbon, sehingga digitalisasi transaksi berperan dalam meningkatkan efisiensi energi. Pertumbuhan ekonomi berpengaruh positif signifikan, sedangkan pertumbuhan ekonomi kuadrat berpengaruh negatif signifikan, yang mengonfirmasi pola U terbalik sesuai kerangka *Environmental Kuznets Curve*. Selain itu, rasio elektrifikasi berpengaruh negatif dan signifikan, menandakan bahwa perluasan akses listrik mendukung penurunan emisi melalui pemanfaatan energi yang lebih efisien. Temuan ini menegaskan pentingnya penguatan kebijakan digitalisasi pembayaran, percepatan elektrifikasi, serta pengembangan energi rendah karbon untuk mendorong pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

Kata kunci: Emisi Karbon, *Environmental Kuznets Curve*, *Generalized Least Square*, dan Pertumbuhan Ekonomi

ABSTRACT

Increased economic activity and accelerated digitalization in Indonesia have important implications for carbon emission reduction efforts, particularly in the context of meeting the national Net Zero Emission 2060 target. This study aims to analyze the effect of electronic money usage, economic growth, and electrification ratio on carbon emissions in 33 provinces in Indonesia during the period 2021–2023. The method used is panel data regression through Fixed Effects with a Generalized Least Squares (GLS) approach, which was chosen to accommodate inter-provincial heterogeneity and overcome potential heteroscedasticity and autocorelacy in short panel data. The results show that the use of electronic money has a negative and significant effect on carbon emissions, indicating that the digitization of transactions plays a role in improving energy efficiency. Economic growth has a significant positive effect, while its square has a significant negative effect, confirming the inverted U pattern in accordance with the Environmental Kuznets Curve framework. In addition, the electrification ratio has a negative and significant effect, indicating that expanding access to electricity supports emission reductions through more efficient energy use. These findings emphasize the importance of strengthening payment digitalization policies, accelerating electrification, and developing low-carbon energy to promote sustainable development in Indonesia.

Key word: Carbon Emissions, *Environmental Kuznets Curve*, *Generalized Least Squares*, and Economic Growth

PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi tekanan perubahan iklim yang semakin meningkat akibat naiknya emisi karbon yang bersumber dari aktivitas ekonomi dan penggunaan energi fosil. Emisi karbon berkontribusi terhadap efek rumah kaca yang memicu pemanasan global dan iklim ekstrem (Rahmawati & Hendarto, 2023). Data *Emissions Database for Global Atmospheric Research* menunjukkan bahwa pada tahun 2023 Indonesia menempati peringkat ketujuh dunia sebagai penghasil emisi karbon terbesar dengan total emisi sekitar 1.200,2 juta ton CO₂ ekuivalen (EDGAR, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengendalian emisi karbon masih menjadi tantangan utama dalam agenda pembangunan nasional.

Transformasi digital di sektor keuangan Indonesia ditandai dengan meningkatnya penggunaan uang elektronik (*e-money*) sebagai instrumen transaksi non-tunai (Yamaka et al., 2023). Sejumlah penelitian menyatakan bahwa *e-money* berpotensi mengurangi emisi karbon melalui efisiensi penggunaan sumber daya dan pengurangan aktivitas fisik dalam sistem pembayaran (Ria et al., 2023). Berdasarkan data dari Bank Indonesia, total nilai transaksi uang elektronik pada April 2023 tercatat sebesar Rp37,46 triliun. Meskipun nilai transaksi uang elektronik terus meningkat di Indonesia (Hilal & Sumadi, 2023), kajian empiris yang secara langsung mengenai penggunaan *e-money* dengan emisi karbon di Indonesia masih terbatas.

Pertumbuhan ekonomi Indonesia juga memiliki keterkaitan erat dengan dinamika emisi karbon. Peningkatan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) umumnya diikuti oleh peningkatan aktivitas produksi dan konsumsi energi yang berpotensi meningkatkan emisi karbon, terutama pada tahap awal pembangunan (Ayudya, 2020). Dalam kajian ekonomi lingkungan, hubungan tersebut dijelaskan melalui hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC), yang menyatakan bahwa emisi karbon meningkat seiring pertumbuhan ekonomi hingga mencapai tingkat pendapatan tertentu, kemudian seiring meningkatnya kesadaran lingkungan dan menurunnya penerapan kebijakan yang lebih ketat (Fatiha et al., 2024). Temuan Nikensari et al. (2019) di kawasan Asia menunjukkan adanya hubungan berbentuk U terbalik antara

pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan. Namun, bukti empiris mengenai keberlakuan hipotesis EKC di Indonesia masih belum konsisten, khususnya pada tingkat provinsi.

Sistem energi nasional Indonesia turut mempengaruhi tingkat emisi karbon melalui perluasan akses listrik dan struktur bauran energi. Rasio elektrifikasi Indonesia sudah mencapai hampir 100 persen, namun bauran energi masih didominasi oleh sumber energi fosil (BPS, 2024). Penelitian Wismandani dan Widjonarko (2017) menunjukkan bahwa peningkatan konsumsi listrik dapat meningkatkan emisi karbon apabila tidak diimbangi dengan penggunaan energi terbarukan. Kondisi ini menunjukkan bahwa rasio elektrifikasi tidak dapat dianggap netral terhadap lingkungan dan perlu dianalisis bersama dengan faktor ekonomi lainnya.

Penelitian terdahulu cenderung mengkaji pengaruh digitalisasi keuangan, pertumbuhan ekonomi, dan elektrifikasi terhadap emisi karbon secara terpisah. Kajian yang mengintegrasikan penggunaan *e-money*, laju pertumbuhan PDRB dan PDRB kuadrat sebagai pengujian hipotesis EKC, serta rasio elektrifikasi dalam satu kerangka empiris pada tingkat provinsi di Indonesia masih sangat terbatas. Keterbatasan tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian dalam memahami bagaimana transformasi ekonomi digital, pertumbuhan ekonomi, dan sistem energi secara simultan mempengaruhi emisi karbon di Indonesia.

Penelitian ini merumuskan permasalahan mengenai bagaimana pengaruh penggunaan *e-money*, laju pertumbuhan PDRB, laju pertumbuhan PDRB kuadrat, serta rasio elektrifikasi terhadap emisi karbon di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variabel-variabel tersebut terhadap emisi karbon serta menguji keberlakuan hipotesis EKC dalam konteks Indonesia. Berdasarkan kerangka teori, penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa penggunaan *e-money* berpengaruh negatif terhadap emisi karbon, laju pertumbuhan PDRB berpengaruh positif terhadap emisi karbon, laju pertumbuhan PDRB kuadrat berpengaruh negatif terhadap emisi karbon, serta rasio elektrifikasi berpengaruh negatif terhadap emisi karbon di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data sekunder dengan periode pengamatan 2021–2023. Data diperoleh dari lembaga resmi, yaitu Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) untuk data emisi karbon, Badan Pusat Statistik (BPS) untuk data PDRB, Bank Indonesia (BI) untuk data uang elektronik (*e-money*), serta Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) untuk data rasio elektrifikasi. Pemilihan periode penelitian didasarkan pada ketersediaan dan konsistensi data pada tingkat provinsi, serta untuk menangkap dinamika pascapandemi COVID-19 yang mempengaruhi sistem digitalisasi pembayaran dan konsumsi energi di Indonesia.

Penelitian mencakup 33 provinsi di Indonesia yang memiliki data emisi karbon yang dipublikasikan secara lengkap dan konsisten selama periode pengamatan. Di wilayah Papua, data emisi karbon selama periode penelitian masih tercatat di satuan Provinsi Papua, sementara provinsi hasil pemekaran seperti Papua Barat, Papua Selatan, Papua Tengah, Papua Pegunungan, dan Papua Barat Daya belum memiliki data emisi karbon terpisah. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan Provinsi Papua sebagai representasi wilayah Papua dan menggagalkan provinsi hasil pemekaran untuk menjaga keterbandingan data antarprovinsi.

Penelitian ini menerapkan regresi data panel untuk menganalisis pengaruh *e-money*, laju pertumbuhan PDRB, laju pertumbuhan PDRB kuadrat, dan rasio elektrifikasi terhadap emisi karbon sebagai variabel dependen. Variabel *e-money* diukur berdasarkan jumlah instrumen uang elektronik yang beredar, mencakup instrumen berbasis *chip*, kartu, dan server, dalam satuan juta unit, yang mencerminkan tingkat adopsi infrastruktur pembayaran digital. Emisi karbon diukur dalam satuan ton CO₂ ekuivalen. Variabel laju pertumbuhan PDRB, PDRB kuadrat dan rasio elektrifikasi diukur dalam persentase. Variabel emisi karbon dan jumlah instrumen *e-money* ditransformasikan ke dalam Logaritma Natural (ln) untuk mengurangi potensi heteroskedastisitas dan memungkinkan interpretasi elastisitas. Dalam konteks penelitian ini model diadopsi dari penelitian (Hoa et al., 2024) model dapat dituliskan sebagai:

$$\ln \text{CO}_2 = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{EM}_{it} + \beta_2 \text{PDRB}_{it} + \beta_3 \text{PDRB}_{it}^2 + \beta_4 \text{EM}_{it} + e_{it}$$

Keterangan:

$\ln \text{CO}_2$	=	Emisi karbon
$\ln \text{EM}$	=	Jumlah instrumen <i>e-money</i>
Laju PDRB	=	Laju PDRB atas dasar harga konstan
Laju PDRB ²	=	Laju PDRB yang dikuadratkan
RE	=	Rasio Elektrifikasi
β_0	=	<i>Intercept</i>
$\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4$	=	Koefisien untuk masing-masing regresi
it	=	Data <i>Cross Section</i> dan <i>time Series</i>
ϵ	=	variabel error

Keberadaan *Environmental Kuznets Curve* (EKC) diuji dengan memasukkan variabel laju pertumbuhan PDRB dan laju pertumbuhan PDRB kuadrat ke dalam model regresi. EKC dikatakan terjadi apabila koefisien laju pertumbuhan PDRB bernilai positif dan koefisien laju pertumbuhan PDRB kuadrat bernilai negatif. Selanjutnya, titik balik (*turning point*) EKC dihitung untuk mengidentifikasi tingkat pertumbuhan ekonomi di mana emisi karbon mencapai nilai maksimum sebelum mengalami penurunan.

Pemilihan model regresi data panel dilakukan dengan membandingkan *Common Effect Model* (CEM), *Fixed Effect Model* (FEM), dan *Random Effect Model* (REM). Uji Chow digunakan untuk menentukan model terbaik antara CEM dan FEM, sedangkan uji Hausman digunakan untuk memilih antara FEM dan REM. Model terpilih selanjutnya diuji menggunakan uji signifikansi simultan (uji F) dan uji signifikansi parsial (uji t).

Pengujian hipotesis asumsi klasik dilakukan secara runtut yang meliputi uji multikolinearitas, uji autokorelasi, dan uji heteroskedastisitas. Uji multikolinearitas dilakukan dengan melihat nilai *Variance Inflation Factor* (VIF), di mana model dinyatakan bebas multikolinearitas apabila nilai VIF kurang dari 10. Uji autokorelasi digunakan untuk mengidentifikasi adanya korelasi residu antarperiode waktu. Uji heteroskedastisitas dilakukan untuk memastikan varians residu bersifat konstan. Apabila ditemukan asumsi klasik, penelitian ini menggunakan metode *Generalized Least Squares* (GLS) untuk memperoleh parameter estimasi yang efisien dan memenuhi sifat *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE) (Gujarati, 2015; Wooldridge, 2010).

Seluruh pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Stata.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Pemilihan Model Terbaik

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik emisi karbon, tingkat adopsi uang elektronik, aktivitas ekonomi, dan rasio elektrifikasi bervariasi antarprovinsi di Indonesia selama periode pengamatan. Variasi tersebut mencerminkan perbedaan struktur ekonomi, tingkat industrialisasi, serta kemajuan digitalisasi dan sistem energi di masing-masing wilayah. Provinsi dengan aktivitas ekonomi dan industri yang relatif tinggi cenderung memiliki tingkat emisi karbon yang lebih besar, sementara penggunaan uang elektronik menunjukkan tren peningkatan seiring meluasnya digitalisasi sistem pembayaran. Rasio elektrifikasi yang relatif tinggi di sebagian besar provinsi

mengindikasikan keberhasilan perluasan akses listrik, meskipun perbedaan bauran energi antarwilayah masih menjadi faktor penting dalam dinamika emisi karbon.

Pengujian pemilihan model regresi data panel menunjukkan bahwa *Fixed Effect Model* (FEM) merupakan model yang paling sesuai untuk digunakan dalam penelitian ini. Hasil uji *Chow* mengindikasikan bahwa model dengan efek individual lebih tepat dibandingkan model CEM, sedangkan hasil uji *Hausman* mengonfirmasi bahwa FEM lebih konsisten dibandingkan REM. Temuan ini mengisyaratkan bahwa terdapat karakteristik spesifik antarprovinsi yang tidak dapat diamati secara langsung, namun berpengaruh signifikan terhadap tingkat emisi karbon, sehingga perlu dikontrol melalui pendekatan efek tetap. Berikut merupakan hasil analisis regresi data panel menggunakan model FEM, yaitu:

Tabel 1 Hasil Uji Analisis *Fixed Effect Model*

Variabel	Koefisien	T	Prob.
Konstanta	77.31587	3.39	0.001
Ln <i>E-Money</i>	-1.136446	-1.96	0.054
Laju PDRB	.4958396	2.75	0.008
Laju PDRB Kuadrat	-.0377098	-3.86	0.000
Rasio Elektrifikasi	-69.37457	-3.01	0.004
R-Squared	0.3021		
Prob > F	0.0001		

Tabel 1 menunjukkan bahwa hasil estimasi regresi penggunaan *e-money* memiliki hubungan negatif dengan tingkat emisi karbon di Indonesia. Hubungan ini mengindikasikan peningkatan adopsi instrumen pembayaran digital berpotensi mengurangi emisi karbon melalui penurunan aktivitas ekonomi berbasis fisik, seperti distribusi uang tunai, penggunaan kertas, serta mobilitas dalam transaksi keuangan konvensional. Namun demikian, pengaruh *e-money* terhadap penurunan emisi karbon masih bersifat pendukung dan belum menjadi faktor dominan. Kondisi ini menunjukkan bahwa digitalisasi sistem pembayaran berkontribusi secara tidak langsung terhadap upaya mitigasi emisi karbon. Temuan ini sejalan dengan penelitian Ria et al. (2023) yang menekankan peran sistem pembayaran digital dalam mendukung praktik ekonomi yang lebih ramah lingkungan.

Literatur keuangan digital menunjukkan bahwa digitalisasi keuangan dapat memberikan

kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi karbon, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh uang elektronik di Indonesia masih relatif lemah. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa adopsi *e-money* di Indonesia belum terintegrasi secara langsung dengan sektor-sektor yang berintensitas karbon tinggi, seperti industri dan energi masih didominasi oleh transaksi konsumsi dan jasa. Temuan ini berbeda dengan hasil penelitian di Tiongkok dan negara maju, yang menemukan dampak keuangan digital yang lebih kuat terhadap pengurangan emisi karbon (Chen et al., 2022; Zhou et al., 2023).

Analisis hasil estimasi menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi berkaitan dengan peningkatan emisi karbon, yang mencerminkan bahwa ekspansi aktivitas ekonomi di Indonesia masih diikuti oleh peningkatan konsumsi energi dan aktivitas produksi yang berintensitas karbon. Kondisi ini menggambarkan karakteristik negara berkembang yang masih berada pada tahap awal

hingga menengah pembangunan ekonomi, di mana efisiensi energi dan adopsi teknologi bersih belum sepenuhnya optimal. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Ayudya (2020).

Analisis lanjutan dengan memasukkan komponen nonlinier pertumbuhan ekonomi menunjukkan adanya indikasi hubungan berbentuk U terbalik antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon. Pola hubungan ini mendukung hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC), yang menyatakan bahwa tekanan terhadap lingkungan cenderung meningkat pada tahap awal pembangunan, namun berpotensi menurun setelah mencapai tingkat pendapatan tertentu. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Nikensari et al. (2019) di kawasan Asia dan menunjukkan bahwa proses transisi menuju pembangunan yang lebih berkelanjutan di Indonesia mulai terlihat, meskipun belum sepenuhnya optimal. Berbeda dengan negara-negara yang telah mengalami transformasi struktural industri berteknologi tinggi dan energi menuju bersih, struktur ekonomi Indonesia masih bergantung pada sektor berbasis sumber daya dan energi fosil. Oleh karena itu, keberadaan EKC dalam penelitian ini lebih mencerminkan indikasi awal transisi, sebagaimana dikritisi dalam literatur lingkungan kontemporer (Fankhauser et al., 2022).

Hasil estimasi menunjukkan bahwa rasio elektrifikasi memiliki hubungan negatif dengan emisi karbon, yang mengindikasikan bahwa perluasan akses listrik berpotensi mendukung penurunan emisi karbon. Hubungan ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena rasio elektrifikasi diukur dalam satuan persentase dan merepresentasikan perubahan struktural dalam sistem energi nasional, bukan sekadar peningkatan konsumsi listrik. Oleh karena itu, besarnya respons emisi karbon terhadap perubahan rasio elektrifikasi lebih mencerminkan sensitivitas struktural dibandingkan dampak marginal langsung. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan akses listrik yang disertai dengan efisiensi energi dan pergeseran menuju sumber energi non-fosil berpotensi menekan emisi karbon, meskipun perbedaan skala pengukuran antarvariabel menjadi keterbatasan dalam interpretasi hasil.

Peningkatan elektrifikasi secara normatif sering diasumsikan sejalan dengan penurunan emisi karbon. Namun, hasil

penelitian ini menunjukkan koefisien rasio elektrifikasi yang besar, yang tidak sepenuhnya konsisten dengan asumsi tersebut. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa bauran listrik Indonesia masih didominasi oleh energi fosil, sehingga peningkatan akses listrik belum identik dengan dekarbonisasi. Dengan demikian, pengaruh negatif elektrifikasi terhadap emisi karbon dalam penelitian ini lebih mencerminkan efek transisi energi awal, bukan transformasi energi bersih sepenuhnya (IEA, 2023; Bi et al., 2024).

Nilai koefisien determinasi dalam penelitian ini menunjukkan bahwa variabel yang digunakan hanya mampu menjelaskan sebagian variasi emisi karbon antarprovinsi di Indonesia. Kondisi ini dapat diterima dalam studi lingkungan berbasis data panel, mengingat emisi karbon dipengaruhi oleh berbagai faktor lain di luar model, seperti struktur industri, kebijakan lingkungan daerah, kondisi geografis, dan bauran energi regional. Dengan demikian, nilai koefisien determinasi yang moderat tidak mencerminkan kelemahan model, melainkan menunjukkan kompleksitas faktor-faktor penentu emisi karbon.

Pengujian ketahanan (*robustness check*) dilakukan dengan menggunakan pendekatan estimasi alternatif sebagai pembanding model utama. Hasil estimasi menunjukkan bahwa koefisien variabel utama tidak mengalami perubahan arah yang substantif, namun tingkat signifikansinya relatif melemah. Temuan ini menunjukkan bahwa hasil penelitian cukup sensitif terhadap pendekatan estimasi yang digunakan, sehingga interpretasi hasil perlu dilakukan dengan hati-hati. Meskipun demikian, model utama tetap dipertahankan karena telah disesuaikan dengan karakteristik data dan pelanggaran asumsi klasik.

Uji Asumsi Klasik

Peneliti menggunakan regresi data panel namun, tidak semua jenis uji asumsi klasik pada metode *Ordinary Least Squares* (OLS) dianggap relevan saat digunakan. Penelitian ini hanya menerapkan uji multikolinearitas, uji autokorelasi dan uji heteroskedastisitas, karena dipandang paling tepat untuk menilai kelayakan model pada regresi data panel (Supendi, 2022). Uji multikolinearitas dilakukan untuk mendeteksi adanya korelasi tinggi antarvariabel independen, di mana hubungan yang terlalu kuat

antarvariabel bebas dapat menyebabkan bias pada interpretasi koefisien regresi serta menurunkan akurasi estimasi parameter model.

Hasil pengujian multikolinearitas pada penelitian ini disajikan sebagai berikut:

Tabel 2 Hasil Uji Multikolinearitas

Variabel	VIF	1/VIF
Laju PDRB kuadrat	11.10	0.090078
Laju PDRB	10.92	0.091594
Ln E-money	1.16	0.859050
Rasio Elektrifikasi	1.08	0.927942
Mean VIF	6.07	

Tabel 2 menunjukkan bahwa secara keseluruhan tidak terjadi multikolinearitas karena nilai mean VIF $6.07 < 10$. Variabel independen dikatakan terbebas dari multikolinearitas jika nilai $VIF < 10$ atau $tolerance (1/VIF) > 0.1$. Namun jika dilihat dari masing-masing variabel pada variabel laju PDRB dan PDRB kuadrat nilai $VIF > 10$ atau $tolerance (1/VIF) < 0.1$ yang artinya terjadi masalah multikolinearitas pada variabel laju PDRB dan laju PDRB kuadrat.

Gujarati dan Porter (2009) menjelaskan bahwa multikolinearitas sebagaimana didefinisikan dalam regresi klasik, hanya merujuk pada hubungan linier antarvariabel independen. Hubungan nonlinier antarvariabel, seperti penggunaan variabel dalam bentuk pangkat atau kuadrat tidak serta-merta melanggar asumsi tidak adanya multikolinearitas. Penelitian ini menggunakan variabel laju pertumbuhan PDRB dan laju pertumbuhan PDRB kuadrat untuk menguji keberlakuan hipotesis EKC. Penggunaan variabel tersebut tidak melanggar asumsi klasik multikolinearitas karena hubungan antarvariabel bersifat nonlinier dalam variabel, tetapi tetap linier dalam parameter. Dengan demikian, model regresi yang digunakan dalam penelitian ini tetap valid secara ekonometrika, meskipun potensi peningkatan standar error perlu diperhatikan. Misalnya seperti persamaan berikut:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \beta X_i + \beta_2 X_i^2 + \beta_3 X_i^3 + ui$$

Dimana dikatakan bahwa y adalah total biaya produksi dan X_i adalah output, variabel X_i^2 adalah output kuadrat dan X_i^3 adalah output pangkat tiga, sudah jelas terkait secara fungsional dengan X_i tetapi hubungannya nonlinear. Oleh karena itu, secara tegas model seperti persamaan tidak melanggar asumsi klasik tidak adanya multikolinearitas. Penggunaan

variabel yang berkorelasi secara fungsional, seperti X_i , X_i^2 , dan X_i^3 tidak serta merta melanggar uji asumsi klasik, maka regresi masih bisa dilakukan. Koefisien masih bisa ditafsirkan meskipun memiliki standar error yang besar (Gujarati dan Porter, 2009).

Pengujian autokorelasi dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat korelasi antara residual pada satu periode dengan periode lainnya dalam model data panel. Berikut disajikan hasil uji autokorelasi dalam penelitian ini:

Tabel 3 Hasil Uji Autokorelasi

Uji	Prob.
Uji Autokorelasi	0.0206

Tabel 3 hasil uji autokorelasi menunjukkan bahwa nilai probabilitas lebih kecil dari tingkat signifikansi 5 %, sehingga dapat disimpulkan terdapat indikasi autokorelasi dalam model regresi. Keberadaan autokorelasi menunjukkan error pada satu periode berkorelasi dengan periode sebelumnya, sehingga dapat menyebabkan estimasi *Ordinary Least Squares* menjadi tidak efisien.

Uji heteroskedastisitas digunakan untuk menentukan apakah varians residual pada model regresi tetap (homoskedastisitas) atau tidak konsisten (heteroskedastisitas) karena perubahan nilai variabel independen. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa model memiliki sebaran error yang stabil sehingga hasil estimasi dapat diinterpretasikan secara akurat. Berikut disajikan hasil uji heteroskedastisitas dalam penelitian ini:

Tabel 4 Hasil Uji Heteroskedastisitas

Uji	Prob.
Uji Heteroskedastisitas	0.0006

Tabel 4 hasil uji heteroskedastisitas menunjukkan bahwa nilai probabilitas lebih kecil dari tingkat signifikansi 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa asumsi homoskedastisitas tidak terpenuhi. Temuan ini mengindikasikan adanya heteroskedastisitas, yang berpotensi menyebabkan ketidakefisienan estimasi dan kesalahan inferensi statistik apabila tidak ditangani secara tepat.

Generalized Least Squares (GLS)

Generalized Least Square (GLS) merupakan pengembangan dari metode estimasi *least square* yang dirancang untuk mengatasi permasalahan autokorelasi dan heteroskedastisitas (Gujarati & Porter, 2009). Metode ini mampu menjaga efisiensi estimasi tanpa mengorbankan sifat tidak bias (*unbiased*) dan konsisten dari estimator yang dihasilkan (Ria et al., 2019). Berikut merupakan hasil analisis menggunakan model GLS yaitu:

Tabel 5 Hasil Uji Analisis *Generalized Least Squares*

Variabel	Koefisien	Z	Prob.
Ln E Money	-1.136446	-2.48	0.013
Laju PDRB	.4958396	3.47	0.001
Laju PDRB Kuadrat	-.0377098	-4.87	0.000
Rasio Elektrifikasi	-69.37457	-3.80	0.000
Coefficients	<i>Generalized Least Squares</i>		
Panels	<i>Homoscedastic</i>		
Correlation	<i>No Autocorrelation</i>		

Tabel 5 menunjukkan bahwa hasil estimasi regresi dengan metode GLS, model diasumsikan memenuhi kondisi homoskedastisitas antar panel dan tidak memiliki autokorelasi antar waktu. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan GLS berhasil memperbaiki kelemahan model sebelumnya yang mengandung indikasi autokorelasi dan heteroskedastisitas. Oleh karena itu, model GLS dianggap sebagai model utama yang valid dan efisien untuk menjelaskan pengaruh variabel independen terhadap emisi karbon di Indonesia.

Hasil estimasi menunjukkan bahwa variabel Ln *e-money* memiliki nilai koefisien regresi sebesar -1,136446, yang berarti setiap peningkatan Ln *e-money* sebesar satu satuan akan menurunkan Ln emisi karbon sebesar 1,13 persen, dengan asumsi variabel lain tetap konstan. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa setiap peningkatan Ln *e-money* sebesar satu satuan akan menurunkan Ln emisi karbon sebesar 1,13%, dengan asumsi variabel lainnya konstan. Hasil ini menunjukkan bahwa H_0 ditolak, sehingga variabel Ln *e-money* berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi karbon. Sejalan dengan penelitian Chen et.al 2022 hasil penelitian menunjukkan bahwa pengembangan ekonomi digital dapat secara efektif mendorong pengurangan emisi karbon. Pengembangan

ekonomi digital memiliki peran penting dalam mendorong rasionalisasi struktur industri.

Hasil estimasi penelitian menunjukkan bahwa jumlah instrumen *e-money* berpengaruh negatif terhadap emisi karbon. Variabel *e-money* dalam penelitian ini diukur secara agregat berdasarkan total instrumen uang elektronik yang beredar, yang mencakup instrumen berbasis *chip*, kartu, dan server, sesuai publikasi Bank Indonesia. Pendekatan agregat ini digunakan untuk menangkap tingkat adopsi sistem pembayaran digital secara keseluruhan, sehingga penelitian ini tidak menguji pengaruh masing-masing jenis instrumen secara terpisah. Temuan ini mendukung pandangan bahwa digitalisasi sistem pembayaran melalui praktik *green banking* dapat berkontribusi pada penurunan emisi karbon dengan mengurangi aktivitas transaksi berbasis fisik dan kebutuhan mobilitas (Jiang et al., 2025; Yamanka et al., 2023).

Penggunaan *e-money* mengurangi kebutuhan masyarakat untuk berpindah tempat secara fisik dalam melakukan transaksi. Akibatnya, konsumsi bahan bakar untuk transportasi menurun, demikian pula penggunaan kertas dan listrik yang dibutuhkan dalam sistem keuangan konvensional. Proses ini berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon secara kumulatif (Dong et al., 2023).

Hasil ini konsisten dengan temuan Zhou et al. (2023) yang menunjukkan bahwa inklusi keuangan digital di Tiongkok mampu menurunkan emisi karbon rumah tangga melalui dua saluran utama yaitu efisiensi energi dan perubahan pola konsumsi. Selain itu, Jiang et al. (2025) menemukan bahwa digital *finance* mendorong adopsi teknologi hijau dan efisiensi operasional yang secara langsung berdampak terhadap penurunan intensitas emisi karbon di tingkat regional.

Jumlah instrumen *e-money* di Indonesia mencerminkan meningkatnya adopsi sistem pembayaran digital, khususnya di wilayah-wilayah urban. Hal ini sesuai dengan arah kebijakan nasional dalam *Roadmap Keuangan Berkelanjutan Tahap II (2021–2025)* dari OJK, yang menekankan pentingnya digitalisasi dalam kerangka *green banking* dan pengurangan emisi (OJK, 2021). Dengan demikian, temuan bahwa *e-money* berpengaruh negatif terhadap emisi karbon tidak hanya didukung oleh data empiris, tetapi juga selaras dengan teori dan kebijakan nasional serta internasional. Oleh karena itu, penggunaan jumlah instrumen *e-money* sebagai indikator dari *green banking* dalam penelitian ini dinilai valid dan relevan secara ilmiah.

Hasil estimasi menunjukkan bahwa variabel laju PDRB memiliki koefisien sebesar 0,4958396. Hal ini berarti bahwa ketika laju PDRB meningkat sebesar satu satuan, maka variabel ln emisi karbon akan naik sebesar 0,49%, dengan asumsi variabel lain tetap

konstan. Temuan ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan ekonomi pada tahap awal masih cenderung mendorong peningkatan emisi karbon seiring meningkatnya aktivitas produksi dan konsumsi energi.

Nilai koefisien laju PDRB kuadrat sebesar -0,0377098 menunjukkan hubungan negatif yang signifikan antara pertumbuhan ekonomi kuadrat dan emisi karbon. Artinya, setiap peningkatan satu satuan pada variabel laju PDRB kuadrat akan menurunkan emisi karbon sebesar 0,03%. Hasil penelitian ini memperkuat keberlakuan hipotesis EKC, yang menggambarkan bahwa emisi karbon cenderung meningkat pada fase awal pertumbuhan ekonomi, namun akan mengalami penurunan setelah melewati titik ambang tertentu seiring dengan peningkatan pendapatan dan kesadaran lingkungan. Temuan tersebut konsisten dengan hasil penelitian Cahyani dan Aminata (2020) yang menunjukkan bahwa pendapatan per kapita berpengaruh positif terhadap emisi karbon, sedangkan kuadrat dari pendapatan per kapita memberikan pengaruh negatif, sehingga mendukung adanya pola hubungan berbentuk U terbalik antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan. Koefisien yang diperoleh dari hasil uji determinasi digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi keberadaan EKC dalam model penelitian ini (Nikensari et al., 2019). Berdasarkan hasil analisis, berikut disajikan temuan mengenai indikasi keberadaan EKC di Indonesia:

Tabel 6 Hasil Uji Keberadaan EKC

Sampel	Laju PDRB	Laju $PDRB^2$	EKC
Indonesia	0.4958396,	-0.0377098	Terdapat

Tabel 6 menunjukkan keberadaan hubungan nonlinier antara laju pertumbuhan PDRB dan emisi karbon di Indonesia. Koefisien laju PDRB yang bernilai positif dan koefisien laju PDRB kuadrat yang bernilai negatif menunjukkan pola hubungan berbentuk U terbalik, sehingga dapat disimpulkan bahwa hipotesis EKC terkonfirmasi. Hasil ini menunjukkan bahwa pada tahap awal pertumbuhan ekonomi, emisi karbon cenderung meningkat, namun setelah mencapai tingkat pertumbuhan tertentu, emisi karbon berpotensi menurun. Berikut hasil *turning point* PDRB Indonesia:

Tabel 7 Uji Turning Point EKC Indonesia

EKC	<i>Turning Point</i>
Laju PDRB	6.57

Tabel 7 menunjukkan nilai *turning point* EKC Indonesia yang mewakili tingkat laju pertumbuhan PDRB di mana emisi karbon mencapai titik maksimum sebelum mengalami penurunan. Nilai *turning point* tersebut mengindikasikan bahwa setelah melewati tingkat pertumbuhan ekonomi tertentu, peningkatan aktivitas perekonomian tidak lagi

diikuti oleh kenaikan emisi karbon, malah cenderung menurun.

Nilai koefisien rasio elektrifikasi sebesar -69.37457, artinya jika variabel rasio elektrifikasi mengalami kenaikan sebesar satu satuan, maka variabel $\ln$ emisi karbon akan mengalami penurunan sebesar 69.37%. Hal ini menunjukkan bahwa dalam pengujian ini H_0 ditolak, variabel rasio elektrifikasi berpengaruh negatif signifikan terhadap $\ln$ emisi karbon. Sejalan dengan penelitian Yang et al., 2025 hasil penelitiannya menunjukkan bahwa elektrifikasi dapat mengurangi emisi jangka panjang dengan peningkatan penetrasi energi bersih. Namun, tidak selalu mencapai dekarbonisasi karena ketidaksesuaian antara ketersediaan dan permintaan energi bersih.

Berdasarkan hasil estimasi model, variabel rasio elektrifikasi menunjukkan pengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi karbon di tingkat provinsi di Indonesia. Artinya, semakin tinggi rasio elektrifikasi pada suatu provinsi, maka emisi karbon per kapita cenderung lebih rendah. Hasil ini secara statistik signifikan, namun nilai koefisiennya tergolong tinggi, sehingga perlu dilakukan interpretasi dengan hati-hati. Secara konseptual, elektrifikasi dianggap sebagai salah satu indikator transisi energi. Peningkatan akses dan penggunaan listrik berpotensi menggeser konsumsi energi dari bahan bakar padat dan cair (seperti kayu bakar, minyak tanah, dan bensin) ke bentuk energi yang lebih efisien dan terkontrol, yakni listrik. Hal ini sejalan dengan penelitian Haoming Bi 2024 yang menyatakan rasio elektrifikasi didefinisikan sebagai pangsa listrik dalam konsumsi energi final, sebagai variabel penjelas utama untuk menangkap tingkat transisi energi struktural dalam setiap perekonomian.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2023 menyatakan bahwa persentase bauran energi terbarukan di Indonesia pada tahun 2023 13.09 % (Badan Pusat Statistik, 2024). Oleh karena itu, secara tidak langsung peningkatan rasio elektrifikasi belum tentu secara langsung menurunkan emisi karbon. Hal ini disebabkan oleh, energi listrik itu sendiri masih bersumber dari bahan bakar fosil yang intensif karbon (Labiba & Pradoto, 2018). Maka dari itu, hubungan negatif yang ditemukan dalam hasil regresi kemungkinan besar tidak mencerminkan efek langsung dari “dekarbonisasi listrik”, tetapi lebih kepada efek

tidak langsung seperti berkurangnya pembakaran biomassa tradisional dan meningkatnya efisiensi penggunaan energi (Lab. Meningkatkan porsi listrik dalam konsumsi energi final dapat membantu pengurangan emisi CO₂ dan polutan udara di seluruh perekonomian, walaupun dampaknya bergantung pada campuran pembangkitan listrik (Ismail, 2022).

Penggunaan rasio elektrifikasi sebagai variabel independen dalam penelitian ini juga didorong oleh keterbatasan ketersediaan data energi yang lebih spesifik per provinsi. Data mengenai konsumsi energi final berdasarkan jenis energi (listrik, solar, bensin, LPG, batu bara, dan lain-lain) belum tersedia secara lengkap dan konsisten di tingkat provinsi. Maka, variabel ini digunakan sebagai proxy untuk menggambarkan kemajuan transisi energi. Keterbatasan ini juga diakui dalam studi-studi energi lintas negara berkembang. Hal ini didukung oleh studi Bi et al. (2024) yang menyatakan bahwa rasio elektrifikasi dapat dijadikan sebagai proksi transisi energi di negara berkembang ketika data konsumsi energi belum tersedia secara rinci. Selain itu, menurut DeAngelo et al. (2021), elektrifikasi merupakan langkah awal dalam mengurangi emisi karbon secara global, khususnya ketika dikombinasikan dengan pembangkit energi rendah karbon.

Model regresi utama dalam penelitian ini diestimasi menggunakan *Fixed Effect Model* (FEM) untuk menangkap perbedaan karakteristik yang tidak teramati antarprovinsi. Hasil pengujian asumsi klasik menunjukkan adanya heteroskedastisitas dan autokorelasi, sehingga estimasi dilakukan menggunakan metode *Generalized Least Squares* (GLS) sebagai prosedur koreksi untuk memperoleh parameter yang efisien dan konsisten. Penggunaan GLS dalam penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai model alternatif untuk dibandingkan, melainkan sebagai metode estimasi yang memperbaiki pelanggaran asumsi pada model FEM.

SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *e-money*, laju pertumbuhan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB), laju pertumbuhan PDRB kuadrat, dan rasio elektrifikasi terhadap emisi karbon di Indonesia pada tingkat provinsi selama periode 2021–2023. Hasil estimasi

menunjukkan bahwa digitalisasi sistem pembayaran yang diwakili oleh jumlah instrumen uang elektronik yang berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon, meskipun pengaruhnya bersifat moderat. Variabel ekonomi yang direpresentasikan oleh laju pertumbuhan PDRB menunjukkan hubungan nonlinier dengan emisi karbon, di mana pertumbuhan ekonomi pada tahap awal cenderung meningkatkan emisi, namun pada tingkat pertumbuhan tertentu emisi karbon mulai menurun. Pola ini mendukung keberlakuan hipotesis EKC dalam konteks pembangunan ekonomi Indonesia. Sementara itu, rasio elektrifikasi menunjukkan pengaruh negatif terhadap emisi karbon, yang mengindikasikan bahwa meluasnya akses listrik yang disertai peningkatan efisiensi energi berpotensi menekan emisi.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi kebijakan yang relevan bagi upaya pencapaian pembangunan rendah karbon di Indonesia. Kontribusi *e-money* terhadap penurunan emisi karbon menunjukkan bahwa digitalisasi sistem pembayaran dapat diintegrasikan ke dalam kebijakan *green finance*, misalnya melalui penguatan transaksi non-tunai pada sektor transportasi, energi, dan layanan publik. Selain itu, adanya hubungan nonlinier antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon menegaskan pentingnya kebijakan yang mendorong pertumbuhan ekonomi berbasis efisiensi energi dan teknologi ramah lingkungan, terutama setelah perekonomian mencapai tingkat pertumbuhan tertentu. Dengan demikian, sinergi antara kebijakan digitalisasi keuangan, pengembangan energi bersih, dan peningkatan kualitas pertumbuhan faktor ekonomi menjadi penting dalam mendukung pencapaian target *Net Zero Emission* Indonesia 2060.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Periode pengamatan yang relatif pendek membatasi kemampuan analisis dalam menangkap dinamika jangka panjang emisi karbon. Selain itu, penggunaan variabel *e-money* dalam bentuk agregat belum memungkinkan identifikasi pengaruh masing-masing jenis instrumen pembayaran digital secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan rentang waktu yang lebih panjang, memasukkan variabel tambahan ekonomi seperti struktur industri atau bauran

energi terbarukan, serta mengkaji lebih lanjut peran digitalisasi keuangan dalam mendukung transisi menuju ekonomi rendah karbon di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayudya Vini Oktavia. (2020). *Hubungan Antara Pertumbuhan Ekonomi, Konsumsi Energi, Dan Emisi Karbon Dioksida Di 110 Negara Periode 1990-2017*.
- Bi, Q., Guo, M., & Khan, M. A. (2024). *Electrification and CO₂ emissions: Evidence from emerging economies using dynamic panel data approach*. *Energies*, 17(13), 3111. <https://doi.org/10.3390/en17133111>
- Cahyani, M. D., & Aminata, J. (2020). Peran Energi Terbarukan dan Energi Nuklir: Analisis Empiris Environmental Kuznets Curve Di Negara BRICS Periode 1996-2016. *Diponegoro Journal of Economics*, 9(1). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jme/article/download/31499/25649%0Ahttps://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jme/article/view/31499%0Ahttps://lens.org/142-642-451-217-684>
- Chen, H., & Wang, Y. (2025). Can electrification mitigate the marginal cost of carbon emission abatement? Evidence from China. *Utilities Policy*, 93(June 2024), 101883. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2024.101883>
- Chen, X., Liu, Y., & Gong, X. (2022). Digital finance and carbon emissions: Evidence from China. *Energy Economics*, 112, 106120. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106120>
- DeAngelo, J., Azevedo, I., Bistline, J., Clarke, L., Luderer, G., Byers, E., & Davis, S. J. (2021). *Energy systems in scenarios at net-zero CO₂ emissions*. *Nature Communications*, 12, Article 6096. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26373-x>
- Dong, K., et al. (2025). *The Impact of Digital Finance on Carbon Emission Performance*. *Polish Journal of Environmental Studies*
- Fatiha, N., Insani, N., & Robertus, H. (2024). *Analisis Environmental Kuznets Curve*

- Pada Pdrb Sektoral Terhadap Emisi Gas Rumah Kaca Di Provinsi Jawa Timur Tahun 1990-2022*. 13(3).
- Fankhauser, S., Smith, S., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., Kendall, J., Khosla, R., Lezaun, J., Mitchell-Larson, E., Obersteiner, M., Rajamani, L., & Setzer, J. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change*, 12, 15–21. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01245-w>
- Gujarati, N. D. (2015). *Dasar-dasar Ekonometrika: 5th Edition*. Jakarta: Salemba.
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Basic econometrics (5th ed.)*. McGraw-Hill. <https://doi.org/10.31955/mea.v8i2.4129>
- Hilal, A., & Sumadi. (2023). Determinasi Minat Menggunakan E-Money pada Generasi Milenial Di Yogyakarta. *Selekta Manajemen: Jurnal Mahasiswa Bisnis & Manajemen*, 02(04).
- Hoa, P. X., Xuan, V. N., & Thu, N. T. P. (2024). Factors affecting carbon dioxide emissions for sustainable development goals – New insights into six asian developed countries. *Heliyon*, 10(21), e39943. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39943>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA.
- Ismail A. (2022). Kajian Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Perkembangan Teknologi Elektrifikasi Baterai Ponsel Pintar Study of Greenhouse Gas (GHG) Emissions from the Development of Smartphone Battery Electrification Technology. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 4(2), 31–37. <https://doi.org/10.35970/jppl.v4i2.1434>
- Jiang, Y., Zhao, R., & Qin, G. (2025). How does digital finance reduce carbon emissions intensity? *Evidence from production and green technology innovation*. *Science of The Total Environment*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Statistik ketenagalistrikan tahun 2023 (Edisi No. 37)*. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/e6394-buku-statistik-ketenagalistrikan-2023-esdm-revised.pdf
- Labiba, D., & Pradoto, W. (2018). Sebaran Emisi Co2 Dan Implikasinya Terhadap Penataan Ruang Area Industri Di Kabupaten Kendal. *Jurnal Pengembangan Kota*, 6(2), 164. <https://doi.org/10.14710/jpk.6.2.164-173>
- Li, X., Hu, Y., Ding, L., Huang, Q., & Jiang, Y. (2024). Impact of the digital trade on lowering carbon emissions in 46 countries. *Scientific Reports*, 14, Article 259K57. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-25957-9>
- Nikensari, S. I., Destilawati, S., & Nurjanah, S. (2019). Studi Environmental Kuznets Curve Di Asia: Sebelum Dan Setelah Millennium Development Goals. *Jurnal Ekonomi Pembangunan*, 27(2). <https://doi.org/10.14203/jep.27.2.2019.11-25>
- Rahmawati, A., & Hendrato, M. (2023). *Pengaruh Konsumsi Listrik, Pertumbuhan Ekonomi, Industrialisasi, Dan Keterbukaan Perdagangan Terhadap Emisi Co2 Di Indonesia* 12(3), 13–21. <https://repofeb.undip.ac.id/12816/>
- Ria, D., Fasa, M. I., Suharto, S., & Fachri, A. (2023). Penerapan Green Banking Di Lingkungan Bank Muamalat Indonesia. *Jihbiz: Global Journal of Islamic Banking and Finance*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.22373/jihbiz.v5i1.17195>
- Sudirman, F. A., & Lestari, D. T. (2023). Tinjauan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) di Afrika: Literatur review. *Share: Social Work Journal*, 13(2), 205–218. <https://doi.org/10.45814/share.v13i2.39327>
- Yamaka, W., Shi, R., Maneejuk, P., & Chi, C. (2023). Spatial spillover effects of internet development on foreign trade in China. *Sustainability*, 15(5), 4213. <https://doi.org/10.3390/su15054213>
- Yang, Y., Adhikari, R., Lou, Y., O'Donnell, J., Hewitt, N., & Zuo, W. (2024). *Long-term impact of electrification and*

retrofits of the U.S. residential building in diverse locations. Building and Environment, 252, 112472.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112472>

Zhou, Y., Wang, M., & Zhang, X. (2023). Digital financial inclusion and household carbon emissions. *Journal of Environmental Management*, 325, 116519.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116519>