

**PERAN KONSUMSI ENERGI TERBARUKAN DALAM MENEKAN
EMISI KARBONDIOKSIDA (CO₂) DI TENGAH PERTUMBUHAN
EKONOMI: STUDI NEGARA ANGGOTA G20**

SKRIPSI



Oleh:

Nama : Teguh Nugraha
Nomor Mahasiswa : 22313087
Program Studi : Ekonomi Pembangunan

**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS BISNIS DAN EKONOMIKA**

2026

**Peran Konsumsi Energi Terbarukan Dalam Menekan Emisi Karbondioksida
(CO₂) Di Tengah Pertumbuhan Ekonomi: Studi Kasus Negara Anggota G20**

SKRIPSI

Disusun dan diajukan untuk memenuhi syarat ujian akhir
Guna memperoleh gelar Sarjana jenjang strata 1
Program Studi Ekonomi Pembangunan
Pada Fakultas Bisnis dan Ekonomika
Universitas Islam Indonesia

Oleh :

Nama : Teguh Nugraha
NIM : 22313087
Program Studi : Ekonomi Pembangunan

**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS BISNIS DAN EKONOMIKA
2026**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan bahwa skripsi ini telah ditulis dengan sungguh-sungguh dan tidak terdapat bagian yang dapat dikategorikan dalam tindakan plagiasi seperti dimaksud dalam buku pedoman penulisan skripsi Program Studi Ekonomi Pembangunan Fakultas Bisnis dan Ekonomika Universitas Islam Indonesia. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Yogyakarta, 16 April 2026

Penulis,



Teguh Nugraha

BERITA ACARA UJIAN TUGAS AKHIR/SKRIPSI

SKRIPSI BERJUDUL

PERAN KONSUMSI ENERGI TERBARUKAN DALAM MENEKAN EMISI KARBONDIOKSIDA (CO₂)
DI TENGAH PERTUMBUHAN EKONOMI: STUDI KASUS NEGARA ANGGOTA G20

Disusun oleh : TEGUH NUGRAHA

Nomor Mahasiswa : 22313087

Telah dipertahankan didepan Tim Penguji dan dinyatakan Lulus
pada hari, tanggal: Rabu, 06 Mei 2026

Penguji/Pembimbing Skripsi : Prof. Jaka Sriyana, SE., M.Si., Ph.D.

Penguji : Aminuddin Anwar, SE.,M.Sc.

Mengetahui
Dekan Fakultas Bisnis dan Ekonomika
Universitas Islam Indonesia



Prof. Johan Arifin, S.E., M.Si., Ph.D.

LEMBAR PENGESAHAN
PERAN KONSUMSI ENERGI TERBARUKAN DALAM MENEKAN EMISI
KARBONDIOKSIDA DI TENGAH PERTUMBUHAN EKONOMI: STUDI
KASUS NEGARA ANGGOTA G20

Nama : Teguh Nugraha
NIM : 22313087
Program Studi : Ekonomi Pembangunan

Yogyakarta, 5 April 2026
Telah disetujui dan disahkan oleh
Dosen Pembimbing



Prof. Jaka Sriyana S.E., M.Si., Ph.D.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji syukur tak terhingga penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga karya tulis ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik. Sholawat serta salam senantiasa tercurah kepada teladan agung, Nabi Muhammad SAW, yang telah membawa risalah pencerahan bagi umat manusia. Sebagai wujud rasa syukur dan bakti yang mendalam, karya ini penulis persembahkan kepada:

Kedua orang tua tercinta, Bapak Ading Sukana dan Ibu Nia Suniawati. Terimakasih atas segala pengorbanan, tetesan peluh, serta untaian doa yang tak pernah putus mengiringi setiap langkah penulis hingga titik ini.

Sahabat dan rekan-rekan seperjuangan yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Terima kasih atas kehadiran, dukungan emosional, serta diskusi-diskusi membangun yang turut membentuk wawasan penulis dalam proses pencapaian tujuan akademis ini.

Serta tak lupa, rasa terima kasih yang mendalam penulis sampaikan kepada Dosen Pembimbing. Dedikasi waktu, tenaga, dan arahan komprehensif yang telah diberikan sangatlah berharga dalam menuntun penulis merampungkan penyusunan skripsi ini.

KATA PENGANTAR

Assalumuallaikum warrahmatullahi wabarakatub

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, Sang Pemilik Semesta Ilmu, atas limpahan rahmat dan ketetapan-Nya sehingga karya ini dapat dituntaskan dengan penuh kelancaran. Selawat serta salam senantiasa tercurah kepada uswatun hasanah, Nabi Muhammad SAW, pembawa risalah pencerahan yang menuntun umat manusia menuju cakrawala ilmu pengetahuan. Atas izin Allah SWT, skripsi bertajuk "Peran Konsumsi Energi Terbarukan dalam Menekan Emisi Karbondioksida di Tengah Pertumbuhan Ekonomi: Studi Kasus Negara Anggota G20" ini telah terselesaikan. Penulisan ini merupakan manifestasi perjalanan akademik penulis sekaligus prasyarat perolehan gelar Sarjana Ekonomi pada Fakultas Bisnis dan Ekonomika, Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyadari bahwa selesainya naskah ini bukan sekadar hasil jerih payah pribadi, melainkan wujud nyata dari besarnya dukungan, doa yang senantiasa melangit, serta kasih sayang yang tak bertepi dari orang-orang terkasih. Maka dari itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Johan Arifin, S.E, M.Si., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Bisnis dan Ekonomika Universitas Islam Indonesia, atas kebijakan dan dukungan fasilitas akademik yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh studi.
2. Bapak Abdul Hakim, S.E., M, Ec., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Ekonomi Pembangunan, atas segala kemudahan administrasi, bimbingan, serta motivasi yang diberikan kepada penulis
3. Bapak Prof. Jaka Sriyana, S.E., M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang telah menjadi lentera dalam proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas kesabaran, waktu, serta bimbingan intelektual yang luar biasa dalam menuntun penulis menemukan arah hingga karya ini terslesaikan dengan baik.
4. Kedua orang tua saya, Bapak Ading Sukana dan Ibu Suniawati, terimakasih atas cinta yang tak pernah luruh, doa-doa yang terus membumi, serta pengorbanan yang menjadi energi utama dalam penyelesaian studi ini. Tak lupa kepada seluruh

keluarga besar Suhri Family dan Nutatih Family atas dukungan moral yang menjadi sandaran hangat bagi penulis.

5. Sahabat “Cemara x Broken”, terima kasih telah menjadi kawan dalam suka dan duka. Kehadiran kalian lebih dari sekadar pertemanan, kalian adalah keluarga yang membuat perjalanan akademik yang melelahkan ini terasa jauh lebih bermakna dan penuh warna.
6. Keluarga Ruang Tumbuh FMIE FBE UII, rumah kedua bagi penulis untuk berproses. Terima kasih telah menjadi pelajaran berharga tentang integritas, kepemimpinan, dan solidaritas. Menjadi bagian dari keluarga ini adalah salah satu pendewasaan terbaik dalam masa kuliah penulis.
7. Segenap pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, motivasi, serta kemudahan baik secara langsung maupun tidak langsung. Semoga segala kebaikan menjadi amal jariyah yang berlipat ganda di sisi Allah SWT.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan dan memiliki berbagai keterbatasan. Oleh karena itu, penulis dengan tangan terbuka mengharapkan kritik serta saran yang bersifat konstruktif demi penyempurnaan di masa mendatang. Akhir kata, besar harapan penulis semoga skripsi ini tidak hanya menjadi syarat akademis semata, namun juga mampu memberikan kontribusi bermakna serta manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan kita semua.

Wassalamualaikum warrahmatullahi wabarakatuh.

Yogyakarta, 16 April 2026



Teguh Nugraha

DAFTAR ISI

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiv |
| ABSTRAK | xv |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 12 |
| 1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian..... | 12 |
| 1.3.1 Tujuan Penelitian | 12 |
| 1.3.2 Manfaat Penelitian | 13 |
| BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI..... | 14 |
| 2.1 KAJIAN PUSTAKA | 14 |
| 2.2 Landasan Teori | 17 |
| 2.2.1 Teori Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Theory) .. | 17 |
| 2.2.2 Teori Ekonomi Lingkungan (<i>Environmental Economics</i>) | 19 |
| 2.2.3 Hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC) | 19 |
| 2.2.4 Model STIRPAT (Stochastic Regression on Population, Affluence, and Technology) | 22 |
| 2.2.5 Teori Transisi Energi (Energy Transition Theory) | 23 |
| 2.2.6 Teori Modernisasi Ekologi (Ecological Modernization Theory)..... | 24 |
| 2.2.7 Teori Carbon Sink dan Sekuestrasi Karbon | 25 |
| 2.3 Hubungan Antar Variabel..... | 27 |
| 2.3.1 Hubungan Pertumbuhan Ekonomi terhadap Emisi Karbondioksida | 27 |
| 2.3.2 Hubungan Konsumsi Energi Fosil terhadap Emisi Karbondioksida | 27 |
| 2.3.3 Hubungan Konsumsi Energi Terbarukan terhadap Emisi Karbondioksida | 28 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.4 Hubungan Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi Karbondioksida .. | 29 |
| 2.3.5 Hubungan Urbanisasi terhadap Emisi Karbondioksida | 29 |
| 2.3.6 Hubungan Luas Kawasan Hutan terhadap Emisi Karbondioksida | 30 |
| 2.4 Hipotesis Penelitian..... | 31 |
| 2.5 Kerangka Pemikiran..... | 31 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 32 |
| 3.1 Jenis dan Cara Pengumpulan Data | 32 |
| 3.1.1 Jenis Data..... | 32 |
| 3.1.2 Cara Pengumpulan Data..... | 33 |
| 3.2 Definisi Variabel Operasional | 34 |
| 3.3 Metode Analisis | 38 |
| 3.4 Model Regresi Data Panel..... | 41 |
| 3.4.1 Common Effect Model (CEM) | 41 |
| 3.4.2 Fixed Effect Model (FEM) | 42 |
| 3.4.3 Random Effect Model (REM)..... | 43 |
| 3.5 Pemilihan Model Regresi..... | 44 |
| 3.5.1 Uji Chow (<i>Chow Test</i>)..... | 44 |
| 3.5.2 Uji Hausman (Hausman-Test) | 46 |
| 3.5.3 Uji Lagrange Multiplier (LM) | 47 |
| 3.6 Uji Asumsi Klasik..... | 48 |
| 3.6.1 Uji Multikolinearitas | 49 |
| 3.6.2 Uji Heteroskedastisitas | 49 |
| 3.6.3 Uji Autokorelasi | 50 |
| 3.6.4 Uji Normalitas..... | 51 |
| 3.7 Uji Hipotesis (Kelayakan Model) | 52 |
| 3.7.1 Uji Signifikansi Parsial (Uji t) | 52 |
| 3.7.2 Uji Signifikansi Simultan (Uji F) | 53 |
| 3.7.3 Koefisien Determinasi (R^2) | 53 |
| BAB IV HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN | 54 |
| 4.1 Deskripsi Data Penelitian..... | 54 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 Hasil Analisis dan Pembahasan | 55 |
| 4.2.1 Analisis Statistik Deskriptif | 55 |
| 4.2.1 Uji Chow | 56 |
| 4.2.2 Uji Hausman..... | 57 |
| 4.2.3 Uji Multikolinearitas | 57 |
| 4.2.4 Uji Normalitas | 58 |
| 4.3 Estimasi Model Terbaik (REM) | 59 |
| 4.4 Uji Statistik | 60 |
| 4.4.1 Uji t-Statistik..... | 60 |
| 4.4.2 Pengujian Signifikansi Simultan (Uji F) | 65 |
| 4.4.3 Koefisien Determinasi (R-Squared/R ²)..... | 66 |
| 4.5 Pembahasan Ekonomi..... | 66 |
| 4.5.1 Pengaruh Variabel GDP Per Kapita dan GDP Per Kapita Kuadrat terhadap Emisi CO ₂ (Keberlakuan EKC)..... | 66 |
| 4.5.2 Pengaruh Variabel Konsumsi Energi Terbarukan terhadap Emisi CO ₂ .. | 68 |
| 4.5.3 Pengaruh Variabel Konsumsi Energi Fosil terhadap Emisi CO ₂ | 69 |
| 4.5.4 Pengaruh Variabel Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi CO ₂ | 69 |
| 4.5.5 Pengaruh Variabel Urbanisasi terhadap Emisi CO ₂ | 70 |
| 4.5.5 Pengaruh Variabel Luas Kawasan Hutan terhadap Emisi CO ₂ | 71 |
| BAB V SIMPULAN DAN IMPLIKASI | 73 |
| 5.1 Simpulan | 73 |
| 5.2 Implikasi | 74 |
| DAFTAR PUSTAKA | 77 |
| LAMPIRAN..... | 81 |

DAFTAR TABEL

| | |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Tabel 3.1 Variabel, Simbol, Satuan, Sumber Data..... | 34 |
| <i>Tabel 4.1 Statistik Deskriptif</i> | 55 |
| Tabel 4.2 Uji Stationeritas | Error! Bookmark not defined. |
| <i>Tabel 4.3 Uji Kointegrasi</i> | Error! Bookmark not defined. |
| <i>Tabel 4.4 Uji Chow</i> | 56 |
| <i>Tabel 4.5 Uji Hausman</i> | 57 |
| Tabel 4.6 Uji Multikolinearitas | 58 |
| Tabel 4.7 Uji Normalitas | 59 |
| Tabel 4.8 Random Effect Model (REM)..... | 59 |
| Tabel 4.9 Uji t-Statistik | 60 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1.1 Tren Akumulasi Konsentrasi CO2 Global..... | 2 |
| <i>Gambar 1.2 Korelasi Pertumbuhan GDPK (USD) dan Emisi CO2 (Metric Tons) Negara G20</i> | 4 |
| <i>Gambar 1.3 Pangsa Konsumsi Energi Primer G20 2011-2021 (%)</i> | 6 |
| Gambar 1.4 Proporsi Luas Kawasan Hutan Negara G20 (%)..... | 7 |
| <i>Gambar 1.5 Ketergantungan Perdagangan Internasional G20 (%)</i> | 8 |
| Gambar 1.6 Tingkat Urbanisasi di Negara G20 (%)..... | 10 |
| Gambar 2.1 Tiga Pilar Pembangunan Berkelanjutan | 18 |
| <i>Gambar 2.2 Kurva Lingkungan Kuznetz</i> | 20 |
| <i>Gambar 2.3 Kerangka Pemikiran</i> | 32 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| Lampiran I. Data Variabel..... | 81 |
| Lampiran II. Statistik Deskriptif..... | 89 |
| Lampiran III. Uji Chow..... | 90 |
| Lampiran IV. Uji Hausman..... | 91 |
| Lampiran V. Hasil Estimasi Random Effect Model (REM)..... | 92 |
| Lampiran VI. Uji Multikolinearitas..... | 93 |
| Lampiran VII. Uji Normalitas..... | 94 |
| Lampiran VIII. Uji Kointegrasi..... | 95 |

ABSTRAK

**PERAN KONSUMSI ENERGI TERBARUKAN DALAM MENEKAN
EMISI KARBON DIOKSIDA DI TENGAH PERTUMBUHAN EKONOMI:
STUDI KASUS NEGARA ANGGOTA G20**

Oleh
TEGUH NUGRAHA

Penelitian ini menganalisis determinan emisi karbondioksida (CO₂) di negara-negara G20 melalui integrasi model STIRPAT. Studi ini menguji validitas hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) serta mengevaluasi dampak bauran energi dan dinamika demografi terhadap degradasi ekologi. Analisis dilakukan menggunakan metode regresi data panel untuk menghasilkan estimasi yang robust. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi (GDP per kapita dan kuadratnya) tidak berpengaruh signifikan, yang mengonfirmasi bahwa fenomena EKC tidak teramati di wilayah G20. Secara parsial, konsumsi energi terbarukan terbukti secara signifikan mampu memitigasi emisi. Sebaliknya, ketergantungan pada energi fosil serta akselerasi urbanisasi menjadi determinan utama yang meningkatkan emisi karbon secara signifikan. Sementara itu, variabel keterbukaan perdagangan dan luas kawasan hutan tidak menunjukkan pengaruh yang berarti dalam model ini. Temuan ini mengimplikasikan bahwa peningkatan pendapatan nasional bukan merupakan solusi otomatis bagi perbaikan lingkungan. Negara-negara G20 memerlukan transformasi kebijakan yang berfokus pada percepatan transisi energi bersih serta desain tata ruang kota yang berkelanjutan guna mengendalikan jejak karbon urban secara efektif.

Kata Kunci: *Emisi Karbondioksida (CO₂), G20, GDP Per Kapita, Energi Terbarukan, Energi Fosil, Urbanisasi, Luas Kawasan Hutan, Keterbukaan Perdagangan, Model STIRPAT, EKC.*

BAB I PENDAHULUAN

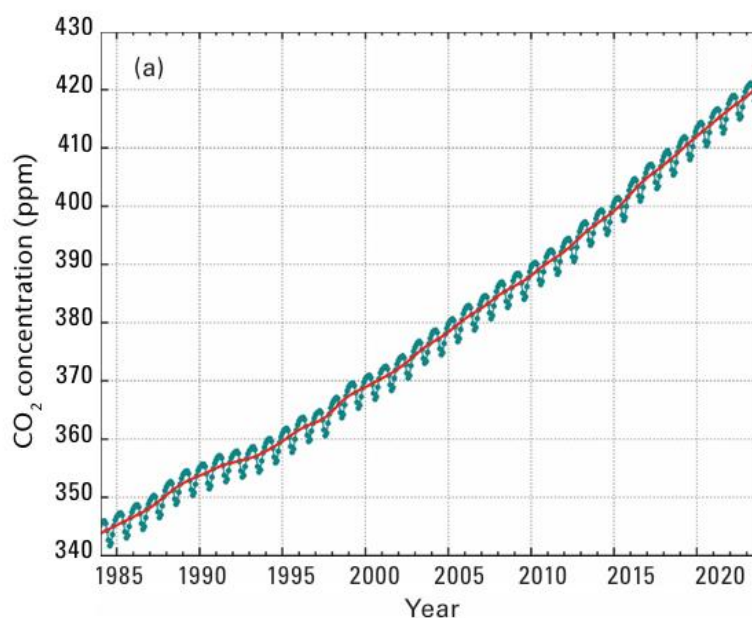
1.1 Latar Belakang

Eskalasi krisis iklim yang bersifat multidimensional pada dekade ketiga abad ke-21 telah menjelma menjadi ancaman eksistensial yang mengganggu stabilitas ekosistem serta tatanan ekonomi, sosial global. Merujuk pada laporan strategis *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2022) akumulasi gas rumah kaca terutama karbon dioksida (CO₂) telah menembus ambang batas tertinggi yang melampaui seluruh catatan sejarah peradaban modern. Lonjakan konsentrasi gas tersebut, sebagaimana ditekankan dalam laporan tersebut, menjadi pemicu rantai bencana lingkungan sistemik, mulai dari anomali suhu ekstrem hingga kenaikan permukaan air laut yang mengancam wilayah pesisiran secara luas. Kondisi ini menegaskan bahwa degradasi kualitas atmosfer telah bergeser dari sekadar diskursus ekologi menjadi variabel kritis yang menentukan batas aman bagi ketahanan peradaban serta keberlangsungan tatanan sosial ekonomi global di masa depan.

Manifestasi krisis iklim ini dipertegas oleh temuan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2021) yang memvalidasi adanya anomali suhu permukaan global sebesar 1,1°C di atas rerata era pra-industri. Angka ini mendekati ambang batas kritis 1,5°C yang ditetapkan dalam *Paris Agreement*, yang menuntut komitmen radikal dari seluruh negara untuk menahan laju pemanasan global. Kenaikan suhu yang eksponensial ini mencerminkan kegagalan sistemik dalam menekan laju akumulasi emisi antropogenik di atmosfer. Merujuk pada *International Energy Agency* (2023), sektor energi menjadi determinan krusial dalam dinamika ini, mengingat ketergantungan masif pada bahan bakar fosil masih menyumbang lebih dari 75% terhadap total emisi gas rumah kaca dunia. Realitas tersebut menegaskan bahwa paradigma pembangunan ekonomi yang mengandalkan intensitas energi konvensional kini berada pada titik jenuh sehingga menciptakan urgensi bagi rekonstruksi kebijakan energi global yang berbasis pada prinsip dekarbonisasi dan keberlanjutan.

Ironisnya, laporan terbaru dari *World Meteorological Organization* (2024) mengonfirmasi bahwa konsentrasi gas rumah kaca atmosferik telah mencapai

rekor destruktif 420 ppm. Angka membuktikan laju dekarbonisasi global belum berhasil mengimbangi intensitas, sekaligus menciptakan kontradiksi tajam terhadap narasi *Net-Zero* Emission. Sebagai pemegang kendali atas 80% ekonomi dunia, negara-negara G20 memegang tanggung jawab kolektif yang paling signifikan atas akumulasi tersebut. Ketidakmampuan instrumen kebijakan dalam memitigasi anomali emisi ini mengindikasikan kegagalan struktural dalam menyelaraskan target pertumbuhan ekonomi dengan daya dukung lingkungan. Oleh karena itu, efektivitas kebijakan energi G20 bukan sekadar pilihan domestik, melainkan determinan tunggal bagi keberhasilan target dekarbonisasi global, sebagaimana tercermin pada eskalasi CO₂ dalam Gambar 1.1 berikut:



Gambar 1.1 Tren Akumulasi Konsentrasi CO₂ Global

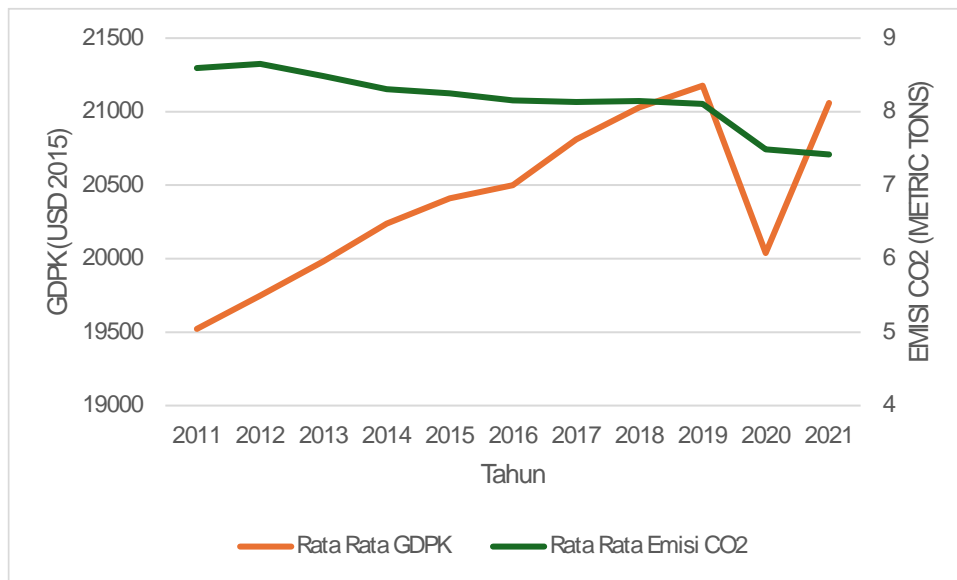
Sumber: World Meteorological Organization (2024)

Tren pada gambar 1.1 yang menunjukkan peningkatan konsentrasi CO₂ global secara konsisten membuktikan bahwa ekspansi energi terbarukan terutama di negara-negara G20 sebagai penyumbang emisi terbesar saat ini belum mampu mengimbangi laju aktivitas ekonomi berbasis karbon dunia. Kondisi ini mengindikasikan belum optimalnya proses *decoupling* di tingkat global, di mana

peningkatan kapasitas energi bersih belum berdampak signifikan pada penurunan beban emisi riil. Fenomena ini memunculkan urgensi untuk meneliti apakah konsumsi energi terbarukan benar-benar berfungsi sebagai substitusi bahan bakar fosil atau sekadar menjadi tambahan pasokan energi (*energy addition*) di negara G20.

Eskalasi emisi yang tergambar pada Gambar 1.1 pada dasarnya merupakan konsekuensi logis dari ambisi pertumbuhan ekonomi di negara-negara G20. Sebagai blok yang menguasai sekitar 80% PDB dunia, peningkatan GDP per kapita di negara-negara anggota secara linear memicu konsumsi energi yang masif untuk menggerakkan sektor industri, manufaktur, dan mobilitas urban. Merujuk pada laporan World Bank (2024a), intensitas karbon di mayoritas negara G20 belum menunjukkan penurunan yang cukup signifikan, dimana pertumbuhan output ekonomi masih sangat bergantung pada input energi berbasis fosil yang murah namun polutif.

Fenomena ini merefleksikan hambatan struktural transisi energi, di mana prioritas pemulihan ekonomi jangka pendek kerap mengesampingkan resiliensi ekologis. Hal ini terekam jelas pada Gambar 1.2, di mana penurunan volume emisi pada tahun 2020 hanyalah sebuah anomali akibat kontraksi selama pandemi global, bukan hasil dari restrukturisasi energi hijau yang fundamental. Terbukti, begitu GDP per kapita pulih pada tahun 2021, volume emisi turut mengalami *rebound* yang signifikan.



Gambar 1.2 Korelasi Pertumbuhan GDPK (USD) dan Emisi CO2 (Metric Tons) Negara G20

Sumber: World Bank (2024) dan Our World In Data (2024), data diolah.

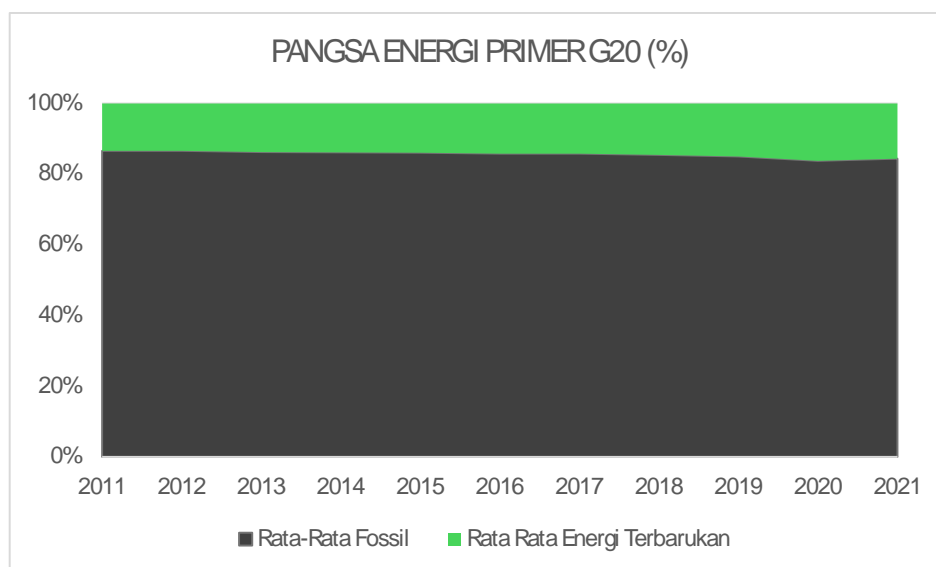
Gambar 1.2 menunjukkan adanya tren pergerakan searah (korelasi positif) antara pertumbuhan GDP per kapita dengan volume emisi CO₂ di negara-negara G20. Fenomena ini membuktikan bahwa aktivitas ekonomi di blok tersebut masih sangat bergantung pada intensitas karbon yang tinggi. Meskipun terdapat fluktuasi pada tahun-tahun tertentu, namun secara keseluruhan, pertumbuhan output ekonomi belum mampu diikuti oleh penurunan emisi yang sebanding (fase *decoupling* belum tercapai).

Di balik dominasi ekonomi berbasis karbon tersebut, blok G20 sejatinya tengah mengupayakan dekarbonisasi melalui eskalasi konsumsi energi baru terbarukan (EBT). Merujuk pada data faktual *International Renewable Energy Agency* (2024), ekspansi kapasitas energi bersih di negara-negara anggota G20 telah mencakup hampir 80% dari penambahan pembangkit listrik global. Namun, masifnya angka instalasi infrastruktur hijau belum berbanding lurus dengan reduksi emisi secara agregat, sehingga menciptakan sebuah paradoks transisi di tingkat kebijakan dan realitas lapangan.

Ketidakselarasan ini mengindikasikan munculnya fenomena *energy addition*, di mana pasokan energi hijau sering kali berperan sebagai suplemen untuk

menambal lonjakan permintaan energi baru akibat pertumbuhan ekonomi, bukan sebagai substitui total (*decapitation*) yang mampu mengeliminasi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Efektivitas penetrasi energi hijau di blok G20 sejatinya tengah berhadapan dengan anomali persistensi energi fosil yang sangat resilien. Berdasarkan laporan Energy Institute (2024), meskipun kapasitas terbarukan tumbuh masif, porsi hidrokarbon (batu bara, minyak bumi, dan gas alam) secara kolektif masih mengunci angka dominan sekitar 75% hingga 80% dari total bauran energi primer G20.

Hal ini terjadi karena energi fosil tidak lagi dipandang sekadar sebagai komoditas primer, melainkan telah bertransformasi menjadi jangkar stabilitas *baseload* dan cadangan strategis guna menghindari resiko krisis listrik sistemik akibat sifat EBT yang intermiten. Kondisi ini memicu terjadinya ‘penguncian karbon’ (*carbon lock-in*), di mana infrastruktur energi kotor tetap dioperasikan dalam jangka panjang karena pertimbangan biaya *sunk cost* yang tinggi. Stagnasi transisi struktural ini, yang menunjukkan betapa lambatnya pergeseran ketergantungan energi dari fosil ke energi baru terbarukan (EBT), yang terekam secara jelas dalam proporsi konsumsi energi primer anggota negara G20 pada Gambar 1.3 berikut:

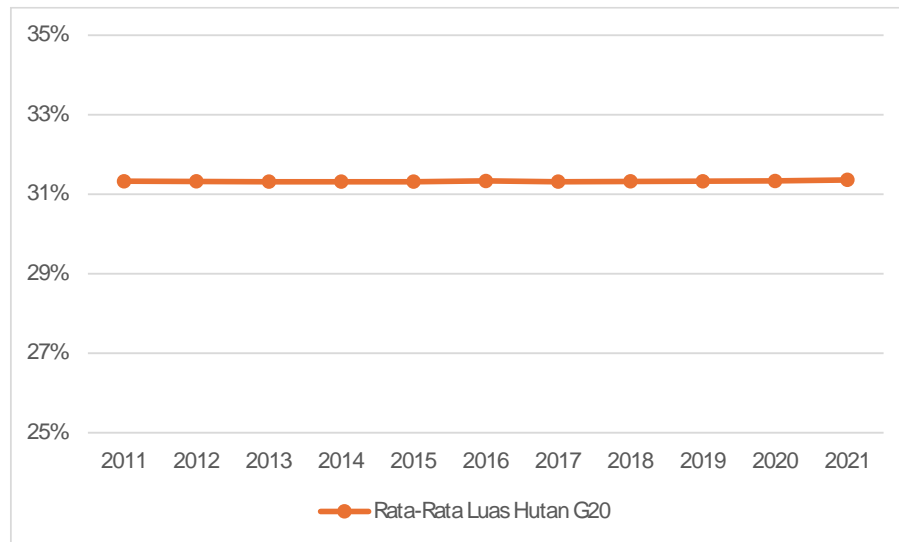


Gambar 1.3 Pangsa Konsumsi Energi Primer G20 2011-2021 (%)

Sumber: (World Bank 2024b),(2024d), data diolah.

Visualisasi pada Gambar 1.3 mempertegas adanya kesenjangan (*gap*) struktural yang lebar antara konsumsi energi fosil dan energi terbarukan. Meskipun terdapat tren kenaikan pada sektor hijau (area hijau), dominasi batu bara, minyak bumi, dan gas alam (area abu-abu) tetap menjadi penyokong utama (lebih dari 80%) dari total bauran energi primer. Kondisi ini membuktikan fenomena *energy addition*, di mana penetrasi energi terbarukan hanya berfungsi sebagai suplemen untuk menutupi lonjakan permintaan energi baru, namun belum mampu melakukan dekapitasi atau substitusi langsung terhadap sumber energi intensif karbon yang sudah ada (*carbon lock-in*).

Narasi keberlanjutan di negara-negara G20 seringkali terbentur pada kenyataan pahit mengenai menyusutnya kawasan hutan sebagai benteng pertahanan iklim alami. Alih-alih berfungsi optimal sebagai *natural carbon sink* yang menteralisir polusi, luas tutupan hijau ini justru terus tergerus oleh ambisi pembangunan fisik dan komodifikasi lahan. Dilema ini semakin meruncing ketika kebutuhan akan ruang untuk sektor agrikultur dan ekstraksi sumber daya alam sering kali dimenangkan atas kepentingan konservasi hutan primer. Berdasarkan laporan *Food and Agriculture Organization* (2024), terdapat tren deselarasi luas hutan yang mengkhawatirkan di berbagai belahan dunia, di mana kapasitas sekuestrasi (penyerapan) karbon alam kini kalah cepat dibandingkan laju emisi yang diproduksi oleh sektor industri. Hilangnya biomassa ini menciptakan ‘rusg hampa’ dalam siklus karbon emisi CO₂ tidak lagi memiliki media penyerap yang memadai, sehingga langsung terakumulasi di atmosfer secara permanen. Tanpa adanya kebijakan perlindungan kawasan hijau yang ketat di negara-negara G20, ketimpangan antara produksi emisi dan kapasitas serapan alami ini akan menjadi penghalang utama dalam mencapai target net-zero global. Ketimpangan struktural antara kerusakan hutan dan beban emisi ini menjadi anomali besar dalam agenda dekarbonisasi G20, sebuah fakta yang terpotret jelas melalui degradasi area pada Gambar 1.4



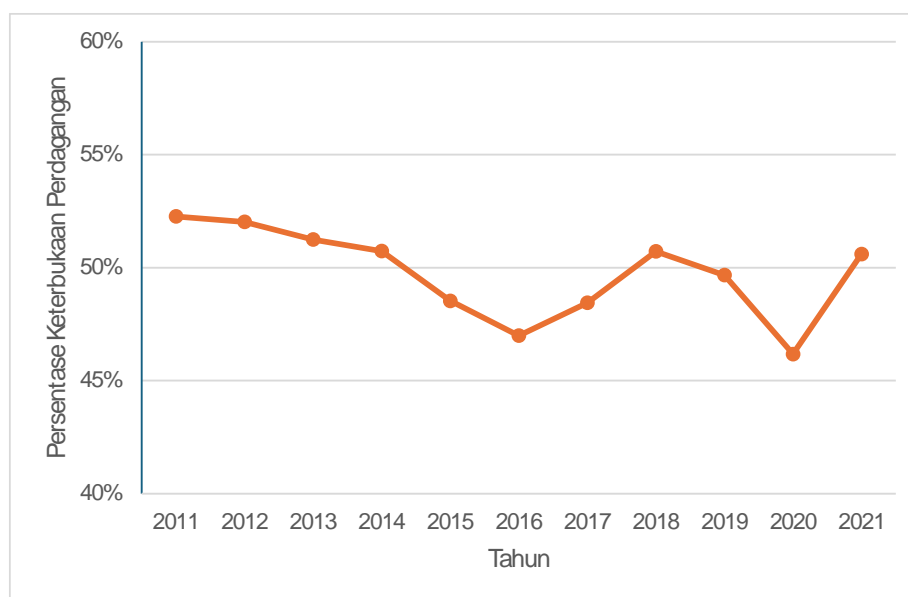
Gambar 1.4 Proporsi Luas Kawasan Hutan Negara G20 (%)

Sumber: World Bank (2024), data diolah.

Visualisasi Gambar 1.4 menjelaskan kondisi rata-rata luas kawasan hutan terhadap total luas daratam di negara anggota G20 yang cenderung stagnan di kisaran 31% selama 10 tahun dari 2011 hingga 2021. Meskipun secara data, luas kawasan hutan menunjukkan stagnansi dan tidak terlihat penurunan drastis secara visual. Namun, hal ini tetap menunjukkan sinyal bahaya mengingat beban emisi terus meningkat. Dengan demikian, visual ini memberikan peringatan bahwa terdapat ketidakseimbangan antara kapasitas serapan alami (*carbon sink*) dengan pola aktivitas industri, sehingga memperlebar celah dalam pencapaian target dekarbonisasi global.

Keterlibatan negara-negara G20 dalam jejaring pasar global melalui keterbukaan perdagangan turut membawa konsekuensi serius terhadap profil emisi karbon wilayah. Bukannya menjadi saluran transfer teknologi bersih semata, integrasi ekonomi ini justru sering kali memperluas jejak lingkungan melalui aktivitas logistik internasional dan ekspansi industri manufaktur yang masif. Laporan *United Nations Conference on Trade and Development (2024)* menyoroti bahwa lonjakan volume ekspor-impor di blok G20 masih berjalan beriringan dengan

ketergantungan pada energi fosil, yang mengindikasikan bahwa pertumbuhan perdagangan belum sepenuhnya terlepas (*decoupling*) dari emisi karbon. Realitas ini memperkuat indikasi adanya fenomena *pollution haven*, di mana negara dengan standar lingkungan yang lebih longgar berisiko menjadi tujuan relokasi industri polutif dari negara-negara maju. Alhasil, tanpa adanya sinkronisasi regulasi hijau internasional, arus perdagangan bebas hanya akan menjadi sarana perpindahan beban polusi lintas batas yang mengaburkan target dekarbonisasi global. Dinamika ketergantungan perdagangan terhadap struktur ekonomi G20 ini dapat dicermati pada Gambar 15 berikut.



Gambar 1.5 Ketergantungan Perdagangan Internasional G20 (%)

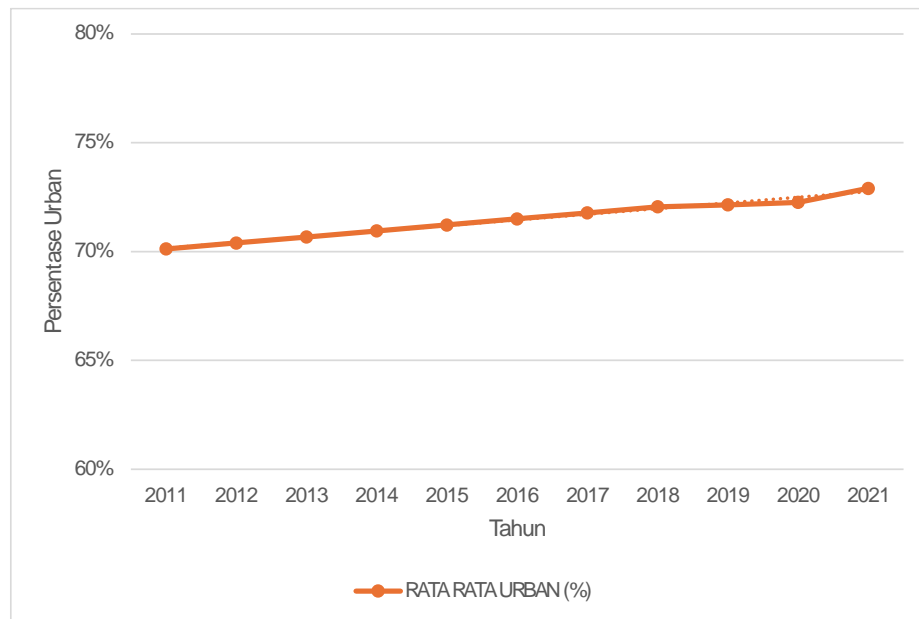
Sumber: World Bank (2024), data diolah.

Visualisasi pada Gambar 1.5 merepresentasikan derajat integrasi ekonomi negara-negara G20 yang mengalami dinamika fluktuatif dalam satu dekade terakhir. Penurunan tajam yang terlihat pada periode 2015-2016 serta kontraksi dalam pada tahun 2020 mengonfirmasi sensitivitas perdagangan internasional terhadap guncangan politik dan hambatan logistik global akibat pandemi covid-19. Namun, pemulihan (*rebound*) yang signifikan pada tahun 2021 mempertegas

bahwa ketergantungan ekonomi negara anggota G20 terhadap pasar global tetap tinggi.

Tingginya intensitas transaksi lintas batas ini mengonfirmasi bahwa emisi yang dihasilkan oleh negara anggota tidak hanya didorong oleh konsumsi domestik, melainkan juga dipicu oleh permintaan ekspor global yang membawa beban emisi tersirat (*embodied carbon*). Fluktuasi pada grafik ini mempertegas bahwa selama struktur perdagangan belum terdekopel (*decoupled*) dari energi fosil, maka setiap pemulihan ekonomi akan selalu diikuti oleh peningkatan beban polusi lintas batas yang mengaburkan target dekarbonisasi.

Sebagai faktor pamungkas yang menyatukan seluruh tekanan ekonomi tersebut, laju urbanisasi di negara-negara G20 bertindak sebagai akselerator utama pemusatan emisi karbon. Perpindahan penduduk ke wilayah perkotaan bukan sekadar perubahan koordinat domisili, melainkan pemicu transformasi gaya hidup yang secara drastis meningkatkan ketergantungan pada infrastruktur padat energi dan mobilitas berbasis fosil. Merujuk pada proyeksi dari *United Nations Human Settlements Programme* (2024), pemadatan populasi di kota-kota besar G20 menjadi pendorong utama emisi karbon karena aktivitas perkotaan kini mendominasi penggunaan energi global secara signifikan. Kepadatan penduduk ini menciptakan tantangan struktural yang kompleks, di mana pembangunan kota yang tidak terencana dengan prinsip keberlanjutan justru akan ‘mengunci’ negara-negara G20 dalam siklus emisi tinggi yang sulit untuk didekonstruksi. Dengan demikian, urbanisasi bukan sekadar masalah kependudukan, melainkan variabel penentu yang menentukan mampu atau tidaknya suatu negara memutus rantai degradasi lingkungan. Evolusi spasial dan konsentrasi populasi urban ini dipaparkan lebih lanjut pada gambar 1.6



Gambar 1.6 Tingkat Urbanisasi di Negara G20 (%)

Sumber: World Bank (2024), data diolah.

Berdasarkan tren Gambar 1.6 di atas, secara rata-rata tingkat urbanisasi di negara-negara anggota G20 mengalami tren kenaikan yang konsisten dari kisaran 70% pada tahun 2011 menjadi hampir 73% pada tahun 2021. Garis tren linear (titik-titik) menunjukkan bahwa fenomena ini berlangsung tanpa deselerasi, yang mengonfirmasi adanya ekspansi spasial yang berkelanjutan pada peningkatan beban emisi di wilayah perkotaan.

Urgensi penelitian ini diletakkan pada negara-negara G20 sebagai lokus pengamatan, mengingat bahwa blok G20 ini merupakan titik gravitasi ekonomi sekaligus emisi global. Berdasarkan laporan *Climate Transparency* (2024), G20 bukan sekadar entitas ekonomi dengan penguasaan 80% GDP dunia, melainkan penentu arah metabolisme energi global yang bertanggung jawab atas sekitar 75-80% emisi gas rumah kaca dunia. Relevansi pemilihan lokus pengamatan ini menjadi tak terbantahkan ketika melihat fakta yang dipertegas oleh data *Organisation for Economic Co-operation and Development* (2024) yang menunjukkan bahwa dinamika pertumbuhan di blok ini memiliki pengaruh sistemik terhadap stabilitas ekosistem global. Oleh karena itu, G20 mewakili ‘wajah’ tantangan dekarbonisasi global yang

sebenarnya di mana pertumbuhan ekonomi yang masif harus berbenturan dengan batas-batas daya dukung lingkungan. Menganalisis dinamika emisi di dalam blok ini bukan lagi sekadar pilihan akademis, melainkan keharusan strategis, karena kegagalan koordinasi kebijakan di tingkat G20 akan secara otomatis meruntuhkan peluang dunia dalam memenuhi komitmen *Paris Agreement*. Singkatnya, G20 adalah episentrum di mana solusi iklim global akan ditentukan atau justru digagalkan.

Diskursus mengenai faktor determinan emisi karbon telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya, namun masih menunjukkan hasil yang beragam dan belum mencapai konsensus mutlak (*inconclusive*). Iqbal Al Qodri et al. (2024), dalam studinya di negara G20 menemukan bahwa kompleksitas ekonomi memiliki peran krusial dalam mereduksi emisi karbon jangka panjang, yang memvalidasi berlakunya hipotesis *Environmental Kuznets Curve (EKC)*, di mana kompleksitas ekonomi dan kemajuan teknologi pada akhirnya akan menurunkan emisi dalam jangka panjang. Pandangan optimis ini diperkuat oleh Kongkuah & Alessa (2025) yang menegaskan bahwa integrasi teknologi energi terbarukan di 184 negara merupakan kunci utama dekarbonisasi

Namun, narasi optimis tersebut menghadapi tantangan empiris ketika diperhadapkan pada dinamika urbanisasi dan konsumsi energi fosil yang masih dominan. Dwi et. al. (2023) mengungkapkan bahwa di negara-negara G20, pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi justru seringkali menjadi pendorong utama peningkatan emisi, di mana efisiensi teknologi belum mampu mengimbangi laju aktivitas antropogenik. Ketidakkonsistenan hasil ini kian diperumit oleh peran variabel biofisik seperti luas hutan. Jika Adrian (2024) dalam studinya menemukan bahwa deforestasi tidak selalu memiliki pengaruh signifikan terhadap emisi di beberapa kawasan ASEAN, studi dari Fauzi. R (2017) justru memberikan pembuktian sebaliknya, dimana penurunan luas kawasan hutan secara nyata memperburuk degradasi kualitas udara.

Adanya inkonsistensi temuan (*empirical gap*) serta keterbatasan literatur yang mengintegrasikan aspek transisi energi (konsumsi energi baru terbarukan dan energi fosil) dengan variabel ekonomi (GDP & Keterbukaan Perdagangan), sosial

(Urbanisasi), dan biofisik (Luas Hutan) secara simultan, terutama dalam lingkup G20 dengan data terbaru 2011 hingga 2021, memberikan ruang bagi penelitian ini untuk mengisi celah tersebut. Kebaruan penelitian ini terletak pada upaya mengintegrasikan transisi energi dengan indikator kapasitas sekuestrasi karbon alami (hutan) serta aktivitas ekonomi makro dalam satu model analisis yang komprehensif. Berangkat dari celah penelitian tersebut, maka penelitian ini bermaksud untuk mengkaji fenomena tersebut lebih mendalam yang dituangkan dalam judul: “Peran Konsumsi Energi Terbarukan Dalam Menekan Emisi CO₂ di Tengah Pertumbuhan Ekonomi: Studi Kasus Negara Anggota G20 ”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka masalah yang dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh GDP per kapita terhadap emisi CO₂ di negara-negara G20?
2. Bagaimana pengaruh konsumsi energi terbarukan terhadap emisi CO₂ di negara G20?
3. Bagaimana pengaruh konsumsi energi fosil terhadap emisi CO₂ di negara G20?
4. Bagaimana pengaruh urbanisasi terhadap emisi CO₂ di negara G20?
5. Bagaimana pengaruh keterbukaan perdagangan terhadap emisi CO₂ di negara G20?
6. Bagaimana pengaruh luas kawasan hutan terhadap emisi CO₂ di negara G20?
7. Bagaimana pengaruh GDP per kapita, konsumsi energi terbarukan, konsumsi energi fosil, urbanisasi, keterbukaan perdagangan, dan luas kawasan hutan secara simultan terhadap emisi CO₂ di negara G20?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh GDP per kapita terhadap emisi CO₂ di negara G20.

2. Menganalisis pengaruh konsumsi energi terbarukan terhadap emisi CO₂ di negara G20.
3. Menganalisis pengaruh konsumsi energi fosil terhadap emisi CO₂ di negara G20.
4. Menganalisis pengaruh urbanisasi terhadap emisi CO₂ di negara G20.
5. Menganalisis pengaruh keterbukaan perdagangan terhadap emisi CO₂ di negara G20.
6. Menganalisis pengaruh luas kawasan hutan terhadap emisi CO₂ di negara G20.

1.3.2 Manfaat Penelitian

1. Memberikan kontribusi bagi pengembangan literatur ekonomi lingkungan, khususnya dalam memperkaya kajian mengenai integrasi variabel transisi energi dan kapasitas sekuestrasi karbon alami terhadap emisi gas rumah kaca.
2. Menjadi referensi akademik bagi peneliti selanjutnya dalam menguji konsistensi hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan melalui model analisis yang menggabungkan faktor ekonomi, sosial, dan biofisik.
3. Menjadi bahan pertimbangan bagi pemangku kebijakan di negara-negara G20 dalam merumuskan strategi dekarbonisasi yang menyinkronkan pertumbuhan ekonomi dengan percepatan konsumsi energi terbarukan.
4. Memberikan landasan strategis mengenai urgensi pelestarian luas wilayah hutan dan pengaturan tata ruang urbanisasi sebagai instrumen mitigasi perubahan iklim yang berkelanjutan.
5. Menyediakan informasi empiris bagi publik dan organisasi internasional mengenai dampak keterbukaan perdagangan terhadap kualitas lingkungan global dalam rangka mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian mengenai determinan emisi karbondioksida (CO₂) telah menjadi fokus utama dalam literatur ekonomi lingkungan selama beberapa dekade terakhir. Untuk memberikan landasan yang kokoh bagi penelitian ini, berikut disajikan sintesis dari sepuluh penelitian terdahulu yang memiliki relevansi tinggi baik dari segi variabel, metode, maupun cakupan wilayah. Penelitian mengenai determinan emisi karbondioksida (CO₂) telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan metodologi dan cakupan wilayah. Berikut adalah sintesis dari penelitian-penelitian relevan yang menjadi rujukan studi ini;

Kongkuah & Alessa (2022) dalam penelitiannya yang berjudul “*Renewable Energy and Carbon Intensity: Global Evidence from 184 Countries (2000-2020)*” memberikan bukti global paling mutakhir mengenai dekarbonisasi. Dengan menggunakan data panel dari 184 negara dan estimator tingkat lanjut, studi ini memfokuskan pada variabel adopsi teknologi energi terbarukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi teknologi hijau secara konsisten mampu menurunkan intensitas karbon global, namun efektivitasnya sangat bergantung pada ketatnya regulasi lingkungan di masing-masing negara. Hal ini memberikan arah bagi penelitian ini mengenai pentingnya dukungan kebijakan dalam implementasi teknologi di negara G20.

Iqbal Al Qodri et. al. (2024) melakukan studi mengenai pengaruh kompleksitas ekonomi terhadap emisi CO₂ di negara G20 untuk periode 1995-2020. Dengan menggunakan pendekatan *Environmental Kuznets Curve (EKC)* dan metode *Fully Modified OLS (FMOLS)*, penelitian ini menempatkan variasi teknologi produksi sebagai indikator kompleksitas ekonomi. Temuan mereka mengonfirmasi berlakunya teori EKC, di mana kompleksitas ekonomi terbukti dapat menurunkan emisi karbondioksida setelah melewati titik balik (*turning point*) tertentu. Penelitian ini menjadi rujukan utama bagi penulis dalam memahami pola hubungan ekonomi dan lingkungan di lokus G20.

Dwi et. al. (2023) menganalisis determinan emisi CO₂ di negara G20 periode 1990-2022 dengan fokus pada variabel pertumbuhan ekonomi, urbanisasi, dan konsumsi energi. Melalui kerangka teori STIRPAT dan metode *Fixed Effect Model (FEM)*, hasil menunjukkan bahwa urbanisasi dan konsumsi energi fosil memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap peningkatan emisi. Studi ini memberikan justifikasi kuat bagi penulis untuk memasukan variabel urbanisasi sebagai faktor antropogenik yang krusial dalam metode penelitian ini.

Tsandra, Sunaryo, Syafri, dan Oktaviani (2023) mengkaji pengaruh konsumsi energi dan aktivitas ekonomi terhadap emisi CO₂ dengan membandingkan kelompok *Advanced Economies* dan *Emerging Market* di G20 periode 2000-2021. Menggunakan metode *Fixed Effect Model (FEM)*, penelitian ini menemukan bahwa di negara berkembang, konsumsi energi fosil dan GDP per kapita tetap menjadi pendorong utama polusi. Sebaliknya di negara maju, keterbukaan perdagangan justru berkontribusi pada efisiensi karbon melalui transfer teknologi, yang memberikan perspektif penting mengenai perbedaan karakteristik ekonomi di G20.

Sumiyati (2025) meneliti dampak keterbukaan perdagangan dan investasi asing (FDI) terhadap emisi CO₂ di kawasan ASEAN-China FTA periode 1990-2023. Dengan menggunakan pendekatan regresi data panel, penelitian ini menemukan bahwa liberisasi perdagangan cenderung meningkatkan emisi, yang memperkuat bukti bagi *Pollution Haven Hypothesis*. Temuan ini menjadi peringatan

bagi penelitian ini bahwa keterbukaan ekonomi di negara G20 harus dibarengi dengan standar emisi yang ketat agar tidak memperburuk degradasi lingkungan.

Cahyo et. al. (2023) melakukan kajian mengenai dampak faktor lingkungan, populasi, dan ekonomi terhadap emisi CO₂ dengan fokus pada wilayah Indonesia. Menggunakan variabel luas kawasan hutan, urbanisasi dan industrialisasi melalui regresi linier berganda, ditemukan bahwa peningkatan luas kawasan hutan secara signifikan mampu menekan angka emisi. Sebaliknya, populasi perkotaan dan sektor industri menjadi faktor pendorong utama emisi, yang menegaskan perlunya keseimbangan antara pembangunan dan pelestarian hutan sebagai mitigasi alami.

Rahman, Alam, Velayutham (2022) menganalisis 22 negara maju periode 1990-2018 dengan fokus pada peran energi terbarukan, inovasi teknologi, dan kualitas ekspor. Dengan menerapkan pendekatan Panel Non-Linier ARDL (NARDL), studi ini menemukan bahwa perbaikan kualitas produk ekspor dan kemajuan teknologi berperan sebagai katalisator penting dalam pengurangan emisi. Hasil ini membuktikan bahwa inovasi dapat memisahkan pertumbuhan ekonomi dari peningkatan polusi, sebuah argumen yang sangat relevan bagi transformasi ekonomi antar negara G20.

Adrian (2024) melakukan analisis mengenai pengaruh aktivitas ekonomi terhadap emisi karbon di empat negara ASEAN (Indonesia, Malaysia, Thailand, dan Vietnam) periode 2001-2021. Menggunakan Fixed Effect Model (FEM), hasil penelitian mengungkapkan bahwa pertumbuhan GDP dan konsumsi energi memiliki pengaruh positif yang dominan terhadap lonjakan emisi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa aktor utama degradasi lingkungan di kawasan tersebut lebih disebabkan oleh pola konsumsi energi dibandingkan faktor deforestasi, yang menciptakan tantangan bagi variabel hutan dalam model empiri.

Fauzi R. (2017) memberikan kontribusi penting mengenai peran mitigasi alamiah melalui variabel luas kawasan hutan di enam negara ASEAN. Dengan menggunakan analisis regresi data panel, hasil penelitian membuktikan secara konsisten bahwa luas kawasan hutan berpengaruh negatif terhadap emisi CO₂. Hal ini menegaskan fungsi strategis hutan sebagai *carbon sink* atau penyerap karbon

alami yang efektif untuk menyeimbangkan emisi. Penelitian Fauzi menjadi dasar bagi penulis dalam merumuskan variabel luas hutan sebagai solusi biologis dalam menekan emisi.

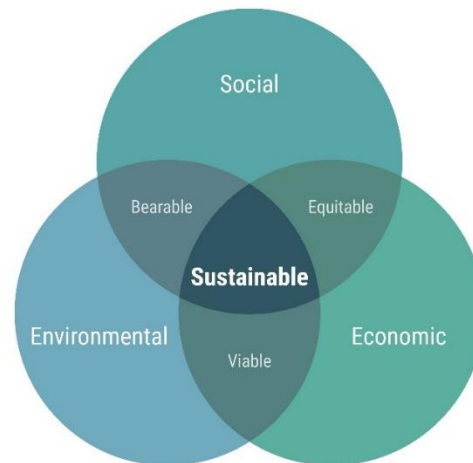
Berdasarkan tinjauan terhadap sepuluh literatur di atas dapat disimpulkan bahwa determinan emisi karbon dioksida (CO₂) bersifat multidimensi, yang mencakup aspek ekonomi, sosial, dan ekologi. Terdapat konsensus bahwa aktivitas antropogenik seperti urbanisasi dan pertumbuhan ekonomi cenderung meningkatkan tekanan terhadap lingkungan Dwi et al. (2023), Cahyo et. al (2023). Namun, efektivitas mitigasi melalui jalur teknologi seperti transisi energi terbarukan dan jalur alami pelestarian hutan masih menunjukkan hasil yang tidak konsisten dan sangat bergantung pada lokus serta metode penelitian yang digunakan Kongkuah & Alessa (2025), Fauzi R. (2017), Adrian (2024). Celah penelitian (*research gap*) yang ditemukan adalah masih terbatasnya studi yang mengintegrasikan dimensi energi, ekonomi dan biofisik secara simultan di negara-negara G20 untuk memverifikasi hipotesis Enviromental Kuznets Curve (EKC). Sebagian besar peneliti terdahulu mengamati variabel tersebut secara parsial atau berfokus pada salah satu instrumen saja. Oleh karena itu, orisinalitas penelitian ini terletak pada penggabungan variabel ekonomi, sosial, dan dua bentuk instrumen mitigasi (alam dan teknologi) guna memberikan gambaran yang lebih holistik mengenai strategi dekarbonisasi di blok ekonomi terbesar dunia.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Teori Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Depelovment Theory)

Teori Pembangunan Berkelanjutan merupakan fondasi filosofis dalam penelitian ini yang merujuk pada prinsip keseimbangan antara dimensi ekonomi, sosial, dan ekologi. Secara mendalam, teori ini mengadopsi perspektif keadilan antar-generasi (*intergeneration equity*), di mana pemanfaatan sumber daya saat ini tidak boleh mereduksi hak dan kapasitas generasi mendatang *World Comission on Environment and Development* (1987). Dalam konteks makroekonomi, keberlanjutan diukur melalui kemampuan suatu negara melakukan pemisahan

sumber daya (*resource decoupling*), yaitu kondisi di mana pertumbuhan output nasional tidak lagi disertai dengan peningkatan kerusakan lingkungan.



Gambar 2.1 Tiga Pilar Pembangunan Berkelanjutan

Sumber: World Commission on Environment and Development (1987)

Gambar 2.1 menjelaskan bahwa tercapainya keberlanjutan hanya dapat dicapai melalui irisan seimbang antara pilar ekonomi, sosial, dan lingkungan. Titik temu ketiga pilar ini menekankan bahwa pertumbuhan ekonomi di negara G20 harus bersifat layak (*viable*) secara ekologis dan dapat ditoleransi (*bearable*) secara sosial.

Dalam penelitian ini, teori ini melandasi urgensi variabel luas kawasan hutan sebagai bentuk *Critical Natural Capital* (modal alam kritis) yang memiliki fungsi ekologis tidak tergantikan (*non-substitutable*). Penurunan luas hutan dipandang sebagai depresiasi terhadap aset alam yang dapat mengancam stabilitas iklim. Oleh karena itu, pencapaian target pembangunan berkelanjutan di negara-negara G20 dievaluasi melalui sejauh mana kebijakan pelestarian hutan dan transisi ke energi terbarukan mampu memitigasi eksternalitas negatif dari aktivitas ekonomi.

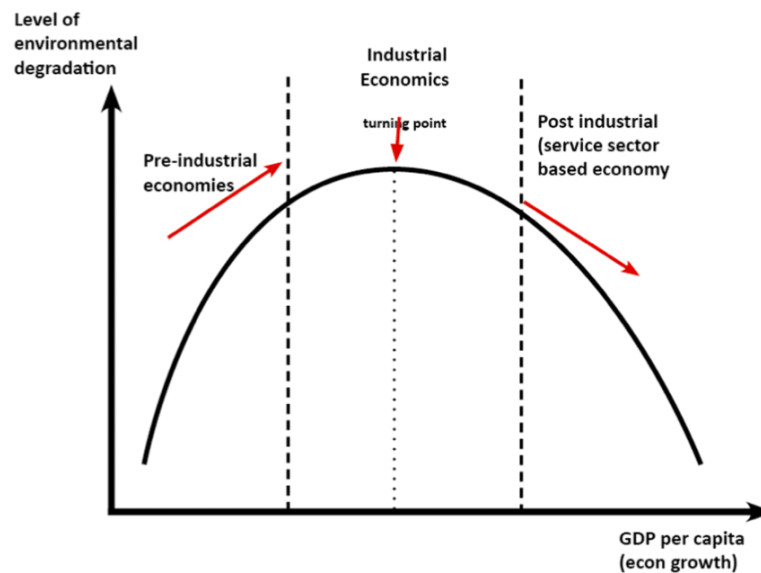
2.2.2 Teori Ekonomi Lingkungan (*Environmental Economics*)

Ekonomi Lingkungan memberikan perspektif berbeda melalui pendekatan efisiensi alokasi sumber daya alam. Konsep inti teori ini berfokus pada internalisasi eksternalitas, yaitu sebuah mekanisme untuk memasukan beban biaya kerusakan lingkungan ke dalam harga pasar agar perilaku ekonomi terkoreksi Pigou, Arthur C. (1920). Landasan ini bekerja dengan asumsi dasar bahwa individu adalah aktor rasional yang akan beralih ke teknologi bersih jika dihadapkan pada disinsentif biaya yang tepat. Masalah yang dibedah secara tajam adalah fenomena kegagalan pasar, di mana atmosfer seringkali diperlakukan sebagai barang publik yang bebas diakses tanpa biaya.

Relevansi teori ini menjadi sangat eksplisit dalam menjelaskan mengapa penggunaan energi fosil harus dikurangi dan digantikan oleh energi terbarukan sebagai langkah korektif terhadap inefisiensi ekonomi di negara G20. Meski demikian, teori ini memiliki keterbatasan dalam memberikan penilaian moneter yang akurat terhadap fungsi alam yang tidak memiliki nilai pasar, sehingga seringkali kebijakan yang dihasilkan dianggap belum sepenuhnya mewakili nilai ekologis yang sebenarnya.

2.2.3 Hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC)

Hipotesis Environmental Kuznets Curve diposisikan sebagai kerangka kerja utama untuk memahami dinamika hubungan antara kemajuan ekonomi dan degradasi lingkungan. Konsep inti dari teori ini adalah adanya hubungan non-linear berbentuk U-terbalik, yang menyatakan pada tahap awal pembangunan, peningkatan pendapatan per kapita akan memperburuk emisi karbon. Namun, setelah mencapai titik balik (*turning point*) tertentu, pertumbuhan ekonomi justru akan mulai menurunkan dampak lingkungan tersebut. Fenomena ini bekerja dengan asumsi dasar bahwa masyarakat pada tingkat pendapatan tinggi memiliki kesadaran ekologis yang lebih kuat serta kapasitas finansial untuk mengadopsi teknologi rendah karbon (Grossman, Gene M. dan Krueger 1991).



Gambar 2.2 Kurva Lingkungan Kuznetz

Sumber: Grossman, G. M., & Kruege (1991)

Secara visual Gambar 2.2 menunjukkan hubungan antara pertumbuhan ekonomi sumbu horizontal dan tingkat emisi sumbu vertikal. Kurva tersebut mengilustrasikan bahwa degradasi lingkungan meningkat pada tahap awal pembangunan hingga mencapai titik balik (*turning point*), di mana setelah titik tersebut tercapai, peningkatan pendapatan akan diikuti oleh penurunan emisi karbon secara bertahap. Terdapat mekanisme transisi: skala, komposisi, dan teknik:

Perubahan arah hubungan dalam EKC tidak terjadi secara otomatis, melainkan digerakkan oleh tiga mekanisme transisi struktural (Grossman & Krueger, 1991):

1. Efek Skala (*Scale Effect*): Terjadi pada fase industrialisasi awal di mana prioritas utama adalah ekspansi *output*. Peningkatan produksi memerlukan konsumsi energi fosil yang masif, sehingga emisi CO₂ meningkat secara paralel dengan PDB.
2. Efek Komposisi (*Composition Effect*): Terjadi saat struktur ekonomi bergeser dari industri manufaktur berat menuju sektor jasa dan berbasis

pengetahuan (*knowledge-based economy*) yang memiliki intensitas karbon lebih rendah.

3. Efek Teknik (*Technique Effect*): Pada tingkat pendapatan yang tinggi, negara memiliki kapasitas finansial untuk berinvestasi pada riset dan teknologi bersih (*clean technology*). Munculnya regulasi lingkungan yang lebih ketat dan efisiensi energi menjadi katalis utama penurunan emisi meskipun aktivitas ekonomi terus tumbuh.

Relevansi EKC dalam penelitian ini tidak hanya bersifat kualitatif, tetapi diuji secara kuantitatif melalui model fungsi kuadratik. Secara matematis, titik balik merupakan koordinat puncak di mana kemiringan (*slope*) kurva berubah dari positif menjadi negatif. Landasan penentuan titik balik ini berakar pada prinsip turunan pertama (*First Order Condition*) dalam kalkulus. Jika model estimasi menggunakan transformasi logaritma natural:

$$\text{LnCO}_{2,it} = \beta_0 + \beta_1 \text{LnGDPK}_{it} + \beta_2 (\text{LnGDPK})^2_{it} + \varepsilon_{it}$$

Maka, titik balik secara spesifik diperoleh melalui rumus:

$$\text{Turning Point} = \exp \left(- \frac{\beta_1}{2\beta_2} \right)$$

Keterangan:

Turning Point: Nilai ambang batas (*threshold*) GDP per Kapita di mana tingkat emisi karbon mencapai titik maksimum sebelum akhirnya mulai mengalami penurunan.

exp: Fungsi eksponensial (antilogaritma), digunakan untuk mengonversi kembali nilai dari bentuk Logaritma Natural (Ln) ke dalam satuan nilai mata uang asli (misalnya USD).

β_1 : Koefisien estimasi dari variabel pendapatan per kapita (Ln_GDPK). Nilai ini merepresentasikan kemiringan (*slope*) pada fase awal pertumbuhan ekonomi (efek skala).

β_2 : Koefisien estimasi dari variabel pendapatan per kapita kuadrat (Ln_GDPK²). Koefisien ini menentukan bentuk kelengkungan kurva, nilai

negatif ($\beta_2 < 0$) menunjukkan adanya titik balik yang cembung ke atas (U-terbalik).

Syarat mutlak terbentuknya pola EKC adalah koefisien linear yang positif ($\beta_1 > 0$) dan koefisien kuadrat yang negatif signifikan ($\beta_2 < 0$). Tanpa terpenuhinya syarat β_2 negatif, maka secara ilmiah dapat disimpulkan bahwa hubungan yang terbentuk masih berada pada fase kenaikan (*scale effect*) dan belum menunjukkan tanda-tanda pelandaian kurva menuju perbaikan kualitas lingkungan.

Logika EKC berusaha menjawab ‘paradoks pembangunan’: apakah pertumbuhan ekonomi merupakan penyebab utama kerusakan lingkungan atau justru kunci dari solusinya. Dalam konteks G20, EKC menjadi alat uji krusial untuk mengidentifikasi apakah blok ekonomi ini telah mencapai ambang batas (*threshold*) di mana kenaikan PDB mengalami *decoupling* (terlepas) dari emisi CO₂. Meskipun demikian, penelitian ini tetap mempertimbangkan kritik dari pakar ekonomi ekologis mengenai kemungkinan adanya relokasi industri polutif (*Pollution Haven Hypothesis*), di mana penurunan emisi di negara maju mungkin hanya mencerminkan perpindahan polusi ke negara berkembang, yang menantang klaim validitas EKC secara universal.

2.2.4 Model STIRPAT (Stochastic Regression on Population, Affluence, and Technology)

Model STIRPAT merupakan kerangka analisis yang dikembangkan oleh Dietz, Thomas, dan Rosa (1997) sebagai bentuk penyempurnaan dari formulasi IPAT (I=PAT). Berbeda dengan IPAT yang bersifat identitas akuntansi yang kaku, STIRPAT bersifat stokastik. Hal ini memungkinkan peneliti untuk melakukan pengujian hipotesis secara empiris, mengukur pengaruh masing-masing variabel secara terpisah, serta menambahkan variabel kontrol lainnya yang relevan dengan dinamika lingkungan.

Secara konseptual, STIRPAT membedah dampak lingkungan (I) berdasarkan tiga pilar utama yang saling berinteraksi:

1. Population (P): Menitikberatkan pada beban lingkungan yang diakibatkan oleh dinamika kependudukan. Dalam penelitian ini, variabel urbanisasi digunakan sebagai proksi dari populasi. Urbanisasi di negara-negara G20 mencerminkan pergeseran pola konsumsi energi yang lebih intensif di wilayah perkotaan, yang secara teoritis berkontribusi pada peningkatan emisi CO₂.
2. Affluence (A): Mencerminkan tingkat kesejahteraan atau output ekonomi suatu negara. Variabel GDP per kapita digunakan untuk melihat pengaruh kemakmuran terhadap kualitas lingkungan. Pilar ini juga menjadi jembatan untuk menguji hipotesis EKC dalam model penelitian.
3. Technology (T): Merupakan variabel yang mencakup efisiensi, inovasi, dan upaya mitigasi lingkungan. Dalam penelitian ini, variabel Energi Terbarukan dan Luas Hutan diposisikan sebagai proksi teknologi hijau. Energi terbarukan mencerminkan modernisasi sistem energi, sementara luas hutan mencerminkan kapasitas penyerapan karbon (*carbon sink*).

Kekuatan utama STIRPAT dalam menganalisis blok G20 terletak pada kemampuannya untuk mengukur elastisitas. Dengan mengubah model ke dalam bentuk logaritma natural (ln), penelitian ini dapat secara presisi melihat sejauh mana persentase perubahan pada urbanisasi atau teknologi akan berdampak pada persentase perubahan emisi CO₂. Model ini juga mampu mengakomodasi kompleksitas di negara G20, di mana dampak dari populasi dan teknologi seringkali tidak bersifat seragam antar negara maju dan berkembang.

2.2.5 Teori Transisi Energi (Energy Transition Theory)

Studi ini menempatkan variabel energi terbarukan dalam kerangka *Energy Transition Theory* yang secara fundamental berakar pada pemikiran Smil (2010). Smil mendefinisikan transisi energi sebagai transformasi struktural jangka panjang dalam komposisi bauran energi primer suatu peradaban. Perspektif ini memandang transisi bukan sekadar pergantian teknis, melainkan evolusi sistemik di mana ketergantungan pada sumber daya tradisional (fosil) secara

gradual digantikan oleh sumber energi baru yang memiliki densitas energi berbeda dan profil emisi yang lebih rendah. Smil menekankan karakteristik inheren transisi yang bersifat dekadal, mengingat besarnya skala inersia infrastruktur energi yang menuntut perubahan menyeluruh pada rantai pasok distribusi.

Dalam konteks dekarbonisasi, mekanisme reduksi emisi melalui transisi energi terbarukan bekerja melalui penurunan intensitas karbon per unit energi (*carbon intensity of energy*). Penetrasi teknologi energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidro bertindak sebagai substitusi langsung terhadap bahan bakar fosil yang mempunyai jejak karbon tinggi. Melalui lensa ini, peningkatan porsi energi bersih dalam matriks energi nasional memungkinkan terjadinya pemutusan hubungan (*decoupling*) antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan. Inovasi teknologi dalam sistem energi terbarukan menciptakan efisiensi termodinamika yang lebih baik, sehingga *output* ekonomi dapat dipertahankan tanpa harus meningkatkan beban polusi antropogenik ke atmosfer.

Implementasi pemikiran Smil di negara-negara G20 sebagai episentrum konsumsi dosil dunia menegaskan bahwa percepatan transisi energi merupakan instrumen sistemik untuk mematahkan inersia infrastruktur karbon tinggi yang telah bertahan lama. Oleh karena itu, penggunaan energi terbarukan dalam studi ini dikonseptualisasikan sebagai kekuatan reduktif utama yang diproyeksikan memiliki korelasi negatif yang persisten terhadap emisi CO₂.

2.2.6 Teori Modernisasi Ekologi (Ecological Modernization Theory)

Studi ini menggunakan kerangka *Ecological Modernization Theory (EMT)* sebagai landasan untuk menganalisis hubungan antara urbanisasi dan emisi karbondioksida. Teori ini diprakarsai oleh Mol, Arthur P.J dan Spaargaren (2000) yang hadir sebagai antitesis terhadap pesimistis yang menganggap industrialisasi dan urbanisasi sebagai sumber kerusakan alam. Sebaliknya, EMT berargumen bahwa pada fase kematangan tertentu, modernisasi ekonomi dan ekologi dapat berjalan beriringan (*decoupling*). Alih alih menyarankan de-

urbanisasi, EMT menekankan bahwa perbaikan lingkungan hidup justru dapat dicapai dengan cara perubahan institusional dan teknologi di dalam masyarakat modern itu sendiri Mol (2002).

Dalam konteks spasial dan demografi, teori ini menyoroti peran vital efisiensi yang timbul dari pemusatan aktivitas penduduk. Fenomena ini sering dinamakan sebagai keuntungan dari aglomerasi. Bukti empiris mengenai hal ini dipaparkan secara komprehensif oleh Newman, Peter G, dan Kenworthy (1989) yang menemukan pola hubungan terbalik antara densitas perkotaan dengan konsumsi energi per kapita, khususnya di sektor transportasi. Mekanisme reduksi emisi bekerja melalui penerapan konsep *compact city* yang memungkinkan integrasi layanan publik seperti transportasi massal dan jaringan listrik pintar menjadi lebih layak secara ekonomis (*feasible*) dibandingkan pada wilayah yang mengalami *urban sprawl*. Selain itu, kota modern cenderung mengalami pergeseran struktural ke arah sektor jasa dan ekonomi digital yang memiliki intensitas energi lebih rendah, serta berfungsi sebagai inkubator bagi difusi teknologi bangunan hijau.

Relevansi EMT dalam analisis negara-negara G20 sangat krusial, mengingat anggota G20 memiliki kapasitas fiskal dan teknologi untuk mengarahkan urbanisasi menuju model kota berkelanjutan (*sustainable city*). Meskipun urbanisasi sering diasosiasikan dengan peningkatan konsumsi energi, EMT menawarkan perspektif bahwa urbanisasi yang matang dapat bertindak sebagai instrumen mitigasi. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya menguji apakah efisiensi aglomerasi di negara G20 telah mampu mengonversi urbanisasi menjadi faktor penurunan emisi, sebagaimana diprediksi oleh kerangka EMT.

2.2.7 Teori Carbon Sink dan Sekuestrasi Karbon

Dalam sudut pandang ekonomi lingkungan, ekosistem hutan tidak lagi hanya dipandang sebagai penyedia sumber daya material, melainkan telah diakui sebagai modal alam (*natural capital*) yang menyediakan jasa regulasi iklim yang sangat vital Coztanza, Robert (1997). Landasan utama dalam memahami

kontribusi sektor kehutanan terhadap perbaikan kualitas udara adalah melalui Teori *Carbon Sink* atau penyerap karbon. Konsep ini merujuk pada keberadaan reservoir alami yang memiliki kapasitas biologis untuk menyerap gas karbondioksida (CO₂) dari atmosfer dalam volume yang jauh lebih besar daripada jumlah emisi yang dilepaskannya kembali ke udara. Sebagai penyerap karbon terestrial utama, hutan berfungsi sebagai instrumen penyeimbang alami yang secara aktif menekan akumulasi gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas manusia.

Efektivitas hutan dalam menjalankan peranannya sebagai penyerap karbon sangat bergantung pada mekanisme asimilasi yang dikenal sebagai sekuestrasi karbon. Proses ini merupakan rangkaian aktivitas fiksasi di mana vegetasi hutan menyerap molekul CO₂ melalui proses fotosintesis, kemudian memisahkan unsur karbon untuk disimpan dalam komponen struktural tumbuhan seperti batang, akar, dan daun dalam jangka waktu yang sangat lama *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2006). Secara teoritis, luas kawasan hutan berbanding lurus dengan kapasitas sekuestrasi karbon di suatu wilayah, sehingga penggunaan variabel luas hutan dalam satuan persentase terhadap luas daratan menjadi indikator yang sangat relevan untuk mengukur daya dukung asimilasi lingkungan.

Dalam dinamika pembangunan negara-negara G20, integrasi teori *carbon sink* menjadi fondasi fundamental dalam mengejar target emisi nol bersih (*net-zero emission*). Hubungan kausalitas yang dibangun dalam teori ini menjelaskan bahwa beban emisi yang timbul akibat tingginya laju pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi harus dikompensasi melalui penguatan solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) *Griscom, Bronson W.* (2017). Dengan meningkatkan atau mempertahankan luas tutupan hutan, suatu negara dapat menginternalisasi eksternalitas negatif dari aktivitas industrinya secara efektif. Hal ini mempertegas bahwa keberadaan kawasan hutan bukan hanya menjadi isu konservasi semata, melainkan bagian integral dari strategi ekonomi hijau untuk memitigasi perubahan iklim global tanpa harus menghentikan roda pembangunan ekonomi secara total.

2.3 Hubungan Antar Variabel

2.3.1 Hubungan Pertumbuhan Ekonomi terhadap Emisi Karbondioksida

Hubungan antara pertumbuhan ekonomi, yang diproyeksikan melalui Gross Domestic Product (GDP) per kapita, dengan kualitas lingkungan dijelaskan secara komprehensif melalui hipotesis Environmental Kuznets Curve (EKC). Dalam kacamata ekonomi lingkungan, pertumbuhan ekonomi pada tahap awal seringkali mengacuhkan eksternalitas negatif berupa polusi demi mengejar target akumulasi modal. Fenomena ini terjadi karena dominasi efek skala, di mana perluasan aktivitas industri dilakukan tanpa disertai efisiensi energi.

Berdasarkan penelitian Iqbal Al Qodri et al. (2024) pada negara-negara G20, ditemukan bahwa peningkatan kompleksitas ekonomi awalnya memicu lonjakan emisi, namun seiring dengan meningkatnya kemakmuran (*affluence*), negara akan mencapai titik balik (*turning point*). Pada titik ini efek teknik melalui inovasi teknologi mulai mereduksi polusi secara signifikan. Hal tersebut selaras dengan *Ecological Modernization Theory (EMT)* yang memandang bahwa kemajuan ekonomi akan mendorong reformasi institusional dengan kesadaran lingkungan. Namun, Adrian (2024) memberikan catatan penting bahwa di negara dengan intensitas aktivitas ekonomi yang masih sangat tinggi, pertumbuhan PDB tetap menjadi determinan utama peningkatan emisi CO₂ sebelum mencapai ambang batas kesejahteraan tertentu.

2.3.2 Hubungan Konsumsi Energi Fosil terhadap Emisi Karbondioksida

Konsumsi energi fosil memiliki hubungan linear positif terhadap peningkatan emisi CO₂ yang dalam kerangka *Environmental Economics* dipandang sebagai sumber utama eksternalitas negatif bagi lingkungan. Penggunaan batubara, minyak bumi, dan gas alam dalam aktivitas industri dan transportasi melepaskan cadangan karbon yang tersimpan dalam tanah ke atmosfer secara instan. Berdasarkan model STIRPAT, energi fosil mempresentasikan komponen *Technology (T)* yang bersifat konvensional dan memiliki intensitas karbon tinggi (*dirty technology*).

Penelitian Dwi, et al. (2023) mengungkapkan bahwa ketergantungan pada energi fosil di negara-negara G20 merupakan pendorong utama degradasi lingkungan yang paling persisten. Hal ini dikarenakan struktur ekonomi yang masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil cenderung menciptakan jejak ekologi yang besar. Senada dengan hal tersebut, Tsandra, et al. (2023) menjelaskan bahwa konsumsi energi fosil di negara-negara *Emerging Markets* memberikan kontribusi polusi yang lebih signifikan dibandingkan negara maju. Dalam perspektif *Sustainable Development*, ketergantungan ini menjadi hambatan utama dalam mencapai keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi dengan kelestarian ekologis, karena setiap output ekonomi yang dihasilkan masih memerlukan input energi fosil yang besar.

2.3.3 Hubungan Konsumsi Energi Terbarukan terhadap Emisi Karbondioksida

Hubungan antara energi terbarukan dengan emisi CO₂, dijelaskan melalui *Energy Transition Theory*, di mana pergeseran paradigma dari sumber energi berbasis karbon ke energi bersih menciptakan efek substitusi yang secara sistematis menurunkan intensitas emisi. Dalam kerangka STIRPAT, energi terbarukan merepresentasikan komponen *Technology (T)* yang bersifat hijau (*green technology*), yang berfungsi sebagai faktor pengurang dampak lingkungan (*I*). Berdasarkan penelitian global oleh Kongkuah and Alessa (2025) ditemukan bahwa peningkatan pemanfaatan energi terbarukan secara konosisten mampu mereduksi emisi CO₂ di 184 negara melalui penurunan jejak karbon sektor energi.

Hal ini juga memperkuat argumen Rahman, et al. (2022) yang menekankan bahwa inovasi teknologi pada sektor energi terbarukan merupakan katalisator utama bagi negara-negara G20 untuk melakukan pemisahan (*decoupling*) antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan. Dalam perspektif *Environmental Economics*, penggunaan energi terbarukan bertindak sebagai upaya internalisasi eksternalitas positif, di mana pemenuhan kebutuhan energi dilakukan tanpa menghasilkan polusi yang membebani masyarakat. Dengan

demikian, peningkatan pangsa energi terbarukan tidak hanya menurunkan emisi secara langsung, tetapi juga mendukung tercapainya tujuan *Sustainable Development* melalui penyediaan energi yang bersih dan terjangkau.

2.3.4 Hubungan Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi Karbondioksida

Keterbukaan perdagangan memengaruhi tingkat laju emisi melalui tiga mekanisme utama, efek skala, efek komposisi, dan efek teknik. Dalam kerangka *Environmental Economics*, hubungan ini sering kali dikaitkan dengan *Pollution Haven Hypothesis*, yang berasumsi bahwa perdagangan bebas memicu relokasi industri padat polusi ke negara-negara dengan regulasi lingkungan yang lebih longgar guna menekan biaya produksi. Berdasarkan studi Sumiyati (2025) pada kawasan ASEAN-China FTA, ditemukan bahwa keterbukaan perdagangan cenderung meningkatkan emisi CO₂ akibat perluasan skala industri manufaktur (efek skala) yang belum diimbangi oleh standar lingkungan yang ketat.

Namun, dalam perspektif STIRPAT, perdagangan juga dapat berperan sebagai saluran transfer teknologi ramah lingkungan yang mampu menurunkan intensitas emisi. Sejalan dengan *Pollution Halo Hypothesis Rahman, et al. (2022)* memberikan argumen bahwa perdangan internasional memungkinkan terjadinya transmisi teknologi bersih (*technique effect*) dari negara maju ke mitra dagangnya. Jika efek teknik dan komposisi (pergeseran ke industri jasa/rendah karbon) lebih dominan dibandingkan efek skala, maka keterbukaan perdagangan justru akan mendukung *Sustainable Development* melalui dekarbonisasi jalur perdagangan global. Dengan demikian, dampak keterbukaan perdagangan di negara-negara G20 bersifat ambivalen, tergantung pada kekuatan regulasi lingkungan dan jenis teknologi yang ditransfer antar negara.

2.3.5 Hubungan Urbanisasi terhadap Emisi Karbondioksida

Hubungan antara urbanisasi dan emisi CO₂ dijelaskan melalui kerangka *Ecological Modernization Theory (EMT)*. Dalam model STIRPAT, urbanisasi merupakan refleksi dari dinamika *population (P)* yang memengaruhi dampak lingkungan melalui konsentrasi aktivitas ekonomi. Di satu sisi, pemusatan penduduk di wilayah perkotaan memicu peningkatan permintaan energi dan

mobilitas yang intensif, yang secara linear meningkatkan emisi. Penelitian Dwi, et al. (2023) menunjukkan bahwa urbanisasi di negara G20 memiliki pengaruh positif yang signifikan terhadap kenaikan emisi CO₂, terutama akibat perubahan gaya hidup dan pola konsumsi masyarakat perkotaan.

Namun, perspektif *Ecological Modernization Theory (EMT)* memberikan argumen pelengkap bahwa perkotaan juga merupakan pusat inovasi teknologi dan efisiensi lingkungan. Urbanisasi yang matang dapat memfasilitasi penggunaan infrastruktur bersama yang lebih efisien dibandingkan wilayah pedesaan. Meski demikian, Cahyo, et al. (2023) menekankan bahwa di negara seperti Indonesia, potensi positif urbanisasi seringkali belum tercapai akibat pertumbuhan wilayah yang tidak disertai infrastruktur transportasi publik ramah lingkungan, sehingga justru memperparah konsentrasi karbon di atmosfer. Oleh karena itu, dampak urbanisasi sangat bergantung pada sejauh mana modernisasi ekologis dan regulasi perkotaan diterapkan dalam pembangunan kota-kota di negara G20.

2.3.6 Hubungan Luas Kawasan Hutan terhadap Emisi Karbondioksida

Dalam perspektif ekonomi lingkungan, Teori Carbon Sink memandang ekosistem hutan sebagai reservoir alami yang berfungsi menyerap konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Hutan dikategorikan sebagai *sink* apabila kapasitasnya absorpsinya terhadap karbon dioksida (CO₂) melebihi jumlah emisi yang dilepaskannya. Secara biofisika, fungsi ini dijalankan melalui mekanisme sekuestrasi karbon, yaitu proses fiksasi molekul karbon melalui fotosintesis yang kemudian dikonversi menjadi biomassa vegetasi dalam waktu jangka panjang.

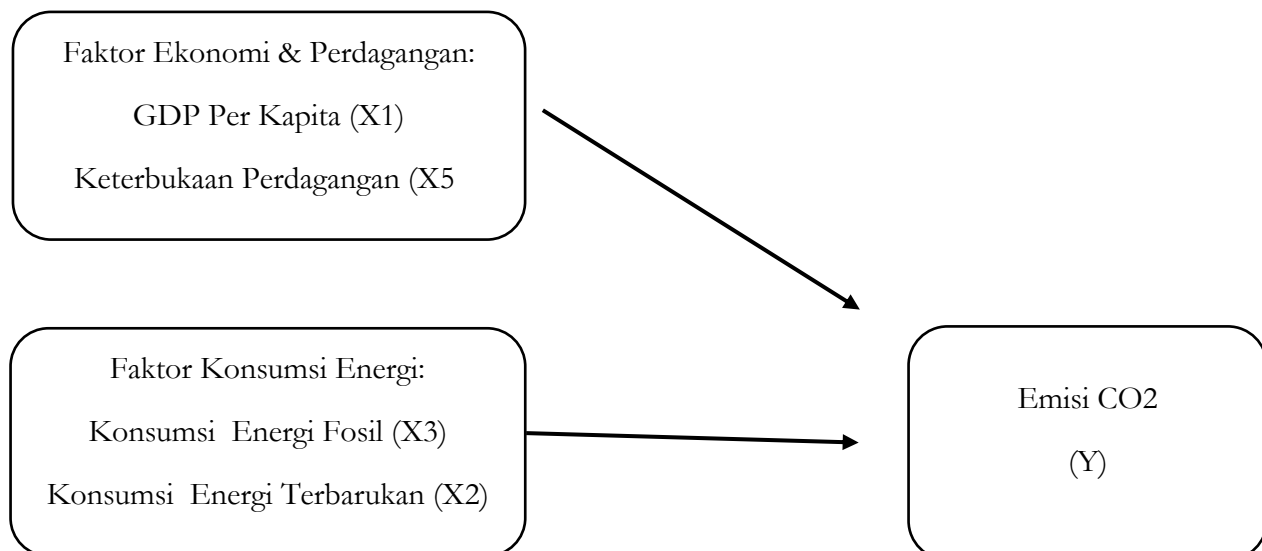
Secara substansial, luas kawasan hutan merepresentasikan daya dukung asimilasi lingkungan (*environmental assimilative capacity*) suatu wilayah. Dalam kerangka *Sustainable Development*, keberadaan hutan berfungsi sebagai instrumen penyeimbangan (*offsetting*) terhadap eksternalitas negatif yang dihasilkan oleh aktivitas industri dan urbanisasi. Hal ini sejalan dengan temuan Fauzi R (2017) dan Cahyo, et al. (2023) yang menegaskan bahwa peningkatan luas tutupan berkontribusi signifikan terhadap penurunan emisi karbon melalui penguatan

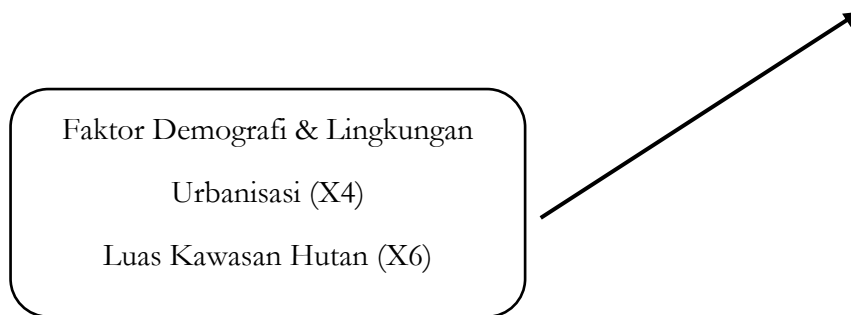
kapasitas serapan alami. Dengan demikian, luas kawasan hutan menjadi variabel krusial dalam memitigasi dampak emisi untuk mencapai keseimbangan ekologis negara-negara G20.

2.4 Hipotesis Penelitian

1. Diduga terdapat pengaruh positif GDP per kapita terhadap Emisi Karbon CO₂
2. Diduga terdapat pengaruh negatif GDP per kapita kuadrat terhadap Emisi Karbon CO₂
3. Diduga terdapat pengaruh negatif Konsumsi Energi Terbarukan terhadap Emisi Karbon CO₂
4. Diduga terdapat pengaruh positif Konsumsi Energi Fosil terhadap Emisi Karbon CO₂
5. Diduga terdapat pengaruh negatif Urbanisasi terhadap Emisi Karbon CO₂
6. Diduga terdapat pengaruh positif Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi Karbon CO₂
7. Diduga terdapat pengaruh negatif Luas Kawasan Hutan terhadap Emisi Karbon CO₂

2.5 Kerangka Pemikiran





Gambar 2 3 Kerangka Pemikiran

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Cara Pengumpulan Data

3.1.1 Jenis Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder kuantitatif yang diklasifikasikan sebagai data panel (*panel data*). Sesuai dengan definisi yang dikemukakan oleh Widarjono (2018) data panel atau *pooled data* merupakan kombinasi antara data runtun waktu (*time series*) dan data silang tempat (*cross-section*). Dalam penelitian ini, struktur data panel dibentuk dari penggabungan data *cross-section* yang terdiri dari negara-negara anggota G20 tidak termasuk kelompok negara Uni Eropa dengan data *time series* yang mencakup periode pengamatan tahun 2011 hingga 2021. Spesifikasi data panel yang digunakan bersifat seimbang (*balanced panel*), di mana setiap unit negara memiliki jumlah observasi waktu yang sama, sehingga total observasi penelitian merupakan hasil perkalian antara jumlah negara (N) dan jumlah tahun (T).

Penggunaan metode data panel dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan metodologis yang kuat sebagaimana dijelaskan oleh Widarjono (2018) Pertama, data panel memiliki kemampuan untuk mengontrol heterogenitas individu yang unik. Setiap negara anggota G20 memiliki karakteristik spesifik seperti budaya, kebijakan lingkungan, dan kondisi geografis yang mungkin tidak berubah seiring waktu namun memengaruhi variabel dependen. Data panel mampu mengakomodasi perbedaan karakteristik tersebut yang sering kali tidak dapat dideteksi oleh data *time series* atau *cross section* murni. Kedua, penggunaan data panel memberikan informasi yang lebih komprehensif, lebih bervariasi, dan mengurangi kolinearitas antarvariabel, serta meningkatkan derajat bebas (*degree of freedom*). Peningkatan derajat bebas ini sangat krusial karena berdampak langsung pada efisiensi estimasi parameter regresi, sehingga hasil yang diperoleh memiliki tingkat kepercayaan yang lebih tinggi. Ketiga, data panel lebih unggul dalam mempelajari dinamika perubahan (penyesuaian) perilaku ekonomi yang kompleks, seperti transisi energi dan pertumbuhan ekonomi terhadap emisi karbon.

3.1.2 Cara Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang diterapkan dalam penelitian ini adalah metode dokumentasi. Merujuk pada Widarjono (2018) metode dokumentasi merupakan teknik pengumpulan data yang dilakukan dengan cara menelusuri dan mengekstraksi data historis yang telah tersedia dalam bentuk laporan, catatan, atau basis data resmi yang dipublikasikan oleh lembaga yang berwenang. Pendekatan ini dipilih karena penelitian ini menggunakan data sekunder berjenis data panel, di mana peneliti tidak melakukan intervensi langsung terhadap subjek, melainkan mengolah data yang telah terstandarisasi secara internasional.

Oleh karena itu, untuk menjamin konsistensi data antar negara anggota G20 selama periode 2011 hingga 2021, penelitian ini memusatkan pengumpulan data pada dua basis data utama, yaitu:

1. *World Development Indicator (WDI) – The World Bank*

Digunakan sebagai rujukan primer untuk variabel makroekonomi dan demografi, meliputi PDB per kapita, konsumsi energi terbarukan dan fosil, urbanisasi, keterbukaan perdagangan, dan luas kawasan hutan. WDI dipilih karena menyediakan data deret waktu yang lengkap dan terstandarisasi untuk perbandingan internasional.

2. *Our World in Data*

Digunakan secara spesifik untuk mengekstraksi data terkait emisi karbon dioksida (CO₂). Portal ini dinilai memiliki akurasi tinggi dalam melacak jejak karbon historis.

3.2 Definisi Variabel Operasional

Dalam penelitian ini, variabel yang digunakan terdiri dari variabel independen dan variabel dependen. Variabel dependen, yang sering juga disebut sebagai variabel terikat, adalah jenis variabel yang dipengaruhi oleh atau menjadi hasil dari adanya variabel bebas. Dalam penelitian ini, variabel dependen yang digunakan adalah emisi karbondioksida CO₂ (metric tons per kapita) dari 19 negara anggota G20 selama periode tahun 2011-2021.

Sementara itu, variabel independen atau variabel bebas merujuk kepada variabel yang memiliki pengaruh terhadap atau menjadi penyebab perubahan maupun munculnya variabel dependen. Pada penelitian ini, variabel independen yang digunakan mencakup PDB per kapita (constans US\$ 2015), konsumsi energi terbarukan (%), konsumsi energi fosil (%), tingkat urbanisasi (%), keterbukaan perdagangan (%), serta luas kawasan hutan (%).

Tabel 3.1 Variabel, Simbol, Satuan, Sumber Data.

| Variabel | Simbol | Satuan | Sumber |
|------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-------------------|
| Emisi Karbondioksida | CO ₂ | <i>Metrics Tons per Capita (mt/capita)</i> | Our World in Data |
| Gross Domestic Product | GDPK | <i>Constans 2015 US\$</i> | World Bank (WDI) |
| Energi Terbarukan | REN | <i>% of total energy use</i> | World Bank (WDI) |

| | | | |
|-------------------------|-------|-----------------------|------------------|
| Konsumsi Energi Fosil | FOS | % of total energy use | World Bank (WDI) |
| Keterbukaan Perdagangan | TRADE | % of total GDP | World Bank (WDI) |
| Urbanisasi | URB | % of total population | World Bank (WDI) |
| Luas Kawasan Hutan | FOR | % of land area | World Bank (WDI) |

Definisi operasional dari variabel-variabel penelitian tersebut diuraikan secara mendalam sebagai berikut:

1. Emisi Karbondioksida (CO₂)

Emisi Karbondioksida (CO₂) dalam penelitian ini ditetapkan sebagai proksi utama degradasi lingkungan, yang didefinisikan sebagai residu karbon akibat pembakaran bahan bakar fosil dan proses industri. Indikator ini diukur menggunakan satuan *Metrics Tons per capita* untuk mengontrol efek skala populasi, sehingga intensitas emisi antarnegara G20 yang memiliki disparitas demografi tinggi seperti China versus negara berpenduduk kecil dapat dibandingkan secara objektif (*comparable*). Guna memenuhi asumsi normalitas dan menstabilkan varians data panel, variabel ini mentransformasikan nilai aslinya ke dalam bentuk Logaritma Natural (Ln_CO₂), yang sekaligus memungkinkan koefisien regresi diinterpretasikan sebagai elastisitas lingkungan terhadap pertumbuhan ekonomi. Seluruh data runtun waktu diekstraksi dari basis data *Our World In Data* (2024) yang ber sumber pada *Global Carbon Project*.

2. Gross Domestic Product (GDP) Per Capita

Gross Domestic Product (GDP) Per Kapita ditetapkan sebagai indikator utama untuk merepresentasikan tingkat kesejahteraan ekonomi rata-rata penduduk di suatu negara. Dalam konteks analisis dampak lingkungan pada negara G20, variabel ini tidak sekadar mengukur output produksi, melainkan menjadi proksi bagi tahapan pembangunan ekonomi (*stage of development*) yang menentukan pola konsumsi energi masyarakat. Guna mendapatkan gambaran pertumbuhan yang murni dari produktivitas riil tanpa bias akibat kenaikan harga

umum atau inflasi, penelitian ini secara spesifik menggunakan satuan US\$ konstan tahun dasar 2015 (*Constant 2015 US\$*). Data runtun waktu yang diekstraksi dari *World Bank* (2024) Bank Dunia ini selanjutnya ditransformasikan ke dalam bentuk Logaritma Natural (\ln_GDPK), sehingga koefisien regresi yang dihasilkan dapat diinterpretasikan sebagai elastisitas pendapatan, yaitu seberapa besar persentase perubahan emisi yang diakibatkan oleh setiap satu persen kenaikan pendapatan per kapita

3. **Konsumsi Energi Terbarukan**

Konsumsi Energi Terbarukan diposisikan sebagai indikator kunci untuk memotret transformasi struktural dalam bauran energi nasional negara-negara G20. Lebih dari sekadar angka statistik, variabel ini merepresentasikan pergeseran paradigma dari ketergantungan pada karbon menuju sistem energi yang regeneratif, memuat pemanfaatan tenaga air, surya, panas bumi, angin, hingga biomassa. Secara operasional, data ini diukur melalui proporsi penggunaan energi bersih terhadap total konsumsi energi final dengan satuan persen (%). Penggunaan rasio ini sangat esensial untuk menangkap intensitas ‘penghijauan’ energi secara relatif, tanpa terdistorsi oleh perbedaan skala ekonomi masing-masing negara.

Seluruh data yang dihimpun dari *International Energy Agency* (2025) dan *World Bank* (2024) ini tetap dipertahankan dalam satuan aslinya tanpa transformasi logaritma. Hal ini dilakukan agar hasil estimasi dapat menunjukkan secara langsung dampak setiap kenaikan satu persen porsi energi terbarukan terhadap perubahan volume emisi karbon secara riil.

4. **Konsumsi Energi Fosil**

Konsumsi energi fosil hadir dalam model ini sebagai variabel determinan yang merepresentasikan tingkat ketergantungan suatu negara terhadap sumber energi konvensional yang bersifat karbon intensif. Lebih dari sekadar angka konsumsi, variabel ini menangkap seberapa besar peran minyak bumi, batu bara, dan gas alam dalam menggerakkan roda ekonomi dan mobilitas masyarakat di negara-negara G20. Secara operasional, indikator ini diukur

melalui porsi penggunaan energi fosil terhadap total bauran energi nasional dengan satuan persen (%).

Penggunaan rasio ini sangat substansif untuk mengidentifikasi dominasi sumber energi kotor dalam struktur energi final di suatu negara secara objektif. Sejalan dengan perlakuan pada variabel energi lainnya, data yang bersumber dari *International Energy Agency* (2025) ini tidak ditransformasikan ke dalam Logaritma Natural. Langkah ini diambil agar model mampu menangkap secara lugas seberapa besar lonjakan emisi karbon yang dihasilkan dari setiap kenaikan satu persen poin ketergantungan pada energi fosil, yang sekaligus menjadi tolak ukur tantangan dekarbonisasi bagi masing masing negara.

5. Urbanisasi

Urbanisasi disertakan dalam model ini untuk menangkap dinamika pergeseran spasial penduduk yang menjadi salah satu penggerak utama aktivitas ekonomi dan konsumsi energi massal. Variabel ini didefinisikan sebagai proporsi penduduk yang menetap di kawasan perkotaan dibandingkan dengan total populasi nasional suatu negara. Secara operasional, indikator ini diukur dalam satuan persen (%) untuk menangkap fenomena pemusatan manusia yang biasanya diikuti oleh perubahan gaya hidup, peningkatan intensitas transportasi, serta tuntutan infrastruktur yang lebih masif. Dengan menggunakan data dari *World Bank* (2024), variabel ini dipertahankan dalam bentuk aslinya tanpa transformasi logaritma.

Pendekatan ini dipilih agar hasil estimasi dapat menunjukkan secara nyata bagaimana setiap kenaikan satu persen poin tingkat urbanisasi di kawasan negara G20 berkontribusi terhadap eskalasi emisi karbon, mengingat kawasan perkotaan sering kali menjadi pusat konsentrasi emisi akibat aktivitas industri dan mobilitas yang tinggi.

6. Keterbukaan Perdagangan

Keterbukaan Perdagangan diintegrasikan ke dalam model untuk merepresentasikan sejauh mana intensitas integrasi suatu negara ke dalam pasar global memengaruhi kondisi lingkungan domestiknya. Secara operasional, variabel ini didefinisikan sebagai pengukuran variabel ini dilakukan dengan

menjumlahkan nilai perdagangan internasional (ekspor dan impor) yang kemudian dibandingkan dengan total GDP negara bersangkutan. Indikator ini tidak sekadar mengukur volume transaksi antar negara, melainkan menjadi cerminan dari keterbukaan ekonomi yang membawa konsekuensi ganda, di satu sisi dapat memicu peningkatan emisi melalui aktivitas produksi massal (*scale effect*), namun di sisi lain berpotensi menurunkan emisi melalui transfer teknologi rendah karbon (*technique effect*).

Dengan menggunakan data dari *World Development Indicators* (2024), variabel ini dipertahankan dalam satuan aslinya guna mengukur sensitivitas emisi karbon terhadap setiap satu persen poin perubahan arus perdagangan internasional. Hal ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi apakah tren globalisasi pada negara-negara G20 saat ini lebih condong pada perbaikan lingkungan atau justru mempercepat degradasi akibat spesialisasi industri yang polutif.

7. Kawasan Hutan

Luas Kawasan Hutan sengaja disertakan untuk melihat seberapa kuat daya serap alami yang dimiliki suatu negara dalam menetralkan polusi. Di tengah masifnya industrialisasi G20, hutan berperan sebagai ‘paru-paru’ yang melakukan *carbon sequestration* atau pengikat karbon dioksida secara biologis. Indikator ini diukur melalui porsi tutupan lahan hijau terhadap total luas daratan dengan satuan persen (%). Mengacu pada data *World Development Indicators* (2024), variabel ini dibiarkan dalam bentuk aslinya tanpa sentuhan logaritma. Tujuannya agar kita bisa menangkap dampak yang lebih nyata apakah setiap satu persen poin penambahan hutan benar-benar mampu menjadi rem yang efektif bagi laju emisi, ataukah kapasitas alamnya sudah kewalahan menghadapi aktivitas manusia yang terlalu eksploitatif.

3.3 Metode Analisis

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan desain eksplanatori untuk menguji pengaruh kausalitas antar variabel yang telah dihipotesiskan. Data yang digunakan merupakan data sekunder dalam bentuk

data panel (*pooled data*), yang secara struktural mengintegrasikan dimensi antar ruang (*cross section*) dan dimensi antar waktu (*time series*) dengan alat analisis yang menggunakan *software EViews 13*.

Penggunaan data panel dalam konteks negara G20 dipandang paling representatif karena mampu menangkap dinamika perubahan kebijakan lingkungan dari tahun ke tahun sekaligus mengakomodasi heterogenitas karakteristik ekonomi antar negara anggota. Sesuai dengan pandangan Gurajati (2004), penggunaan data panel memberikan keunggulan dalam meminimalisir bias yang disebabkan oleh variabel yang tidak terobservasi (*omitted variable bias*). Data *cross section* dalam penelitian ini mencakup 19 negara anggota individu G20 (tanpa Uni Eropa untuk menghindari perhitungan ganda), dengan rentang *time series* selama 11 tahun (2011-2021). Dengan demikian, penelitian ini menghasilkan total 209 observasi.

Menurut Widarjono (2018), pengadopsian model data panel memberikan beberapa keunggulan metodologis yang krusial bagi validitas penelitian, di antaranya:

1. Peningkatan Efisiensi Statistik: Gabungan data *cross section* dan *time series* menghasilkan jumlah observasi yang lebih besar sehingga meningkatkan kekuatan uji statistik secara signifikan.
2. Informasi Lebih Informatif: Memberikan validitas data yang lebih tinggi serta meminimalisir kolinearitas antar variabel.
3. Kontrol Heterogenitas: Memberikan derajat kebebasan (*degree of freedom*) yang lebih besar dan mampu mengontrol bias yang disebabkan oleh variabel yang tidak terobservasi (*omitted variable bias*).

Untuk mengestimasi hubungan empiris antara determinan ekonomi dan luas lingkungan, penelitian ini membangun sebuah fungsi dasar di mana Emisi Karbondioksida (CO₂) diposisikan sebagai variabel dependen yang dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi, bauran energi (terbarukan dan fosil), struktur kependudukan, keterbukaan ekonomi, serta daya dukung alam. Secara fungsional, hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$CO_2 = f (GDPK, RE, FOS, TRADE, URB, FOR)$$

Dalam proses estimasi ekonometrika, peneliti melakukan modifikasi pada model tersebut. Untuk meminimalisir masalah heteroskedastisitas akibat perbedaan satuan ukur seperti pada variabel Emisi Karbondioksida dalam satuan Metrics Tons per kapita dan GDP per kapita dalam satuan mata uang (constant 2015 US\$), serta untuk memperoleh koefisien dalam bentuk elastisitas, maka variabel dengan skala data besar ditransformasikan ke dalam bentuk Logaritma Natural (Ln). Sebaliknya, variabel yang sudah dalam bentuk persentase tetap dipertahankan dalam satuan aslinya guna menjaga konsistensi interpretasi semi elastisitas.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, model regresi data panel dalam penelitian ini diformulasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} LnCO_{2,it} = & \beta_0 + \beta_1 LnGDPK_{it} + \beta_2 (LnGDPK)_{it}^2 + \beta_3 RE_{it} + \beta_4 FOS_{it} \\ & + \beta_5 TRADE_{it} + \beta_6 URB_{it} + \beta_7 FOR_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

Keterangan Model:

$LnCO_{2,it}$ = Logaritma Natural Emisi Karbondioksida negara i pada tahun t

β_0 = konstanta atau titik potong intersep.

$LnGDPK$ = Logaritma Natural GDP Per Kapita.

$LnGDPK^2$ = Kuadrat dari Logaritma Natural GDP per kapita.

RE = Pangsa Konsumsi Energi Terbarukan (%).

FOS = Pangsa Konsumsi Energi Fosil (%).

$TRADE$ = Keterbukaan Perdagangan (% terhadap PDB).

URB = Urbanisasi (% penduduk perkotaan).

FOR = Luas Kawasan Hutan (% dari luas daratan).

i,t = Menunjukkan uniti negara (1-19) dan periode pengamatan (2011-2021).

ε_{it} = *Error term* (mewakili variabel lain di luar model yang memengaruhi emisi).

3.4 Model Regresi Data Panel

Dalam mengestimasi parameter model negara anggota G20 dengan menggunakan teknik regresi data panel. Terdapat tiga pendekatan estimasi yang umum digunakan dalam penelitian ini. Maka diperlukan pengujian statistik untuk menentukan model mana yang paling efisien dan tepat dalam menjelaskan fenomena emisi CO₂ di negara anggota G20. Menurut Widarjono (2018), estimasi dengan data panel memberikan keunggulan dalam mendeteksi dan mengukur efek yang tidak dapat diobservasi secara murni oleh *data cross section* maupun *time series* saja. Terdapat tiga pendekatan utama dalam mengestimasi model data panel:

3.4.1 Common Effect Model (CEM)

Common Effect Model (CEM) merupakan teknik estimasi yang paling sederhana dalam model data panel karena menggunakan pendekatan *Pooled Least Square (PLS)*. Menurut Widarjono (2018), model ini menggabungkan seluruh data *time series* dan *cross section* tanpa memperhatikan adanya dimensi antar individu maupun antar waktu. Dengan kata lain, asumsi dalam model CEM bahwa perilaku data antar negara G20 bersifat konstan dan seragam sepanjang periode pengamatan (2011-2021).

Dalam model ini, diasumsikan bahwa nilai *intercept* (α) dan koefisien regresi (*slope*) adalah sama untuk semua unit negara. Estimasi parameter dilakukan dengan metode kuadrat terkecil biasa atau *Ordinary Least Square (OLS)*. Persamaan model CEM dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$Y_{it} = \alpha + \beta X_{it} + \mu_{it}$$

Keterangan:

i adalah unit individu atau *cross-section* (1, 2, ..., N)

t adalah periode waktu atau *time-series* (1, 2, ..., N)

α adalah konstanta atau *intercept*

β adalah koefisien regresi

μ_{it} adalah *error term* atau residual yang menangkap pengaruh variabel independen terhadap Y

Y_{it} adalah Emisi Karbondioksida (CO_2) negara I pada tahun t (dalam bentuk Ln)

X_{it} adalah Kumpulan variabel independen (PDB, Energi, dll) pada negara i tahun t.

Meskipun model *CEM* ini sederhana dalam estimasi, namun model ini memiliki keterbatasan karena mengabaikan heterogenitas antar individu. Oleh karena itu, diperlukan pengujian lebih lanjut melalui *Uji Chow* untuk menentukan apakah model ini lebih baik dibandingkan model dengan efek tetap (*Fixed Effect*).

3.4.2 Fixed Effect Model (FEM)

Keterbatasan model *CEM* dalam menangkap keberagaman karakteristik antar unit observasi dijawab oleh pendekatan kedua, yaitu *Fixed Effect Model (FEM)*. Menurut Widarjono (2018), model ini berangkat dari asumsi bahwa setiap individu atau negara memiliki karakteristik unik yang menyebabkan adanya perbedaan nilai intersep. Meskipun demikian, model ini tetap mengasumsikan bahwa koefisien regresi atau kemiringan (*slope*) variabel independen tidak berubah antar individu dan antar waktu.

Dalam konteks emisi CO_2 di G20, pendekatan *FEM* mengakui secara implisit bahwa setiap negara memiliki faktor internal yang bersifat tetap (*fixed*) seperti kondisi geografis, struktur publik, politik, atau budaya yang membedakan tingkat emisi satu negara dengan negara lainnya meskipun variabel ekonomi lainnya sama. Karena perbedaan ini dimodelkan melalui *dummy variable*, maka Widarjono (2018) juga menyebut teknik ini sebagai *Least Square Dummy Variable (LSDV)*

Secara matematis, spesifikasi model *FEM* dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta_1 X_{1it} + \beta_2 X_{2it} + \dots + \beta_k X_{kit} + \varepsilon_{it}$$

Keterangan:

Y_{it} adalah variabel dependen untuk individu ke-I pada waktu ke-t
 α_i adalah intersep untuk setiap individu ke-i. Penggunaan subskrip i menunjukkan bahwa intersep berbeda untuk setiap individu, namun tetap konstan sepanjang waktu.

β_1, \dots, β_k adalah koefisien regresi dari variabel independen ke-1 sampai ke-k.

X_{1it}, \dots, X_{kit} adalah variabel independen dalam penelitian.

ε_{it} adalah *Error term* atau residual penelitian.

3.4.3 Random Effect Model (REM)

Pendekatan ketiga ini dalam estimasi data panel adalah *Random Effect Model* (REM). Berbeda dengan model FEM yang menggunakan variabel *dummy* untuk menangkap perbedaan antar individu, model REM berasumsi bahwa perbedaan karakteristik antar negara anggota G20 tercermin melalui gangguan (*error term*). Widarjono (2018), dalam model ini intersep tidak dianggap sebagai parameter tetap, melainkan variabel acak yang bersifat acak (*random*).

Keunggulan dari pendekatan REM adalah kemampuannya dalam meningkatkan efisiensi parameter karena menghemat derajat kebebasan (*degree of freedom*), berbeda dengan FEM yang harus mengurangi derajat kebebasan akibat penggunaan banyak *variable dummy*. Model ini menggunakan metode *Generalized Least Square (GLS)* untuk mengatasi masalah korelasi antar residual.

Sesuai dengan pakem matematis dalam Widarjono (2018), model REM dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 X_{1it} + \beta_2 X_{2it} + \dots + \beta_k X_{kit} + \omega_{it}$$

Dalam persamaan $w_{it} = e_i + u_{it}$, istilah error gabungan w_{it} terdiri dari dua komponen error, dimana e_i adalah komponen error cross section dan u_{it} adalah kombinasi komponen error cross section dan time series

Keterangan:

Y_{it} adalah variabel dependen untuk individu ke-I pada waktu ke-t

α adalah konstanta atau intersep rata-rata

β_1, \dots, β_k adalah koefisien regresi dari variabel independen

ω_{it} adalah *composite error term* (gabungan dari $e_i + u_{it}$.)

3.5 Pemilihan Model Regresi

Setelah memahami ketiga pendekatan model (CEM, FEM, dan REM), langkah selanjutnya menentukan model mana yang paling objektif dan efisien untuk digunakan. Pemilihan model yang tepat sangat menentukan validitas hasil penelitian. Proses ini dilakukan secara bertahap dengan membandingkan efektivitas antara satu model dengan model lainnya. Sesuai prosedur yang dikembangkan dalam Widarjono (2018), terdapat tiga uji utama yang digunakan:

3.5.1 Uji Chow (*Chow Test*)

Uji Chow merupakan tahapan awal yang digunakan untuk membandingkan dan memilih model terbaik antara *Common Effect Model (CEM)* dan *Fixed Effect Model (FEM)*. Pengujian ini didasarkan pada distribusi *F-statistic* untuk menguji apakah intersep yang bervariasi antar negara (seperti dalam FEM) lebih mampu menjelaskan data dibandingkan intersep tunggal (seperti dalam CEM), hipotesis dalam uji ini adalah:

- Hipotesis

H_0 : *Common Effect Model (CEM)* lebih tepat digunakan

H_1 : *Fixed Effect Model (FEM)* lebih tepat digunakan

Langkah-langkah yang dilakukan dalam Uji Chow sebagai berikut:

1. Estimasi data terlebih dahulu dengan menggunakan pendekatan *Fixed Effect Model (FEM)*.

2. Melakukan pengujian *redundant fixed effects* untuk membandingkan model yang dibatasi (*Common Effect*) dengan model yang tidak dibatasi (*Fixed Effect*).
3. Melihat nilai probabilitas pada statistik F dan Chi-Square dengan ketentuan pengambilan keputusan sebagai berikut:
 - a. Jika nilai probabilitas F dan Chi-Square $> \alpha = 5\%$ (0,05), maka H0 gagal ditolak, sehingga pengujian regresi data panel menggunakan *Model Common Effect* (CEM).
 - b. Jika nilai probabilitas F dan Chi-Square $< \alpha = 5\%$ (0,05), maka H0 ditolak, sehingga pengujian regresi data panel menggunakan model *Fixed Effect* (FEM).

Secara formal, pengujian ini dilakukan dengan merumuskan hipotesis sebagai berikut:

H0 : *Common Effect Model* (CEM)

H1 : *Fixed Effect Model* (FEM)

Kriteria pengujian untuk hipotesis di atas adalah:

H0 ditolak jika nilai F-hitung $>$ F-tabel, atau dapat juga dilihat melalui nilai signifikansinya yaitu H0 ditolak jika nilai probabilitas F $< \alpha$ (0,05).

Dalam praktiknya, Uji F dilakukan dengan memeriksa nilai probabilitas (*Prob*) pada bagian *Cross-section* F. Apabila nilai tersebut lebih dari 0,05 (tingkat signifikansi yang ditetapkan), maka model yang dipilih adalah CEM. Namun, jika nilai tersebut kurang dari 0,05 maka model yang dipilih adalah FEM.

4. Menindaklanjuti uji hasil, jika berdasarkan Uji Chow-Test dipilih model *Common Effect*, maka pengujian regresi data panel dapat dilakukan secara langsung menggunakan model OLS. Namun, apabila yang terpilih adalah model *Fixed Effect*, maka penelitian harus dilanjutkan ke tahap Uji Hausman-Test untuk menentukan apakah model yang digunakan sebaiknya *Fixed Effect* atau *Random Effect*.

3.5.2 Uji Hausman (Hausman-Test)

Setelah dilakukan Uji Chow dan apabila model yang terpilih adalah *Fixed Effect Model* (FEM), maka langkah selanjutnya adalah melakukan Uji Hausman. Menurut Widarjono (2018), uji ini bertujuan untuk membandingkan dan memilih model terbaik antara *Fixed Effect Model* (FEM) dan *Random Effect Model* (REM) yang akan diterapkan dalam analisis regresi data panel. Langkah-langkah yang dilakukan dalam Hausman-test adalah sebagai berikut:

1. Estimasi data terlebih dahulu dengan menggunakan pendekatan *Random Effect Model* (REM)
2. Melakukan pengujian dengan menggunakan prosedur *Hausman-Test* untuk melihat konsistensi estimator antara model FEM dan REM
3. Melihat nilai probabilitas pada statistik Chi-Square dengan ketentuan pengambilan keputusan sebagai berikut:
 - a. Jika nilai probabilitas Chi-Square $> \alpha = 5\%$ (0,05), maka H_0 diterima, sehingga pengujian regresi data panel menggunakan *Random Effect Model* (REM).
 - b. Jika nilai probabilitas Chi-Square $< \alpha = 5\%$ (0,05), maka H_0 ditolak, sehingga pengujian regresi data panel menggunakan model *Fixed Effect* (FEM).

Atau secara formal, pengujian ini dilakukan dengan merumuskan hipotesis sebagai berikut:

H_0 : *Random Effect Model* (REM) lebih tepat digunakan.

H_1 : *Fixed Effect Model* (FEM) lebih tepat digunakan.

Kriteria pengujian untuk hipotesis di atas adalah:

H_0 ditolak jika nilai *P-value* lebih kecil dari nilai α (0,05) atau,

H_0 diterima jika nilai *P-value* lebih besar dari nilai α (0,05)

Uji Hausman ini dinilai berdasarkan nilai probabilitas dari *cross-section random*. Widarjono (2018), jika nilai probabilitas dalam uji hausman kurang dari 5% (0,05), maka hipotesis nol (H_0) akan ditolak. Hal ini menunjukkan

bahwa terdapat korelasi antara komponen kesalahan dengan variabel independen, sehingga model yang sesuai untuk persamaan analisis regresi tersebut adalah model *Fixed Effect*. Sebaliknya, jika nilai probabilitas lebih dari 5%, maka hipotesis alternatif (H1) ditolak, yang menunjukkan bahwa model *Random Effect* lebih tepat digunakan karena tidak terdapat korelasi antara gangguan dan variabel independen.

3.5.3 Uji Lagrange Multiplier (LM)

Uji *Lagrange Multiplier (LM)* digunakan untuk memilih model yang terbaik antara *Common Effect Model (CEM)* dan *Random Effect Model (REM)*. Menurut Widarjono (2018), uji ini dikembangkan oleh Breusch-Pagan untuk mengetahui apakah terdapat efek *random* pada model dengan didasarkan pada nilai residual dari metode OLS. Langkah-langkah yang dilakukan dalam melaksanakan *LM-test* adalah sebagai berikut:

1. Estimasi model terlebih dahulu dengan menggunakan pendekatan *Common Effect Model (CEM)* atau *Pooled Least Square*.
2. Melakukan pengujian dengan menggunakan prosedur *Breusch-Pagan Lagrange Multiplier* untuk melihat keberadaan efek *cross-section* maupun *time-series*.
3. Melihat nilai probabilitas pada statistik *Breusch-Pagan* dengan ketentuan pengambilan keputusan sebagai berikut:
 - a. Jika nilai probabilitas *Breusch-Pagan* $> \alpha = 5\%$ (0,05), maka H0 diterima, sehingga pengujian regresi data panel menggunakan *Common Effect Model (CEM)*.
 - b. Jika nilai probabilitas *Breusch-Pagan* $< \alpha = 5\%$ (0,05), maka H0 ditolak, sehingga pengujian regresi data panel menggunakan model *Random Effect (REM)*.

Atau secara formal, pengujian ini dilakukan dengan merumuskan hipotesis sebagai berikut:

H0 : *Common Effect Model (CEM)* lebih tepat digunakan.

H1 : *Random Effect Model (REM)* lebih tepat digunakan.

Kriteria pengujian untuk hipotesis di atas adalah:

H_0 ditolak jika nilai probabilitas *Breusch-Pagan* lebih kecil dari nilai α (0,05) atau,

H_0 diterima jika nilai Probabilitas *Breusch-Pagan* lebih besar dari nilai α (0,05)

Uji LM ini sangat penting karena jika nilai signifikannya kurang dari 5%, hal tersebut mengindikasikan bahwa model *Random Effect* lebih baik dalam menjelaskan variasi data panel dibandingkan model *Common Effect*. Namun, jika nilai probabilitas lebih besar dari (5%), maka penggunaan model *Common Effect* (OLS biasa) sudah cukup memadai tanpa perlu mempertimbangkan efek acak (*random effect*)

3.6 Uji Asumsi Klasik

Pengujian asumsi klasik dilakukan untuk memastikan parameter estimasi yang dihasilkan bersifat *BLUE* (*Best Linear Unbiased Estimator*). Mengacu terhadap sudut pandang Widarjono (2018), penerapannya dalam regresi data panel memiliki perlakuan yang berbeda dibandingkan regresi linear biasa, tergantung pada model estimasi yang dipilih. Dalam penelitian ini, pengujian uji asumsi klasik dibagi menjadi dua kondisi utama:

1. Kondisi pertama, jika model yang terpilih adalah *Common Effect Model* (*CEM*) atau *Fixed Effect Model* (*FEM*), maka seluruh rangkaian pengujian uji asumsi klasik (multikolinearitas, heteroskedastisitas, autokorelasi), wajib dipenuhi. Hal ini dikarenakan kedua model tersebut berbasis metode *Ordinary Least Square* (*OLS*) yang mensyaratkan tidak adanya gangguan asumsi pada residual agar hasil estimasi tetap valid dan tidak bias.
2. Kondisi kedua, jika model yang terpilih adalah *Random Effect Model* (*REM*), maka pengujian difokuskan pada Uji Multikolinearitas saja. Uji heteroskedastisitas dan autokorelasi tidak lagi diperlukan karena model *REM* diestimasi menggunakan metode *Generalized Least Square* (*GLS*) yang secara inheren telah mengatasi masalah varians residual dan korelasi antar waktu melalui proses transformasi data.

Berdasarkan ketentuan tersebut, berikut adalah langkah-langkah pengujian asumsi klasik yang akan dilakukan:

3.6.1 Uji Multikolinearitas

Uji Multikolinearitas diterapkan guna memastikan bahwa variabel-variabel penjelas dalam model regresi tidak saling memiliki keterkaitan linear yang kuat. Berdasarkan pandangan Widarjono (2018), sebuah model yang kredibel mensyaratkan tidak adanya korelasi antar variabel independen sehingga masing-masing variabel mampu memberikan informasi yang unik dan independen terhadap variabel dependen.

Langkah dalam pengujian uji multikolinearitas:

1. Analisis Matriks Kolerasi (*Correltion Matrix*)

Peneliti meninjau, derajat asosiasi antar variabel independen melalui koefisiensi korelasi. Merujuk pada Widarjono (2018) dan Gurajati (2004), gejala multikolinearitas serius patut diduga muncul apabila koefisien korelasi antar variabel independen melebihi angka 0,80 atau 0,90.

2. Paramater *Tolarence*

Penilaian dilakukan melalui angka *tolarence*, yang mengukur sisa varians variabel independen yang tidak dijelaskan oleh variabel bebas lainnya. Model dinyatakan baik jika nilai *tolarence* $> 0,10$.

3. Parameter *Variance Infaltion Factor* (VIF)

Sebagai pembanding, peneliti juga meninjau nilai VIF guna melihat sejauh mana varians koefisien regresi terdistorsi oleh interkorelasi. Model dinyatakan bebas dari multikolinearitas jika nilai *Variance Inflation Factor* (VIF) < 10 .

4. Jika kedua syarat di atas terpenuhi, maka koefisien regresi dapat diinterpretasikan secara individu tanpa adanya gangguan redudansi data antar variabel bebas.

3.6.2 Uji Heteroskedastisitas

Uji Heteroskedastisitas bertujuan untuk memverifikasi apakah varians dari residual dalam model regresi bersifat konstan dari satu pengamatan ke

pengamatan lainnya. Menurut Widarjono (2018), model yang efisien harus memenuhi asumsi homoskedastisitas, di mana keragaman error bersifat tetap, guna menjamin ketepatan estimasi standar error.

Langkah-langkah dalam pengujian heteroskedastisitas:

1. Transformasi Residual

Langkah ini dilakukan dengan meregresikan nilai absolut dari residual (sebagai variabel dependen) terhadap masing-masing variabel independen di dalam model. Dengan tujuan untuk melihat apakah variabel bebas memiliki pengaruh yang signifikan terhadap fluktuasi error.

2. Pengambilan Keputusan

Kriteria penilaian didasarkan pada tingkat signifikansi (p -value) dari hasil regresi tersebut. Model dinyatakan bebas heteroskedastisitas jika nilai signifikansi (p -value) setiap variabel independen $> 0,05$.

3. Implikasi Statistik

Jika terdapat variabel independen dengan p -value $< 0,05$, maka model terindikasi mengalami heteroskedastisitas dan memerlukan perbaikan (seperti transformasi data atau penggunaan estimasi *robust*).

3.6.3 Uji Autokorelasi

Uji Autokorelasi merupakan prosedur untuk memeriksa korelasi antara gangguan (*error term*) pada periode t dengan gangguan pada periode $t - 1$ atau periode sebelumnya. Masalah ini lazim ditemukan pada observasi yang berurutan dalam rentang waktu tertentu. Keberadaan autokorelasi menyebabkan varians dari estimator tidak lagi minimum, yang mengakibatkan model regresi tidak efisien dan uji signifikansi menjadi kurang dapat diandalkan meskipun estimator tetap tidak bias.

Langkah-langkah prosedural pengujian autokorelasi:

1. Ekstraksi Statistik Durbin-Watson

Langkah pertama adalah memperoleh nilai statistik d melalui proses estimasi model regresi yang telah ditentukan sebelumnya.

2. Perbandingan Nilai Kritis (dL dan dU)

Mengidentifikasi ambang batas melalui tabel Durbin-Watson untuk mendapatkan nilai *lower bound* (dL) dan *upper bound* (dU). Parameter ini ditentukan oleh tingkat signifikansi 5%, jumlah sampel (n), serta jumlah variabel independen dalam model (k)

3. Penentuan Area Keputusan

- a. Kondisi Non-Autokorelasi: Model dinyatakan terbebas dari masalah autokorelasi apabila nilai d berada di dalam area $dU < d < 4 - dU$.
- b. Identifikasi Autokorelasi Positif: Gejala ini ditemukan apabila nilai d lebih kecil dari nilai atas bawah ($d < dL$)
- c. Identifikasi Autokorelasi Negatif: Masalah ini muncul ketika nilai d lebih besar dari selisih empat dengan batas bawah ($d > 4 - dL$)
- d. Area Tanpa Kesimpulan (*Inconclusive*): Jika nilai d terletak di antara dL dan dU, atau di antara $(4 - dU)$ dan $(4 - dL)$, maka tidak dapat ditarik kesimpulan pasti mengenai keberadaan tersebut.

Apabila model gagal memenuhi asumsi non-autokorelasi, Widarjono (2018), menekankan perlunya perbaikan spesifikasi model. Solusi yang dapat ditempuh meliputi penggunaan metode *Generalized Least Square* (GLS) atau melakukan transformasi pada variabel melalui skema *first difference* untuk mengeliminasi ketergantungan antar-error tersebut

3.6.4 Uji Normalitas

Uji Normalitas bertujuan untuk menguji apakah dalam model regresi, variabel pengganggu atau residual memiliki distribusi normal. Sesuai dengan pandangan Widarjono (2018), asumsi ini penting karena uji statistik seperti uji-t dan uji-f didasarkan pada asumsi bahwa residual berdistribusi normal. Jika asumsi ini dilanggar, maka hasil uji signifikansi secara statistik dapat menjadi tidak valid untuk sampel berukuran kecil.

Langkah pengujian uji normalitas:

1. Identifikasi Residual

Langkah pertama adalah mengekstraksi nilai residual dari model regresi yang telah diestimasi. Pengujian dilakukan pada residual, bukan pada masing-masing variabel penelitian.

2. Pemilihan Alat Uji

Penelitian ini menggunakan metode Jarque-Bera (JB Test) atau Kolmogorov-Smirnov untuk memverifikasi distribusi data secara formal. Metode ini membandingkan *skewness* (kecondongan) dan *kurtosis* (keruncingan) dari residual dengan distribusi normal.

3. Kriteria Pengambilan Keputusan

Residual Terdistribusi Normal: Apabila nilai probabilitas Jarque-Bera $> \alpha$ (0,05).

Residual Tidak Terdistribusi Normal: Apabila nilai probabilitas Jarque-Bera $< \alpha$ (0,05).

Pertimbangan dalam data panel, dan dalam literatur ekonometrika, Widarjono (2018), juga menggarisbawahi pada sampel yang berjumlah besar. Asumsi normalitas terkadang dapat dikesampingkan tanpa mengurangi validitas model secara drastis. Hal ini didasarkan pada *Central Limit Theorem* yang menyatakan bahwa distribusi sampling akan cenderung mendekati normal seiring dengan bertambahnya jumlah observasi (n). Mengingat penelitian ini menggunakan 209 observasi, maka validitas model tetap terjaga. Namun, untuk menjaga rigiditas metodologi, pengujian ini tetap dilakukan sebagai bagian dari pemenuhan syarat BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*).

3.7 Uji Hipotesis (Kelayakan Model)

3.7.1 Uji Signifikansi Parsial (Uji t)

Uji t dilakukan untuk menguji dampak variabel-variabel bebas terhadap variabel tak bebas. Pengujian ini bertujuan untuk menilai signifikansi pengaruh variabel-variabel tersebut secara individu dalam model regresi.

- a. H_0 diterima (gagal ditolak), jika nilai signifikansi $t > 0,05$ atau nilai t -hitung $< t$ -tabel. Hal ini menunjukkan bahwa variabel independen secara parsial tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen.
- b. H_0 ditolak (H_a diterima), jika nilai signifikansi $t < 0,05$ atau nilai t -hitung $> t$ -tabel. Hal ini menunjukkan bahwa variabel independen secara parsial memiliki pengaruh signifikan terhadap variabel dependen

Penetapan wilayah penerimaan dilakukan dengan memanfaatkan tabel distribusi t . Poin kritis ditentukan berdasarkan tingkat signifikansi (α) sebesar 0,05 dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*) $df = n - k - 1$ (di mana n adalah jumlah observasi dan k adalah jumlah variabel bebas).

3.7.2 Uji Signifikansi Simultan (Uji F)

Langkah kedua adalah melakukan uji F untuk memverifikasi apakah seluruh variabel independen di dalam model memiliki kontribusi yang signifikan secara bersama-sama terhadap variabel dependen.

- a. H_0 diterima (gagal ditolak), jika nilai signifikansi $F > 0,05$ atau F -hitung $< F$ -tabel. Hal ini menunjukkan bahwa secara simultan variabel-variabel independen tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen.
- b. H_0 ditolak (H_a diterima), jika nilai signifikansi $F < 0,05$ atau F -hitung $> F$ -tabel. Hal ini menunjukkan bahwa secara simultan variabel-variabel independen berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen.

Penetapan wilayah penerimaan dilakukan dengan membandingkan F -hitung dengan F -tabel pada tingkat signifikansi (α) sebesar 0,05. Nilai kritis F -tabel ditentukan berdasarkan derajat kebebasan pembilang (*df numerator*) = k dan derajat kebebasan penyebut (*df denominator*) = $n - k - 1$.

3.7.3 Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi digunakan untuk mengukur seberapa besar proporsi atau persentase total variasi variabel dependen dapat dijelaskan oleh variabel-variabel independen dalam model regresi.

- a. Nilai R^2 mendekati 0, menunjukkan bahwa kemampuan variabel-variabel independen dalam menjelaskan variasi variabel dependen sangat terbatas.

- b. Nilai R^2 mendekati 1, menunjukkan bahwa variabel-variabel independen memberikan hampir semua informasi yang dibutuhkan untuk memprediksi variasi variabel dependen.

Dalam penelitian ini, penelitian menggunakan nilai *Adjusted R-Squared* sebagai acuan utama. Berdasarkan rujukan Widarjono (2018), penggunaan *Adjusted R-Squared* lebih disarankan untuk model regresi linear berganda karena nilainya telah terkoreksi terhadap jumlah variabel independen, sehingga memberikan gambaran daya jelas model yang lebih objektif.

BAB IV

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Data Panel (Balanced Panel), yaitu penggabungan antara data lintas negara (*cross-section*) dan data deret waktu (*time-series*). Penggunaan model ini bertujuan agar penelitian dapat menangkap perbedaan karakteristik antar negara yang berbeda dan unik, yang mungkin tidak terlihat jika hanya menggunakan satu jenis data saja. Secara operasional, berikut rincian data yang digunakan:

- a. Cakupan Wilayah (*cross section*)

Penelitian ini berfokus pada 19 negara anggota G20 (tidak termasuk Uni Eropa sebagai organisasi). Pemilihan kelompok G20 didasarkan pada posisi strategis yang menguasai 80% GDP dan menyumbang sekitar 75% emisi karbon global, sehingga menjadi representatif dalam menggambarkan dinamika ekonomi dan lingkungan dunia.

Sampel meliputi: Amerika Serikat, Argentina, Australia, Brasil, China, India, Indonesia, Inggris, Italia, Jepang, Jerman, Kanada, Korea Selatan, Meksiko, Prancis, Rusia, Arab Saudi, Afrika Selatan, Turki.

Melalui teknik *purposive sampling*, untuk memastikan konsistensi data antar kedaulatan negara. Kehadiran anggota G20 yang terdiri dari negara maju dan

negara berkembang memberikan variasi data yang kaya untuk melihat perbedaan kebijakan emisi di berbagai tingkat kemajuan ekonomi.

b. Deret Waktu (*time series*)

Penelitian ini mencakup periode pengamatan selama 11 tahun (2011-2021). Rentang waktu ini dipilih karena mencakup dinamika ekonomi pascakrisis finansial global hingga fase disrupsi pandemi COVID-19. Selain itu, periode ini menyediakan data yang paling konsisten dan lengkap bagi seluruh variabel penelitian di negara anggota G20 yang bersumber dari *World Bank* dan *Our World in Data*.

c. Total Observasi

Sinergi antara 19 negara dan 11 tahun pengamatan menghasilkan total 209 observasi (19 x 11). Jumlah amatan ini secara statistik memadai untuk menjamin presisi estimasi dan memperkuat daya uji penelitian.

Untuk menjaga kestabilan data, variabel emisi karbon (LNCO2) dan GDP per kapita (LNGDPK & LNGDPK2) ditransformasikan ke dalam Logaritma Natural (LN). Selain memitigasi heteroskedastisitas, penggunaan LN memudahkan interpretasi hasil dalam bentuk elastisitas (persentase). Seluruh variabel lainnya telah disinkronisasi dalam matriks yang konsisten dan siap untuk diolah ke tahap pengujian selanjutnya

4.2 Hasil Analisis dan Pembahasan

4.2.1 Analisis Statistik Deskriptif

Analisis statistik deskriptif digunakan untuk memberikan gambaran atau deskripsi mengenai karakteristik variabel-variabel penelitian yang digunakan, yang meliputi nilai rata-rata (*mean*), nilai tengah (*median*), nilai maksimum, nilai minimum, dan standar deviasi. Hasil ringkasan statistik deskriptif ditujukan pada Tabel 2.1

Tabel 4.1 Statistik Deskriptif

| | Mean | Median | Maximum | Minimum | Std. Dev. | Obs |
|--------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----|
| Ln_CO2 | 1.928036 | 1.975411 | 3.146082 | 0.336461 | 0.710987 | 209 |

| | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Ln_GDPK | 9.511511 | 9.507190 | 10.99315 | 7.135188 | 1.079869 | 209 |
| Ln_GDPK2 | 91.62837 | 90.38667 | 120.8494 | 50.91090 | 20.07960 | 209 |
| RE | 14.08086 | 11.20000 | 50.00000 | 0.00000 | 10.99757 | 209 |
| FOS | 83.95583 | 87.36840 | 99.99945 | 49.73999 | 12.61787 | 209 |
| TRADE | 52.38485 | 53.53593 | 105.5663 | 22.48623 | 17.38487 | 209 |
| URB | 75.27032 | 80.44400 | 92.22900 | 31.27600 | 14.12652 | 209 |
| FOR | 32.97136 | 31.98490 | 68.48176 | 0.454486 | 18.41447 | 209 |

Sumber: Data diolah

Analisis statistik deskriptif pada Tabel 2.1 merangkum karakteristik 209 observasi penelitian yang menunjukkan variasi data yang cukup dinamis. Variabel emisi karbondioksida (Ln_CO2) memiliki nilai rata-rata 1.928036 dengan standar deviasi 0.710987, sementara variabel ekonomi Ln_GDPK dan Ln_GDPK2 masing masing mencatat rata-rata sebesar 9.511511 dan 91.62837.

Di sektor energi penggunaan Energi Fosil (FOS) masih mendominasi dengan rata-rata 83,95583%, sementara Energi Terbarukan (RE) hanya mencapai rata-rata 14,08086%. Adapun variabel kontrol lainnya menunjukkan nilai rata-rata sebesar 75,27032 untuk Urbanisasi (URB), 52,38485 untuk Keterbukaan Perdagangan (TRADE), dan 32,97136 untuk Luas Kawasan Hutan (FOR).

4.2.1 Uji Chow

Uji Chow ditujukan untuk melakukan pengujian, perbandingan, dan pemilihan model terbaik antara *Common Effect Model* (CEM) dan *Fixed Effect Model* (FEM) dalam konteks regresi data panel.

Tabel 4.2 Uji Chow

| Effect Test | Statistic | d.f. | Prob. |
|-------------------------|-----------|----------|--------|
| Cross-section F | 1595.92 | (18,183) | 0.0000 |
| Cross-ection Chi-square | 1058.05 | 18 | 0.0000 |

Sumber: Data diolah

H0: *Common Effect Model* (CEM)

H1: *Fixed Effect Model* (FEM)

Berdasarkan hasil Uji Chow pada Tabel di atas, terlihat bahwa nilai probabilitas untuk *Cross-section F* dan *Cross-section Chi-square* adalah sebesar 0,0000. Karena nilai signifikansi tersebut lebih kecil dari 0,05, maka dapat disimpulkan bahwa model *Fixed Effect* lebih layak digunakan dalam penelitian ini dibandingkan dengan model *Common Effect*.

4.2.2 Uji Hausman

Uji Hausman dilakukan untuk memilih model terbaik antara *Fixed Effect Model* (FEM) dan *Random Effect Model* (REM) dalam analisis data panel. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.3 Uji Hausman

| Test Summary | Chi-Sq. Statistic | Chi-Sq. d.f. | Prob. |
|----------------------|-------------------|--------------|--------|
| Criss-section Random | 5.95172 | 7 | 0.5454 |

Sumber: Data diolah

H0: *Random Effect Model* (REM)

H1: *Fixed Effect Model* (FEM)

Berdasarkan hasil pengujian hausman pada tabel di atas, diperoleh nilai statistik *Chi-Square* sebesar 5,951716 dengan nilai probabilitas sebesar 0.5454. Karena nilai probabilitas tersebut lebih besar dari taraf nyata $\alpha = 0,05$ ($0.5454 > 0.05$), maka hipotesis nol (H0) gagal ditolak.

Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat korelasi antara komponen *error* individu (spesifik negara) dengan variabel independen dalam model. Oleh karena itu, penggunaan *Random Effect Model* (REM) dinyatakan lebih tepat dan efisien karena mampu menghasilkan estimator yang *Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE) dibandingkan dengan *Fixed Effect Model*.

4.2.3 Uji Multikolinearitas

Uji Multikolinearitas bertujuan untuk memastikan tidak terdapat korelasi yang sangat kuat atau hubungan linear yang sempurna antar variabel independen dalam model regresi. Model yang baik mensyaratkan tidak adanya

hubungan multikolinearitas agar estimasi parameter bersifat objektif. Kriteria yang digunakan adalah jika nilai korelasi antar variabel $< 0,90$, maka model dinyatakan bebas dari masalah multikolinearitas serius.

Tabel 4.4 Uji Multikolinearitas

| | LNGDPK | LNGDPK2 | RE | FOS | TRADE |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| LNGDPK | 1.000000 | 0.998577 | -0.24435 | -0.42785 | 0.186217 |
| LNGDPK2 | 0.998577 | 1.000000 | -0.23639 | -0.42208 | 0.19717 |
| RE | -0.24435 | -0.23639 | 1.000000 | -0.47999 | -0.31256 |
| FOS | -0.42785 | -0.42208 | -0.47999 | 1.000000 | 0.003399 |
| TRADE | 0.186217 | 0.19717 | -0.31256 | 0.003399 | 1.000000 |
| URB | 0.633447 | 0.614867 | -0.38697 | -0.26745 | 0.014367 |
| FOR | 0.210958 | 0.198087 | 0.252637 | -0.28723 | -0.05399 |

Sumber: Data diolah

Berdasarkan matriks korelasi pada Tabel 4.6 diperoleh hasil sebagai berikut:

Variabel RE, FOS, TRADE, URB, dan FOR memiliki nilai korelasi di bawah 0,90, sehingga tidak terindikasi adanya masalah multikolinearitas pada variabel-variabel tersebut. Di sisi lain, variabel LNGDPK dan LNGDPK2 menunjukkan nilai korelasi sebesar 0.998577. Hal ini dapat dimaklumi karena LNGDPK2 merupakan bentuk kuadrat dari LNGDPK dalam rangka pengujian hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC).

Oleh karena itu, korelasi tinggi pada variabel tersebut tidak dianggap sebagai masalah teknis yang mengganggu model, karena terdapat hubungan fungsional yang inheren. Secara keseluruhan, model ini dinyatakan memenuhi syarat untuk digunakan dalam analisis selanjutnya.

4.2.4 Uji Normalitas

Uji Normalitas memiliki tujuan untuk mengetahui apakah residual dalam model regresi berdistribusi normal sebagai syarat asumsi pemenuhan klasik.. Tabel 4.7 menunjukkan hasil pengujian menggunakan Jarque-Bera:

Tabel 4 5 Uji Normalitas

| Indikator | Nilai |
|-------------|----------|
| Jarque-Bera | 5.88986 |
| Probability | 0.052606 |

Sumber: Data diolah

H0: Residual berdistribusi normal

H1: Residual tidak berdistribusi normal

Berdasarkan hasil pengujian normalitas, terlihat bahwa nilai *Jarque-Bera* adalah sebesar 5,889860 dengan nilai probabilitas sebesar 0,052606. Karena nilai probabilitas tersebut lebih besar dari 0,05 ($0,0526 > 0,05$), maka hipotesis nol (H0) diterima. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa residual dalam model penelitian ini berdistribusi normal dan memenuhi asumsi klasik untuk analisis regresi.

4.3 Estimasi Model Terbaik (REM)

Tabel 4 6 Random Effect Model (REM)

| Variabel | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|---------------------------------|-------------|------------|-------------|--------|
| C (Constant) | -1.6486 | 1.51322 | -1.0895 | 0.3015 |
| GDP (LOG) | 0.06838 | 0.38783 | 0.1763 | 0.8636 |
| GDP2 (LOG) | 0.00541 | 0.02395 | 0.22575 | 0.8259 |
| Konsumsi Energi Terbarukan (RE) | -0.0227 | 0.0019 | -11.928 | 0.0000 |
| Konsumsi Energi Fosil (FOS) | 0.01779 | 0.00362 | 4.9215 | 0.0006 |
| Keterbukaan Perdagangan (TRADE) | -0.0008 | 0.00048 | -1.5587 | 0.1501 |
| Urbanisasi (URB) | 0.01351 | 0.0046 | 2.93983 | 0.0148 |
| Luas Kawasan Hutan (FOR) | 0.00847 | 0.0064 | 1.3245 | 0.2148 |

| | | | |
|--------------------|---------|--------------------|---------|
| R-squared | 0.74129 | Mean dependent var | 0.03812 |
| Adjusted R-squared | 0.73228 | S.D. dependent var | 0.07343 |
| S.E. of regression | 0.038 | Sum squared resid | 0.29018 |

| | | | |
|-------------------|----------|--------------------|---------|
| F-statistic | 82.2765 | Durbin-Watson stat | 0.79186 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | |

Sumber: Data diolah

Berdasarkan tabel 4.8, didapatkan persamaan dari model Random Effect dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 CO2 = & -1.6486 + 0.06838GDP + 0.00541GDP2 + -0.0227RE \\
 & + 0.01779FOS + -0.0008TRADE + 0.01351TRADE \\
 & + 0.00847FOR + e
 \end{aligned}$$

CO2 adalah nilai Emisi Karbondioksida negara G20 (*metric ton percapita*)

GDP adalah nilai *Gross Domestic Product* negara G20 (*constan 2015 US\$*)

GDP2 adalah nilai *Gross Domestic Product Kuadrat* negara G20

RE adalah nilai Konsumsi Energi Terbarukan negara G20

FOS adalah nilai Konsumsi Energi Fosil negara G20

TRADE adalah nilai Keterbukaan Perdagangan negara G20

URB adalah nilai Urbanisasi negara G20

FOR adalah nilai Luas Kawasan Hutan negara G20

4.4 Uji Statistik

4.4.1 Uji t-Statistik

Pengujian ini ditujukan untuk memvalidasi pengaruh dari masing-masing variabel independen terhadap emisi CO2 secara parsial (individu). Dengan ambang batas signifikansi sebesar 5% atau $\alpha = 0,05$, hasil olah data menggunakan model *Random Effect Model* menunjukkan temuan sebagai berikut.

Tabel 4 7 Uji t-Statistik

| Variabel | Coefficient | t-Statistic | Prob. | Keterangan |
|----------------------------|-------------|-------------|--------|------------------|
| C (Constant) | -1.6486 | -1.0895 | 0.3015 | - |
| GDPK (LOG) | 0.06838 | 0.1763 | 0.8636 | Tidak Signifikan |
| GDPK2 (LOG) | 0.00541 | 0.22575 | 0.8259 | Tidak Signifikan |
| Konsumsi Energi Terbarukan | -0.0227 | -11.928 | 0.0000 | Signifikan |
| Konsumsi Energi Fosil | 0.01779 | 4.9215 | 0.0006 | Signifikan |

| | | | | |
|-------------------------|---------|---------|--------|------------------|
| Keterbukaan Perdagangan | -0.0008 | -1.5587 | 0.1501 | Tidak Signifikan |
| Urbanisasi | 0.01351 | 2.93983 | 0.0148 | Signifikan |
| Luas Kawasan Hutan | 0.00847 | 1.3245 | 0.2148 | Tidak Signifikan |

Berdasarkan Tabel 4.9 diatas, kriteria pengambilan keputusan didasarkan pada perbandingan nilai probabilitas (*p-value*) dengan tingkat signifikan (α) sebesar 5% (0,05). Apabila probabilitas variabel melampaui ambang 0,05 maka variabel tersebut dinyatakan tidak memiliki pengaruh yang signifikan secara statistik. Namun, jika probabilitas berada di bawah 0,05, maka variabel tersebut terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap variabel dependen.

Berdasarkan hasil pengolah data menggunakan Random Effect Model (REM), berikut ada hasil rincian dari pengaruh dari masing-masing variabel:

1. GDP Per Kapita (GDPK LOG)

$H_0 : \beta_1 \geq 0$ (tidak berpengaruh)

$H_a : \beta_1 \leq 0$ (berpengaruh)

Berdasarkan Tabel hasil estimasi regresi, variabel GDP Per Kapita (LnGDPK) memiliki nilai koefisien positif sebesar 0,06838 dengan nilai *t-statistic* sebesar 0,1763. Hasil pengujian menunjukkan nilai probabilitas sebesar 0,8636, yang mana nilai tersebut lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ ($0,8636 > 0,05$). Dengan demikian, keputusannya adalah gagal menolak H_0 , yang secara parsial berarti GDP Per Kapita tidak berpengaruh secara signifikan terhadap emisi CO₂ di negara-negara G20 selama periode pengamatan. Hasil ini tidak sejalan dengan hipotesis pertama (H_1) yang menduga adanya pengaruh positif dan signifikan.

Tidak signifikannya pengaruh ini mengindikasikan bahwa peningkatan pendapatan di negara-negara G20 tidak secara otomatis diikuti oleh kenaikan emisi karbon secara linear. Fenomena ini diduga terjadi karena heterogenitas struktur ekonomi anggota G20, di mana sebagian besar negara telah mulai mengadopsi teknologi efisien dan mengalihkan fokus ekonomi ke sektor jasa yang memiliki intensitas emisi lebih rendah. Kondisi tersebut menyebabkan variabel PDB bukan lagi

menjadi determinan utama yang mengendalikan fluktuasi emisi karbon di blok ekonomi tersebut dalam rentang tahun 2011-2021.

2. GDP Per Kapita Kuadrat (GDPK2 LOG)

$H_0 : \beta_2 \geq 0$ (tidak berpengaruh)

$H_a : \beta_2 \leq 0$ (berpengaruh)

Berdasarkan hasil estimasi pada tabel diatas, variabel LnGDPK2 memiliki nilai koefisien positif sebesar 0,00541 dengan nilai *t-statistic* sebesar 0,2257. Hasil pengujian menunjukkan nilai probabilitas sebesar 0,8259, yang jauh lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ ($0,8259 > 0,05$). Dengan demikian, keputusannya adalah gagal menolak H_0 , sehingga secara parsial variabel LnGDPK2 tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap emisi CO₂.

Ketidaksignifikanan variabel kuadratik ini memberikan penegasan bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan di negara-negara G20 tidak mengikuti pola non-linear sebagaimana hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Secara teoritis, koefisien LnGDPK2 seharusnya bernilai negatif signifikan untuk membentuk kurva U-terbalik (*inverted U-shaped*). Namun, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan pendapatan pada level yang lebih tinggi belum mampu memicu efek teknik (*technique effect*) yang cukup kuat untuk mereduksi emisi di seluruh blok G20.

Hal ini mengindikasikan bahwa akselerasi pertumbuhan ekonomi di negara-negara tersebut belum mencapai titik ambang (*threshold*) yang memungkinkan terjadinya perbaikan kualitas lingkungan secara otomatis. Kondisi ini memperkuat argumen bahwa penurunan emisi karbon di negara G20 tidak bisa sekadar mengandalkan peningkatan *output* ekonomi, melainkan memerlukan intervensi kebijakan yang lebih fundamental pada sektor energi dan teknologi hijau.

3. Konsumsi Energi Terbarukan (RE)

$H_0 : \beta_3 \geq 0$ (tidak berpengaruh)

$H_a : \beta_3 \leq 0$ (berpengaruh)

Berdasarkan Tabel diatas, variabel Konsumsi Energi Terbarukan (RE) memiliki nilai koefisien negatif sebesar -0.0227 dengan t-statistik yang sangat kuat sebesar -11.928. Hasil pengujian menunjukkan nilai probabilitas sebesar 0.0000, yang berarti nilai tersebut jauh lebih kecil dari taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ (0,05). Oleh karena itu, keputusannya adalah Menolak H_0 , sehingga secara parsial Konsumsi Energi Terbarukan berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Hasil yang diperoleh sesuai dengan hipotesis ketiga (H3).

Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan penggunaan sumber energi terbarukan di negara-negara G20 secara nyata mampu mereduksi jumlah emisi karbon yang dilepaskan ke atmosfer. Hal tersebut diasumsikan karena energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidro memiliki intensitas karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan energi fosil, sehingga transisi menuju energi bersih menjadi instrumen mitigasi perubahan iklim yang sangat efektif dalam periode penelitian ini,

4. Konsumsi Energi Fosil (FOS)

$H_0 : \beta_4 \geq 0$ (tidak berpengaruh)

$H_a : \beta_4 \leq 0$ (berpengaruh)

Berdasarkan Tabel diatas, variabel Konsumsi Energi Fosil (FOS) memiliki nilai koefisien positif sebesar 0.01779 dengan nilai t-statistik sebesar 4.9215. Hasil pengujian menunjukkan nilai probabilitas sebesar 0.0006, yang mana nilai tersebut lebih kecil dari taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ (0,05). Oleh karena itu, keputusannya adalah Menolak H_0 , sehingga secara parsial Konsumsi Energi Fosil berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Hasil yang diperoleh sesuai dengan hipotesis keempat (H4).

Hal ini mengindikasikan bahwa setiap peningkatan penggunaan energi fosil di negara-negara G20 secara nyata akan meningkatkan volume emisi karbon yang di lepaskan ke atmosfer. Hal tersebut diasumsikan karena energi fosil merupakan penumbang utama emisi gas rumah kaca melalui proses pembakaran dalam aktivitas industri dan transportasi,

sehingga ketergantungan pada sumber energi ini menjadi penyebab utama tingginya polusi dalam periode penelitian ini.

5. Keterbukaan Perdagangan (TRADE)

$H_0 : \beta_5 \geq 0$ (tidak berpengaruh)

$H_a : \beta_5 \leq 0$ (berpengaruh)

Berdasarkan Tabel diatas, variabel Keterbukaan Perdagangan menunjukkan nilai koefisien negatif sebesar -0.0008 dengan t-statistik sebesar -1.5587. Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh nilai probabilitas sebesar 0.1501, yang berarti nilai tersebut lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ (0,05). Dengan demikian, keputusannya Gagal Menolak H_0 , sehingga secara parsial Keterbukaan Perdagangan tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi CO₂. Hasil yang diperoleh tidak sesuai dengan hipotesis keenam (H5).

Hal ini mengindikasikan bahwa intensitas perdagangan internasional di negara G20 belum menjadi faktor penentu utama yang memengaruhi fluktuasi emisi karbon secara nyata. Hal tersebut diasumsikan karena adanya efek yang saling meniadakan antara peningkatan aktivitas ekonomi karena perdagangan (*scale effect*) dengan masuknya teknologi ramah lingkungan dari negara mitra dagang (*technique effect*), sehingga dampak bersihnya terhadap emisi CO₂ menjadi tidak signifikan dalam penelitian ini.

6. Urbanisasi (URB)

$H_0 : \beta_6 \geq 0$ (tidak berpengaruh)

$H_a : \beta_6 \leq 0$ (berpengaruh)

Berdasarkan tabel diatas, variabel Urbanisasi (URB) mencatatkan nilai koefisien positif sebesar 0.01351 dengan t-statistik sebesar 2.93983. Hasil pengujian menunjukkan nilai probabilitas sebesar 0.0148, yang mana nilai tersebut lebih kecil dari taraf signifikan $\alpha = 5\%$ (0,05). Oleh karena itu, keputusannya Menolak H_0 , sehingga secara parsial Urbanisasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Hasil yang diperoleh tidak sesuai dengan hipotesis keenam (H6)

Meskipun memiliki pengaruh yang signifikan, arah hubungannya adalah positif, yang mengindikasikan bahwa peningkatan populasi perkotaan di negara-negara G20 justru mendorong kenaikan emisi karbon. Hal tersebut diasumsikan karena proses urbanisasi memicu peningkatan konsumsi energi rumah tangga, aktivitas transportasi, dan permintaan infrastruktur yang masih bergantung pada sumber energi karbon tinggi, sehingga konsentrasi penduduk di perkotaan belum mampu menciptakan efisiensi lingkungan dalam periode penelitian ini.

7. Luas Kawasan Hutan (FOR)

$H_0 : \beta_7 \geq 0$ (tidak berpengaruh)

$H_a : \beta_7 \leq 0$ (berpengaruh)

Berdasarkan Tabel diatas, variabel Luas Kawasan Hutan (FOR) menunjukkan nilai koefisien positif sebesar 0.00847 dengan nilai t-statistik sebesar 1.3245. Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh nilai probabilitas 0.2148, yang berarti lebih besar dari taraf signifikan $\alpha = 5\%$ (0,05). Dengan demikian, keputusannya Gagal Menolak H_0 , sehingga secara parsial Luas Kawasan Hutan tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi CO₂. Hasil yang diperoleh tidak sesuai dengan hipotesis ketujuh (H7).

Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan atau keberadaan luas kawasan hutan di negara-negara G20 belum mampu memberi dampak reduksi emisi karbon yang nyata secara statistik dalam model ini. Hal tersebut diasumsikan karena laju emisi yang dihasilkan dari sektro energi dan industri di negara-negara G20 jauh lebih besar dibandingkan kapasitas asimilasi atau penyerapan karbon (*carbon sink*) oleh kawasan hutan yang ada. Sehingga peran hutan belum terlihat dominan dalam menentukan fluktuasi emisi karbon secara keseluruhan dalam periode penelitian ini.

4.4.2 Pengujian Signifikansi Simultan (Uji F)

Uji F digunakan untuk memvalidasi kelayakan model regresi dengan menguji seluruh variabel independen secara kolektif terhadap variabel

dependen. Berdasarkan hasil olah data, nilai F-statistic tercatat sebesar 82.2765 dengan nilai Prob(F-Statistic) sebesar 0.000000.

Karena nilai signifikansi jauh di bawah ambang batas $\alpha = 5\%$ (0,05), maka H_a diterima. Hal ini menegaskan bahwa variabel GDP Per Kapita, Konsumsi Energi Terbarukan, Konsumsi Energi Fosil, Keterbukaan Perdagangan, Urbanisasi, dan Luas Kawasan Hutan secara bersama-sama memberikan kontribusi yang signifikan terhadap variabel dependen Emisi CO₂. Dengan demikian, model *Random Effect* yang dibangun memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik (*goodness of fit*) untuk dianalisis lebih lanjut.

4.4.3 Koefisien Determinasi (R-Squared/R²)

Koefisien determinasi digunakan untuk mengukur sejauh mana variabel independen dalam model mampu menjelaskan variasi pada variabel dependen. Berdasarkan hasil estimasi *Random Effect Model* (REM), diperoleh nilai R-Squared sebesar 0.741291.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebesar 74,12% variasi emisi CO₂ dapat dijelaskan secara simultan oleh variabel GDP, Konsumsi Energi Terbarukan, Konsumsi Energi Fosil, Keterbukaan Perdagangan, Urbanisasi, dan Luas Kawasan Hutan. Sementara itu, sisanya sebesar 25,88% dipengaruhi oleh fakto-faktor di luar model penelitian ini. Nilai R² yang melampaui angka 0,70 mengindikasikan bahwa model memiliki kekuatan representasi yang tinggi terhadap data yang diamati.

4.5 Pembahasan Ekonomi

4.5.1 Pengaruh Variabel GDP Per Kapita dan GDP Per Kapita Kuadrat terhadap Emisi CO₂ (Keberlakuan EKC)

Berdasarkan hasil estimasi regresi data panel menggunakan *Random Effect Model* (REM), variabel GDPK memiliki nilai probabilitas sebesar 0,8648 dan variabel GDPK² sebesar 0,8259. Karena nilai probabilitas kedua variabel tersebut lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 5\%$ ($0,8648 > 0,05$ dan $0,8259 > 0,05$), maka hasil ini memberikan bukti empiris bahwa baik tingkat pendapatan

maupun percepatan pertumbuhan ekonomi tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap emisi CO₂ di wilayah G20. Temuan ini memberikan penegasan bahwa hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) tidak terbukti secara statistik pada sampel negara G20 selama periode pengamatan. Secara metodologis, sebagaimana telah dijabarkan pada Bab II, keberlakuan EKC mensyaratkan terbentuknya titik balik (*turning point*) yang hanya dapat terjadi apabila koefisien kuadrat β_2 bernilai negatif signifikan. Namun, hasil regresi menunjukkan koefisien positif pada Ln_GDPK₂, yang secara matematis berarti kurva tidak mencapai titik balik puncak dan tidak membentuk pola U-terbalik (*inverted U-shaped*).

Ketidakterbuktian EKC ini dapat dianalisis lebih dalam melalui kegagalan mekanisme transisi struktural di negara-negara G20:

1. Dominasi Efek Skala (*Scale Effect*): Hasil ini mengindikasikan bahwa secara kolektif, negara-negara G20 masih berada pada fase di mana ekspansi *output* ekonomi berjalan beriringan dengan peningkatan beban lingkungan. Kenaikan pendapatan per kapita belum mampu secara otomatis mereduksi emisi karena ketergantungan pada energi fosil yang masih dominan.
2. Belum Tercapainya Titik Ambang (*Threshold*): Tidak signifikannya variabel kuadrat menunjukkan bahwa G20 belum mencapai titik ambang pendapatan kritis yang mampu memicu Efek Teknik (*Technique Effect*) secara masif. Adopsi teknologi rendah karbon dan efisiensi energi di blok ini belum cukup kuat untuk memutar arah kurva dari degradasi menuju perbaikan kualitas lingkungan.
3. Heterogenitas Ekonomi G20: Sinkron dengan kritik pakar ekonomi ekologis yang diangkat pada Bab II, hasil ini membuktikan bahwa heterogenitas yang ekstrem antara negara maju yang berada pada fase pasca-industri (*post-industrial*) dengan negara berkembang yang masih intensif manufaktur menyebabkan pola hubungan non-linear tidak dapat terbentuk secara konsisten. Fenomena ini sekaligus memperkuat teori *decoupling* yang masih bersifat lemah (*weak decoupling*) di wilayah tersebut.

Oleh karena itu, temuan ini mengoreksi pandangan tradisional Iqbal Al Qodri et. al (2024) serta Adrian (2024) yang menempatkan pertumbuhan ekonomi sebagai determinan absolut polusi. Implementasi kebijakannya, negara G20 tidak dapat menerapkan strategi "tumbuh dulu, bersih kemudian" (*grow now, clean up later*). Karena pertumbuhan ekonomi terbukti tidak secara otomatis menurunkan emisi, maka diperlukan intervensi kebijakan langsung (*direct intervention*) pada bauran energi terbarukan dan penguatan regulasi lingkungan tanpa harus menunggu tercapainya level pendapatan tertentu

4.5.2 Pengaruh Variabel Konsumsi Energi Terbarukan terhadap Emisi CO₂

Berdasarkan hasil estimasi regresi data panel, variabel konsumsi energi terbarukan (RE) menunjukkan pengaruh signifikan terhadap emisi CO₂. Hal ini sejalan dengan ringkasan regresi yang memiliki nilai koefisien sebesar -0,0227 dengan tingkat signifikansi 0,0000. Mengingat nilai probabilitas tersebut jauh lebih kecil dari taraf nyata $\alpha = 0,05$ ($0,0000 < 0,05$), maka dapat disimpulkan bahwa variabel ini berpengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Secara ekonomis, setiap peningkatan pangsa konsumsi energi terbarukan sebesar 1% akan menurunkan emisi CO₂ sebesar 0,0227 metric tons per capita di wilayah penelitian.

Temuan ini selaras dengan *Energy Transition Theory*, di mana pergeseran paradigma dari penggunaan sumber energi konvensional berbasis karbon menuju energi bersih menciptakan efek substitusi yang secara sistematis menurunkan tingkat emisi. Dalam kerangka STIRPAT, energi terbarukan merepresentasikan komponen *Technology* (T) hijau yang berfungsi sebagai faktor pengurang dampak lingkungan (I). Hasil ini mendukung penelitian oleh Kongkuah and Alessa (2025) yang menemukan bahwa pemanfaatan energi terbarukan secara konsisten mampu mereduksi jejak karbon sektor energi.

Lebih lanjut, signifikansi pengaruh negatif ini memperkuat argumen Rahman et al. (2022) yang menekankan bahwa inovasi pada sektor energi bersih merupakan katalisator utama bagi negara-negara untuk melakukan pemisahan (*decoupling*) antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan. Dalam

perspektif ekonomi lingkungan, penggunaan energi terbarukan bertindak sebagai upaya internalisasi eksternalitas positif, di mana pemenuhan kebutuhan energi dilakukan tanpa menghasilkan polusi yang membebani masyarakat. Hal ini menunjukkan bahwa transisi energi merupakan strategi krusial dalam mendukung tercapainya tujuan *Sustainable Development* melalui pengurangan emisi per kapita secara berkelanjutan.

4.5.3 Pengaruh Variabel Konsumsi Energi Fosil terhadap Emisi CO₂

Berdasarkan hasil estimasi menggunakan *Random Effect Model* (REM), variabel konsumsi energi fosil (FOS) memiliki nilai koefisien sebesar 0,01779 dengan tingkat signifikansi sebesar 0,0006. Mengingat nilai probabilitas tersebut jauh lebih kecil dari taraf nyata $\alpha = 0,05$ ($0,0006 > 0,05$), maka dapat disimpulkan bahwa variabel ini berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi CO₂. Secara ekonomis, setiap peningkatan pangsa konsumsi energi fosil sebesar 1% akan meningkatkan emisi CO₂ sebesar 0,01779 metric tons per kapita di wilayah G20.

Temuan ini mengonfirmasi bahwa konsumsi energi fosil memiliki hubungan linear positif terhadap peningkatan emisi, yang dalam model STIRPAT merepresentasikan komponen *Technology* (T) konvensional bersifat insentif karbon. Hasil ini selaras dengan penelitian Dwi et al. (2023) dan Tsandra et al. (2023) yang menyatakan bahwa ketergantungan energi fosil merupakan pendorong utama degradasi lingkungan yang paling persisten, terutama di negara-negara dengan struktur ekonomi yang masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil. Dalam perspektif *Sustainable Development*, hasil regresi ini menegaskan bahwa penggunaan batu bara, minyak bumi, serta gas alam menjadi hambatan utama dalam mencapai keseimbangan ekologis karena setiap output ekonomi yang dihasilkan masih memerlukan input energi fosil yang besar yang melepaskan cadangan karbon ke atmosfer secara instan.

4.5.4 Pengaruh Variabel Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi CO₂

Berdasarkan hasil estimasi menggunakan *Random Effect Model* (REM), variabel keterbukaan perdagangan (*TRADE*) memiliki nilai koefisien -0,0008

dengan nilai probabilitas sebesar 0,1501. Karena nilai tersebut lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ ($0,1501 > 0,05$), maka dapat disimpulkan bahwa keterbukaan perdagangan tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap emisi CO₂ di wilayah G20. Secara matematis, meskipun arah koefisien menunjukkan nilai negatif, namun fluktuasi dalam aktivitas perdagangan internasional tidak memberikan dampak yang nyata atau berarti terhadap perubahan volume emisi CO₂ per kapita dalam model ini.

Temuan ini mengindikasikan melalui efek skala, efek komposisi, dan efek teknik belum mampu secara dominan menggerakkan laju emisi di negara G20. Hasil ini berbeda dengan studi Sumiyati (2025) yang menemukan adanya peningkatan emisi akibat efek skala industri manufaktur. Tidak signifikannya pengaruh ini kemungkinan disebabkan oleh adanya keseimbangan antara dampak buruk relokasi industri kotor (*Pollution Haven Hypothesis*) dengan transmisi teknologi bersih (*Pollution Halo Hypothesis*) sebagaimana argumen Rahman et al. (2022). Dalam perspektif STIRPAT dan *Environmental Economics*, hasil ini menyiratkan bahwa transmisi teknologi ramah lingkungan yang masuk melalui jalur perdagangan (efek teknik) kemungkinan besar sebanding dengan polusi yang dihasilkan dari perluasan industri (efek skala), sehingga dampak akhirnya terhadap lingkungan bersifat ambivalen dan tidak teramati secara statistik.

4.5.5 Pengaruh Variabel Urbanisasi terhadap Emisi CO₂

Berdasarkan hasil estimasi menggunakan Random Effect Model (REM), variabel urbanisasi memiliki nilai koefisien sebesar 0,0135 dengan tingkat signifikansi sebesar 0,0148. Nilai probabilitas tersebut lebih kecil dari taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ ($0,0148 > 0,05$), maka dapat disimpulkan bahwa variabel ini berpengaruh positif dan signifikan terhadap emisi karbondioksida (CO₂). Secara ekonomis, hasil ini menunjukkan bahwa setiap peningkatan tingkat urbanisasi sebesar 1% akan meningkatkan emisi CO₂ sebesar 0,01351 metric tons per kapita di wilayah G20.

Temuan ini selaras dengan kerangka model STIRPAT, di mana urbanisasi merupakan refleksi dari faktor *Population* (P) yang memicu dampak lingkungan melalui intensifikasi aktivitas ekonomi dan mobilitas. Hasil ini juga memperkuat penelitian Dwi et al. (2023) yang menyatakan bahwa perubahan gaya hidup dan pola konsumsi masyarakat perkotaan di negara G20 mendorong peningkatan permintaan energi yang signifikan. Meskipun *Ecological Modernization Theory* (EMT) memberikan harapan akan efisiensi melalui inovasi, kenyataan statistik ini membuktikan bahwa potensi positif tersebut belum optimal. Hal ini sejalan dengan pandangan Cahyo et al. (2023) bahwa tanpa dukungan infrastruktur transportasi publik yang ramah lingkungan, urbanisasi justru akan menjadi faktor yang memperparah konsentrasi karbon di atmosfer dibandingkan menjadi solusi lingkungan.

4.5.5 Pengaruh Variabel Luas Kawasan Hutan terhadap Emisi CO₂

Berdasarkan hasil estimasi model terbaik (Random Effect Model), variabel luas kawasan hutan (FOR) menunjukkan nilai koefisien sebesar 0,00847 dengan nilai probabilitas sebesar 0,2148. Mengingat nilai probabilitas tersebut lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ ($0,2148 > 0,05$), maka hasil ini mengindikasikan bahwa luas kawasan hutan tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi CO₂ di wilayah G20.

Secara teoritis, meskipun ekosistem hutan dipandang sebagai *Carbon Sink* yang berfungsi menyerap konsentrasi gas rumah kaca, hasil regresi ini membuktikan bahwa kapasitas sekuestrasi karbon alami belum mampu memberikan dampak nyata dalam menekan angka emisi per kapita secara statistik. Temuan ini berbeda dengan perspektif Fauzi R. (2017) dan Cahyo et al. (2023) yang menekankan fungsi hutan sebagai instrumen penyeimbang (*offsetting*) eksternalitas negatif. Tidak signifikannya pengaruh ini mengindikasikan bahwa daya dukung asimilasi lingkungan dari kawasan hutan masih jauh lebih kecil dibandingkan dengan masifnya emisi yang dihasilkan dari aktivitas industri (energi fosil) dan urbanisasi, sehingga penambahan luas hutan

dalam periode pengamatan belum menjadi faktor mitigasi yang cukup kuat dalam mencapai keseimbangan ekologis di negara G20.

BAB V SIMPULAN DAN IMPLIKASI

5.1 Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi emisi karbondioksida (CO₂) di negara-negara G20 dengan menggunakan pendekatan model STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology*). Berdasarkan hasil analisis data menggunakan metode Regresi Data Panel dengan model terpilih *Random Effect Model* (REM), maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Variabel GDPK dan GDPK2 secara parsial tidak berpengaruh secara signifikan terhadap emisi karbondioksida (CO₂). Hasil ini mengindikasikan bahwa hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) yang menduga adanya pola hubungan U-terbalik tidak terbukti secara statistik dalam periode penelitian ini. Hal tersebut diasumsikan karena negara-negara G20 masih berada dalam fase transisi ekonomi yang dinamis, sehingga peningkatan pendapatan belum secara otomatis menjadi determinan utama dalam penurunan emisi karbondioksida (CO₂).
2. Variabel Konsumsi Energi Terbarukan terbukti memberikan kontribusi signifikan negatif terhadap emisi karbondioksida (CO₂). Kesimpulan ini menunjukkan bahwa transisi menuju energi bersih merupakan faktor kunci yang paling efektif dalam menekan laju degradasi lingkungan di wilayah G20. Semakin tinggi proporsi energi terbarukan dalam bauran energi, maka semakin besar pula penurunan intensitas karbon yang dihasilkan.
3. Variabel Konsumsi Energi Fosil tetap menjadi kontributor utama yang meningkatkan emisi karbondioksida (CO₂) secara signifikan. Hal ini mencerminkan bahwa sektor industri dan transportasi di sebagian besar negara G20 masih sangat bergantung pada bahan bakar konvensional yang bersifat polutif, sehingga setiap peningkatan konsumsi energi fosil akan langsung memperburuk degradasi lingkungan.

4. Variabel Keterbukaan Perdagangan ditemukan tidak berpengaruh signifikan terhadap kondisi emisi karbondioksida (CO₂). Hal ini memberikan indikasi bahwa perluasan perdagangan luar negeri di negara G20 tidak serta merta merusak lingkungan, karena adanya transfer teknologi ramah lingkungan dari mitra dagang yang mampu meredam dampak negatif dari peningkatan skala produksi.
5. Variabel Urbanisasi ditemukan membawa pengaruh signifikan terhadap kenaikan emisi karbondioksida (CO₂). Realita ini menunjukkan bahwa pemusatan penduduk di wilayah perkotaan negara-negara G20 cenderung diikuti oleh pola hidup yang lebih konsumtif dan peningkatan kebutuhan mobilitas kendaraan pribadi, yang pada akhirnya memicu pelepasan karbon lebih tinggi dibandingkan manfaat efisiensi kota yang diharapkan.
6. Variabel Luas Kawasan Hutan dalam penelitian ini tidak menunjukkan pengaruh signifikan dalam mereduksi emisi karbondioksida (CO₂) secara statistik. Kondisi ini menggambarkan bahwa kapasitas hutan sebagai penyerap karbon alami (*carbon sink*) di wilayah negara G20 masih belum sebanding dengan masifnya emisi yang dilepaskan oleh sektor energi dan manufaktur ke atmosfer. Sehingga peran hutan belum terlihat dominan dalam model penelitian ini.

5.2 Implikasi

Berdasarkan temuan penelitian yang telah diuraikan, terdapat beberapa implikasi strategis yang perlu menjadi perhatian bagi pemangku kepentingan.

1. Penelitian ini menyimpulkan bahwa Hipotesis *Environmental Kuznets Curve* (EKC) tidak terbukti di negara-negara G20 pada periode 2011-2021. Hal ini ditunjukkan oleh koefisien kuadrat PDB per Kapita yang tidak signifikan dan bernilai positif, sehingga kurva hubungan antara ekonomi dan lingkungan tidak membentuk pola U-terbalik (*inverted U-shaped*).
2. Tidak terbuktinya titik balik (*turning point*) ini mengindikasikan bahwa negara G20 secara kolektif masih berada dalam fase Efek Skala (*Scale Effect*), di mana pertumbuhan ekonomi masih berjalan paralel dengan peningkatan emisi CO₂. Belum signifikannya Efek Teknik (*Technique Effect*) menunjukkan bahwa

peningkatan pendapatan di blok G20 belum mampu secara otomatis mendorong perbaikan kualitas lingkungan tanpa intervensi kebijakan struktural yang kuat.

3. Mengingat ketidakterbuktian hipotesis EKC (strategi "*grow now, clean up later*" tidak efektif), pemerintah negara G20 harus mengalihkan orientasi kebijakan dari sekadar mengejar target PDB menuju Transformasi Ekonomi Hijau. Hal ini perlu diimplementasikan melalui intervensi langsung berupa pengalihan subsidi energi fosil ke insentif fiskal energi terbarukan, penerapan pajak karbon (*carbon tax*), serta penataan ruang urban berbasis transportasi publik rendah karbon untuk memutus dependensi emisi terhadap pertumbuhan *output* ekonomi secara struktural.
4. Pengaruh signifikan energi fosil terhadap kenaikan emisi karbondioksida (CO₂) memberikan tekanan bagi pelaku industri untuk segera melakukan audit energi dan beralih ke proses produksi yang lebih efisien. Implikasinya, perusahaan di negara G20 perlu mengintegrasikan prinsip-prinsip *Environmental, Sosial and Governance* (ESG) ke dalam model bisnis mereka. Sektor swasta yang lebih cepat mengadopsi teknologi rendah karbon akan memiliki daya saing lebih tinggi di pasar global yang semakin menuntut standar produksi ramah lingkungan.
5. Temuan mengenai dampak urbanisasi mengimplikasikan perlunya perubahan pola konsumsi energi di tingkat rumah tangga masyarakat perkotaan. Urbanisasi di G20 saat ini masih berkorelasi dengan gaya hidup tinggi karbon, sehingga implikasinya adalah pentingnya edukasi mengenai efisiensi energi dan promosi penggunaan kendaraan listrik atau transportasi umum untuk menekan laju emisi harian.
6. Ketidaksignifikan variabel perdagangan internasional menunjukkan bahwa potensi transfer teknologi hijau melalui jalur ekspor-impor belum dimaksimalkan oleh negara-negara G20. Implikasinya, kerja sama multilateral harus diarahkan pada harmonisasi standar lingkungan internasional agar aktivitas perdagangan tidak hanya menjadi jalur perpindahan polusi, tetapi menjadi sarana pemerataan teknologi mitigasi perubahan iklim antar-negara.

7. Temuan bahwa luas kawasan hutan tidak berpengaruh signifikan dalam mereduksi emisi karbondioksida (CO₂) di negara G20 memberikan implikasi bahwa kapasitas serapan karbon alami (*carbon sink*) saat ini belum mampu mengimbangi masifnya laju polusi dari sektor industri dan energi. Kondia ini menuntut pemerintah dan pemangku kepentingan untuk tidak hanya fokus pada perluasan tutupan lahan secara kuantitatif, tetapi juga pada peningkatan kualitas ekosistem hutan yang memiliki densitas karbon tinggi. Implikasi praktisnya perkunya penguatan regulasi moratorium deforestasi dan restorasi lahan gambut, serta dorongan bagi sektor swasta untuk terlibat dalam investasi berbasis alam (*nature-based solutions*) guna memastikan fungsi hutan sebagai penyangga emisi dapat berjalan lebih efektif secara statistik di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, Muhammad Adi. 2024. “Analisis Pengaruh Aktivitas Ekonomi Terhadap Peningkatan Emisi Karbon: Studi Empiris Empat Negara ASEAN.” *Jurnal Ekonomi Indonesia* 12(2):187–202. doi:10.52813/jei.v12i2.379.
- Cahyo, Heru, Sodik Dwi Purnomo, Sully Kemala Octisari, Mayla Surveyandini, Sri Sundari, and Elly Kristiani Purwendah. 2023. “Environment, Population, and Economy on CO2 Emission in Indonesia.” *International Journal of Energy Economics and Policy* 13(6):295–303. doi:10.32479/ijeeep.14938.
- Climate Transparency. 2024. *G20 Climate Transparency Report 2024*. Berlin. <https://www.climate-transparency.org/g20-climate-performance>.
- Costanza, Robert, dkk. 1997. “The Value of the World’s Ecosystem Services and Natural Capital.” *Nature* 387:253–260. <https://www.nature.com/articles/387253a0>.
- Dietz, Thomas dan Rosa, Eugene A. 1997. “Effects of Population and Affluence on CO2 Emissions.” 94(1):175–79. doi:10.1073/pnas.94.1.175.
- Dwi, Izmi, Maharani Poetri, Taufiq Abdul, and Bashir Anna. 2023. “Untuk Periode 1990 – 2020.” 11(2):1939–52.
- Energy Institute. 2024. *Statistical Review of World Energy 2024*. London, United Kingdom. <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- FAO. 2024. *The State of the World’s Forests 2024*. Rome. <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/>.
- Fauzi R. 2017. “Effects of Energy Consumption , Forest Areas And.” 6(June 2016):14–27.
- Griscom, Bronson W., dkk. 2017. “Natural Climate Solutions.” *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 114(44):11645–50. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1710465114>.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. 1991. *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*. <https://www.nber.org/papers/w3914>.
- Grossman, Gene M. dan Krueger, Alan B. 1991. *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement*. Working Paper No. 3914. Cambridge, MA. <https://www.nber.org/papers/w3914>.

- Gujarati, Damodar N. 2004. *Basic Econometrics*. 4th Editio. McGraw-Hill.
- IEA. 2023. *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*. Paris, France. doi:10.1787/15926c84-en.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. *Climate Change and Land*. Cambridge University Press: Cambridge University Press.
- International Energy Agency (IEA). 2025. “Global Energy Review 2025.” <https://www.ica.org/reports/global-energy-review-2025>.
- IPCC. 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.google.com/search?q=https://www.ipcc-nggip.iges.or.id/public/2006gl/&authuser=1>.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland. doi:10.1017/9781009157896.
- Iqbal Al Qodri, Muhammad, Widyastutik, and Eisha Maghfiruha Rachbini. 2024. “Pengaruh Kompleksitas Ekonomi Terhadap Emisi Karbon Dioksida Di Negara G20: Environmental Kuznets Curve (Ekc).” *Jurnal Ekonomi Sakti* 13(2):129–41.
- IRENA. 2024. *Renewable Capacity Statistics 2024*. Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024>.
- Kongkuah, Maxwell, and Noha Alessa. 2025. “Renewable Energy and Carbon Intensity: Global Evidence from 184 Countries (2000–2020).” *Energies* 18(13):1–29. doi:10.3390/en18133236.
- Mol, Arthur P.J. dan Spaargaren, Gert. 2000. “Ecological Modernization of the Economy: Origins, Dilemmas and Future Directions.” *Environmental Politics* 9(1):33–56. doi:10.1080/09644010008414511.
- Mol, Arthur P. J. 2002. *No The Environmental Reform of Modernity: The Era of Ecological Modernization*. Cambridge University Press.
- Newman, Peter G. dan Kenworthy, Jeffrey R. 1989. *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*. Gower.
- OECD. 2024. *Environment at a Glance: G20 Indicators*. Paris, France.

<https://www.google.com/search?q=https://www.oecd.org/en/topics/g20-oecd.html>.

Our World in Data. 2024. “CO2 Emissions (Metric Tons per Capita).”

<https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita>.

Pigou, Arthur C. 1920. *The Economics of Welfare*. 1st Editio. London, United Kingdom: Macmillan and Co.

Rahman, Mohammad Mafizur, Khosrul Alam, and Eswaran Velayutham. 2022.

“Reduction of CO2 Emissions: The Role of Renewable Energy, Technological Innovation and Export Quality.” *Energy Reports* 8:2793–2805.

doi:10.1016/j.egy.2022.01.200.

Smil, Vaclav. 2010. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Santa Barbara, California: Praeger.

Sumiyati, Tatik. 2025. “Cendekia Niaga Journal of Trade Development and Studies

Revisiting The Impact of Trade Openness and FDI on CO2 Emissions:

Evidence from ASEAN-China FTA Countries.”

Tsandra, Naufaliztya Aulia, Ridwan Pandu Sunaryo, and Dian Octaviani. 2023. “The

Effect of Energy Consumption and Economic Activity on CO2 Emissions in G20 Countries.” *E-Journal Ekonomi Bisnis Dan Akuntansi* 10(2):69–79.

UN-Habitat. 2024. *World Cities Report 2024: Cities and Climate Action*. Nairobi.

<https://unhabitat.org/wcr/>.

UNCTAD. 2024. *Global Trade Update*. Geneva, Switzerland.

<https://unctad.org/publication/global-trade-update-july-2024>.

Widarjono, Agus. 2018. *Ekonometrika: Pengantar Dan Aplikasinya Disertai Panduan*

EViews. Edisi Keli. Yogyakarta: UPP STIM YKPN.

WMO. 2024. *The State of Global Climate 2023 / WMO Greenhouse Gas Bulletin (No. 20)*.

Geneva, Switzerland.

<https://www.google.com/search?q=https://wmo.int/publication-series/wmo-greenhouse-gas-bulletin>.

World Bank. 2024a. *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2024*. Washington, DC.

doi:10.1596/41588.

World Bank. 2024b. “World Development Indicators: Fossil Fuel Energy

Consumption (% of Total).”

<https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS>.

World Bank. 2024c. “World Development Indicators: GDP per Capita (Constant 2015 US\$).” <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD>.

World Bank. 2024d. “World Development Indicators: Renewable Energy Consumption (% of Total Final Energy Consumption).”

<https://data.worldbank.org/indicator/EG.FEC.RNEW.ZS>.

World Bank. 2024e. “World Development Indicators: Trade (% of GDP).”

<https://data.worldbank.org/indicator/NE.TRD.GNFS.ZS>.

World Bank. 2024f. “World Development Indicators: Urban Population (% of Total Population).” <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>.

World Commission on Environment and Development. 1987. *Our Common Future*. Oxford. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>.

World Development Indicators. 2024. “World Development Indicators: Trade (% of GDP).” <https://data.worldbank.org/indicator/NE.TRD.GNFS.ZS>.

World Development Indicators. n.d. “World Development Indicators: Forest Area (% of Land Area).” <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.FRST.ZS>.

LAMPIRAN

Lampiran I. Data Variabel

| COUNTRY | YEAR | LN CO2 | LN GDPK | LN GDPK2 | RE | FOS | TRADE | URB | FOR |
|-----------|------|------------|-------------|-------------|------|-----------|-------------|--------|---------|
| Argentina | 2011 | 1.51517646 | 9.549709759 | 91.19695648 | 9.8 | 87.749054 | 35.206155 | 90.99 | 10.9587 |
| Argentina | 2012 | 1.51449503 | 9.5291159 | 90.80404984 | 9.8 | 88.54119 | 30.52654237 | 91.121 | 10.8771 |
| Argentina | 2013 | 1.49307783 | 9.542954826 | 91.06798681 | 9.8 | 88.28383 | 29.333929 | 91.249 | 10.7954 |
| Argentina | 2014 | 1.47754616 | 9.507190186 | 90.38666523 | 9.8 | 88.18255 | 28.40679365 | 91.377 | 10.7138 |
| Argentina | 2015 | 1.48426674 | 9.523662888 | 90.7001548 | 9.8 | 87.95014 | 22.48622609 | 91.503 | 10.6322 |
| Argentina | 2016 | 1.46521055 | 9.492951061 | 90.11611986 | 9.8 | 88.33234 | 26.09388785 | 91.627 | 10.6004 |
| Argentina | 2017 | 1.44073827 | 9.511933706 | 90.47688284 | 9.8 | 88.01941 | 25.28960114 | 91.749 | 10.5598 |
| Argentina | 2018 | 1.40769603 | 9.477181412 | 89.81696751 | 9.8 | 87.432335 | 30.76253595 | 91.87 | 10.5204 |
| Argentina | 2019 | 1.38925722 | 9.44986091 | 89.29987122 | 9.8 | 86.31107 | 32.63061505 | 91.991 | 10.4802 |
| Argentina | 2020 | 1.29267638 | 9.340758852 | 87.24977592 | 9.8 | 85.28541 | 30.20369881 | 92.111 | 10.4407 |
| Argentina | 2021 | 1.43448189 | 9.437418666 | 89.06487107 | 9.2 | 86.39404 | 33.07868957 | 92.229 | 10.4009 |
| Australia | 2011 | 2.88848776 | 10.90221011 | 118.8581854 | 8.3 | 94.60804 | 41.85113203 | 85.3 | 16.9553 |
| Australia | 2012 | 2.87483276 | 10.92351552 | 119.3231912 | 8.3 | 94.60008 | 43.1642965 | 85.402 | 17.0477 |
| Australia | 2013 | 2.84036027 | 10.93250234 | 119.5196074 | 9.2 | 93.82731 | 41.27287902 | 85.502 | 17.1401 |
| Australia | 2014 | 2.81175553 | 10.94326602 | 119.7550711 | 9.3 | 94.33728 | 42.48402303 | 85.602 | 17.2324 |
| Australia | 2015 | 2.81705168 | 10.95028643 | 119.908773 | 9.4 | 94.04469 | 41.66393193 | 85.701 | 17.3248 |
| Australia | 2016 | 2.82363432 | 10.96185059 | 120.1621684 | 9.6 | 93.214905 | 40.97407948 | 85.8 | 17.4255 |
| Australia | 2017 | 2.81637532 | 10.96805641 | 120.2982613 | 9.9 | 93.62653 | 42.20373168 | 85.904 | 17.4229 |
| Australia | 2018 | 2.80409726 | 10.98143285 | 120.5918674 | 9.8 | 92.15236 | 43.73606508 | 86.012 | 17.4213 |
| Australia | 2019 | 2.79009828 | 10.98836089 | 120.744075 | 10.3 | 91.59279 | 46.18750189 | 86.124 | 17.4213 |
| Australia | 2020 | 2.73963188 | 10.9746904 | 120.4438293 | 11.2 | 89.70777 | 44.66445607 | 86.241 | 17.4213 |
| Australia | 2021 | 2.70580301 | 10.99315219 | 120.8493951 | 12.3 | 87.717415 | 40.30248027 | 86.362 | 17.4213 |
| Brazil | 2011 | 0.86091433 | 9.112506143 | 83.0377682 | 45.2 | 56.3705 | 23.93440518 | 84.631 | 61.0233 |
| Brazil | 2012 | 0.92695696 | 9.123419702 | 83.23678706 | 43.5 | 58.501488 | 25.11427361 | 84.923 | 60.8392 |
| Brazil | 2013 | 0.98515295 | 9.144920209 | 83.62956562 | 42.3 | 60.441677 | 25.78595733 | 85.209 | 60.6559 |
| Brazil | 2014 | 1.02297007 | 9.141883968 | 83.57404249 | 41.7 | 61.31813 | 24.68540581 | 85.492 | 60.4709 |

| | | | | | | | | | |
|--------|------|------------|-----------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|------------|-------------|
| Brazil | 2015 | 0.96276477 | 9.0978652 28 | 82.771151 71 | 43. 7 | 60.2168 24 | 26.953625 94 | 85.77 | 60.286 7 |
| Brazil | 2016 | 0.8836801 | 9.0569377 37 | 82.028121 16 | 45. 4 | 57.2845 15 | 24.533682 08 | 86.04 2 | 60.071 |
| Brazil | 2017 | 0.88753976 | 9.0627972 25 | 82.134293 55 | 45. 3 | 57.5512 92 | 24.319734 37 | 86.30 9 | 59.832 9 |
| Brazil | 2018 | 0.83828197 | 9.0736422 91 | 82.330984 42 | 46. 9 | 54.7308 65 | 28.876203 38 | 86.56 9 | 59.708 4 |
| Brazil | 2019 | 0.83202055 | 9.0792562 11 | 82.432893 35 | 47. 5 | 53.6775 93 | 28.890257 87 | 86.82 4 | 59.558 6 |
| Brazil | 2020 | 0.76408167 | 9.0401462 35 | 81.724243 96 | 50 | 51.8468 86 | 32.302078 54 | 87.07 3 | 59.417 5 |
| Brazil | 2021 | 0.86274454 | 9.0824193 2 | 82.490340 7 | 46. 5 | 55.2940 44 | 37.656330 76 | 87.31 7 | 59.270 5 |
| Canada | 2011 | 2.79041673 | 10.646463 45 | 113.34718 4 | 21. 5 | 66.2929 2 | 62.498738 77 | 81.09 6 | 38.734 9 |
| Canada | 2012 | 2.77796002 | 10.653030 26 | 113.48705 38 | 21. 8 | 65.8001 | 62.595548 94 | 81.13 7 | 38.730 3 |
| Canada | 2013 | 2.77946254 | 10.665488 24 | 113.75263 94 | 22. 2 | 65.5699 16 | 62.231074 9 | 81.17 8 | 38.725 7 |
| Canada | 2014 | 2.76340871 | 10.683803 58 | 114.14365 9 | 22. 2 | 66.0892 7 | 64.378662 16 | 81.21 8 | 38.721 |
| Canada | 2015 | 2.75081476 | 10.682679 26 | 114.11963 61 | 22. 3 | 65.7851 64 | 66.164902 07 | 81.25 9 | 38.716 4 |
| Canada | 2016 | 2.7233495 | 10.681695 81 | 114.09862 54 | 22. 1 | 65.0472 8 | 65.363684 52 | 81.3 | 38.712 |
| Canada | 2017 | 2.73403122 | 10.699628 7 | 114.48205 42 | 22. 8 | 64.9855 65 | 65.101060 85 | 81.35 | 38.707 9 |
| Canada | 2018 | 2.73566874 | 10.712356 62 | 114.75458 43 | 22. 3 | 66.1304 24 | 66.599885 85 | 81.41 1 | 38.703 8 |
| Canada | 2019 | 2.7294571 | 10.716643 99 | 114.84645 84 | 22. 4 | 66.3534 85 | 66.171485 28 | 81.48 2 | 38.699 6 |
| Canada | 2020 | 2.61978866 | 10.654104 47 | 113.50994 2 | 23. 9 | 64.1430 8 | 61.156770 96 | 81.56 2 | 38.695 5 |
| Canada | 2021 | 2.63742478 | 10.706367 52 | 114.62630 56 | 23. 8 | 64.9114 8 | 62.246836 72 | 81.65 3 | 39.470 1 |
| China | 2011 | 1.94574199 | 8.7444737 04 | 76.465820 36 | 11. 3 | 92.5792 1 | 49.945827 23 | 50.51 1 | 21.574 6 |
| China | 2012 | 1.9645802 | 8.8133186 83 | 77.674586 21 | 11. 5 | 91.1517 3 | 47.480213 08 | 51.76 5 | 21.780 9 |
| China | 2013 | 1.97544111 | 8.8815680 42 | 78.882250 88 | 11. 5 | 90.6791 3 | 45.916041 38 | 53.01 3 | 21.987 2 |
| China | 2014 | 1.97235565 | 8.9472309 61 | 80.052941 87 | 11. 9 | 89.3281 86 | 44.068456 48 | 54.25 9 | 22.193 5 |
| China | 2015 | 1.95458025 | 9.0088767 11 | 81.159859 59 | 12. 2 | 88.4795 1 | 38.697184 84 | 55.5 | 22.399 8 |
| China | 2016 | 1.93771731 | 9.0687050 36 | 82.241411 03 | 12. 6 | 87.3574 4 | 36.177170 69 | 56.73 6 | 22.630 5 |
| China | 2017 | 1.95732814 | 9.1292945 15 | 83.344018 35 | 13. 1 | 86.6291 96 | 36.950852 62 | 57.96 | 22.830 7 |
| China | 2018 | 1.9867176 | 9.1900001 91 | 84.456103 51 | 13. 5 | 85.8502 1 | 36.894384 39 | 59.15 2 | 23.030 9 |
| China | 2019 | 2.01837307 | 9.2453677 3 | 85.476824 47 | 14. 3 | 85.0484 9 | 35.199420 27 | 60.30 8 | 23.231 2 |
| China | 2020 | 2.03349577 | 9.2661195 8 | 85.860972 07 | 14. 9 | 84.4066 24 | 34.038950 79 | 61.42 8 | 23.431 3 |
| China | 2021 | 2.06824143 | 9.3474527 83 | 87.374873 52 | 15. 2 | 83.4958 1 | 36.520691 18 | 62.51 2 | 23.631 6 |
| France | 2011 | 1.71776034 | 10.498745 02 | 110.22364 71 | 10. 6 | 53.0300 5 | 60.605635 48 | 78.62 2 | 30.619 5 |

| | | | | | | | | | |
|---------|------|------------|-----------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|------------|-------------|
| France | 2012 | 1.72101685 | 10.495744 54 | 110.16065 34 | 12. 3 | 52.9321 9 | 61.658957 08 | 78.87 8 | 30.774 3 |
| France | 2013 | 1.7212179 | 10.498362 55 | 110.21561 63 | 13. 4 | 52.5795 75 | 61.819233 87 | 79.13 5 | 30.929 |
| France | 2014 | 1.62278524 | 10.503542 95 | 110.32441 45 | 13. 2 | 49.8615 | 62.199266 94 | 79.39 4 | 31.083 8 |
| France | 2015 | 1.63243015 | 10.510598 31 | 110.47267 68 | 13. 3 | 50.6893 7 | 63.504687 2 | 79.65 5 | 31.238 5 |
| France | 2016 | 1.63988863 | 10.516523 16 | 110.59725 94 | 14. 2 | 52.5108 07 | 63.342756 44 | 79.91 7 | 31.393 3 |
| France | 2017 | 1.64537536 | 10.534243 18 | 110.97027 95 | 14. 1 | 53.5944 7 | 65.395848 16 | 80.18 | 31.548 |
| France | 2018 | 1.59561887 | 10.546983 34 | 111.23885 76 | 15. 2 | 51.1652 22 | 66.802260 78 | 80.44 4 | 31.702 8 |
| France | 2019 | 1.57120963 | 10.563729 43 | 111.59237 94 | 15. 5 | 51.5655 36 | 66.428977 17 | 80.70 9 | 31.857 5 |
| France | 2020 | 1.45196903 | 10.483163 77 | 109.89672 26 | 16. 8 | 49.7399 86 | 58.838890 72 | 80.97 5 | 32.012 2 |
| France | 2021 | 1.53681302 | 10.546153 14 | 111.22134 61 | 16. 2 | 50.6107 7 | 63.788482 63 | 81.24 2 | 32.167 |
| Germany | 2011 | 2.29757959 | 10.614535 67 | 112.66836 76 | 12. 5 | 82.2461 | 78.407313 46 | 77.16 | 32.737 5 |
| Germany | 2012 | 2.30865821 | 10.617282 81 | 112.72669 42 | 13. 6 | 81.6809 4 | 79.300487 79 | 77.17 | 32.745 2 |
| Germany | 2013 | 2.32856419 | 10.618515 9 | 112.75288 | 13. 6 | 81.9204 3 | 77.564381 57 | 77.18 | 32.719 |
| Germany | 2014 | 2.27621658 | 10.635914 73 | 113.12268 21 | 14 | 80.4500 35 | 76.830331 27 | 77.19 | 32.722 8 |
| Germany | 2015 | 2.27797493 | 10.643750 99 | 113.28943 52 | 14. 6 | 79.4859 3 | 77.791356 76 | 77.2 | 32.732 3 |
| Germany | 2016 | 2.26614785 | 10.657657 72 | 113.58566 8 | 14. 2 | 80.3184 36 | 75.984587 51 | 77.22 4 | 32.685 5 |
| Germany | 2017 | 2.24507483 | 10.681515 27 | 114.09476 86 | 15. 2 | 79.7390 75 | 77.566636 95 | 77.26 1 | 32.684 5 |
| Germany | 2018 | 2.2084299 | 10.689802 96 | 114.27188 74 | 16 | 78.7761 8 | 79.227659 69 | 77.31 2 | 32.683 6 |
| Germany | 2019 | 2.13780514 | 10.697277 62 | 114.43174 85 | 17. 1 | 77.1878 7 | 79.133747 11 | 77.37 6 | 32.682 7 |
| Germany | 2020 | 2.04623268 | 10.654263 64 | 113.51333 37 | 18. 5 | 75.3895 9 | 72.993257 23 | 77.45 3 | 32.682 7 |
| Germany | 2021 | 2.09193986 | 10.692195 32 | 114.32304 08 | 17. 6 | 77.1396 2 | 80.156618 05 | 77.54 4 | 32.682 7 |
| India | 2011 | 0.33646088 | 7.1558728 03 | 51.206515 57 | 35 | 91.7598 7 | 55.623880 01 | 31.27 6 | 23.463 8 |
| India | 2012 | 0.41013333 | 7.1952595 35 | 51.771759 77 | 34. 8 | 92.5556 5 | 55.793721 73 | 31.63 4 | 23.553 4 |
| India | 2013 | 0.43166202 | 7.2438372 95 | 52.473178 76 | 34. 9 | 92.0556 | 53.844131 95 | 32.00 3 | 23.643 |
| India | 2014 | 0.49279743 | 7.3027096 13 | 53.329567 69 | 33. 9 | 92.0129 8 | 48.922185 75 | 32.38 4 | 23.732 6 |
| India | 2015 | 0.51912374 | 7.3677074 1 | 54.283112 48 | 33. 4 | 92.4095 4 | 41.922913 87 | 32.77 7 | 23.822 2 |
| India | 2016 | 0.55988689 | 7.4351225 42 | 55.281047 22 | 33 | 92.4731 45 | 40.082485 71 | 33.18 2 | 23.911 7 |
| India | 2017 | 0.57889643 | 7.4892430 94 | 56.088762 12 | 32. 5 | 92.1112 75 | 40.742496 95 | 33.6 | 24.001 5 |
| India | 2018 | 0.63546833 | 7.5408114 88 | 56.863837 89 | 32. 9 | 91.6159 7 | 43.616969 33 | 34.03 | 24.091 |
| India | 2019 | 0.63119427 | 7.5683951 13 | 57.280604 59 | 33. 5 | 90.6813 | 39.905403 53 | 34.47 2 | 24.180 8 |

| | | | | | | | | | |
|-----------|------|------------|-----------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|------------|-------------|
| India | 2020 | 0.54655562 | 7.4991471 63 | 56.237208 17 | 36. 1 | 89.8474 8 | 37.758105 33 | 34.92 6 | 24.270 2 |
| India | 2021 | 0.63767348 | 7.5834049 85 | 57.508031 16 | 34. 9 | 90.2040 25 | 45.423088 78 | 35.39 3 | 24.359 7 |
| Indonesia | 2011 | 0.69618421 | 7.9372406 47 | 62.999789 09 | 32. 4 | 96.4463 96 | 50.180013 18 | 50.59 5 | 52.586 9 |
| Indonesia | 2012 | 0.71346291 | 7.9829346 3 | 63.727245 31 | 30. 1 | 96.4233 1 | 49.582898 3 | 51.27 6 | 52.093 6 |
| Indonesia | 2013 | 0.65679041 | 8.0246142 33 | 64.394433 6 | 30. 6 | 95.4662 3 | 48.637372 68 | 51.95 5 | 51.600 2 |
| Indonesia | 2014 | 0.65430333 | 8.0617142 95 | 64.991237 38 | 29. 3 | 95.2923 7 | 48.080175 59 | 52.63 5 | 51.106 9 |
| Indonesia | 2015 | 0.74444729 | 8.0981024 84 | 65.579263 84 | 26. 6 | 95.9969 1 | 41.937640 24 | 53.31 3 | 50.613 5 |
| Indonesia | 2016 | 0.72789565 | 8.1364626 61 | 66.202024 64 | 27. 8 | 94.1902 4 | 37.421341 8 | 53.98 9 | 50.743 5 |
| Indonesia | 2017 | 0.75871729 | 8.1756939 38 | 66.841971 37 | 25. 2 | 94.4822 7 | 39.355497 07 | 54.65 9 | 50.039 3 |
| Indonesia | 2018 | 0.81090844 | 8.2164452 12 | 67.509971 92 | 22 | 91.9709 55 | 43.074308 96 | 55.32 5 | 49.716 8 |
| Indonesia | 2019 | 0.89226153 | 8.2560630 02 | 68.162576 29 | 19. 8 | 91.3870 7 | 37.627777 54 | 55.98 5 | 49.394 3 |
| Indonesia | 2020 | 0.81893674 | 8.2266935 71 | 67.678487 11 | 21. 9 | 89.3564 7 | 32.972175 4 | 56.64 1 | 49.071 8 |
| Indonesia | 2021 | 0.82724153 | 8.2560073 13 | 68.161656 76 | 20. 2 | 88.9239 5 | 40.204758 27 | 57.29 | 48.361 9 |
| Italy | 2011 | 1.94903359 | 10.374724 9 | 107.63491 67 | 11. 9 | 88.0875 9 | 54.472214 94 | 68.44 4 | 30.711 2 |
| Italy | 2012 | 1.8968722 | 10.340238 6 | 106.92053 44 | 14. 4 | 86.5009 2 | 54.884495 27 | 68.68 4 | 30.893 1 |
| Italy | 2013 | 1.80686059 | 10.319893 33 | 106.50019 84 | 16. 3 | 83.0401 9 | 54.034184 63 | 68.97 9 | 31.075 1 |
| Italy | 2014 | 1.75083254 | 10.319728 68 | 106.49680 01 | 17. 1 | 81.4832 6 | 54.454529 93 | 69.27 2 | 31.257 |
| Italy | 2015 | 1.7856654 | 10.330057 8 | 106.71009 42 | 16. 6 | 83.3400 65 | 55.435685 81 | 69.56 5 | 31.439 |
| Italy | 2016 | 1.77862349 | 10.344245 13 | 107.00340 74 | 16. 1 | 83.5881 1 | 54.432146 7 | 69.85 5 | 31.621 |
| Italy | 2017 | 1.76469335 | 10.362035 91 | 107.37178 81 | 16. 4 | 84.3252 8 | 57.582994 03 | 70.14 4 | 31.802 9 |
| Italy | 2018 | 1.75625163 | 10.367831 36 | 107.49192 7 | 17. 1 | 82.9407 7 | 59.274983 51 | 70.43 8 | 31.984 9 |
| Italy | 2019 | 1.73136908 | 10.379113 91 | 107.72600 56 | 17. 3 | 82.5877 5 | 58.694190 26 | 70.73 6 | 32.167 |
| Italy | 2020 | 1.61952255 | 10.291121 25 | 105.90717 66 | 18. 7 | 80.6005 86 | 53.939483 9 | 71.03 9 | 32.348 9 |
| Italy | 2021 | 1.72708056 | 10.381822 29 | 107.78223 41 | 17. 5 | 81.9860 5 | 60.301977 62 | 71.34 6 | 32.530 9 |
| Japan | 2011 | 2.28702008 | 10.404600 18 | 108.25570 5 | 4.8 | 87.0756 2 | 30.194960 73 | 91.06 9 | 68.481 8 |
| Japan | 2012 | 2.32027343 | 10.419851 16 | 108.57329 82 | 4.7 | 93.7927 55 | 30.470910 92 | 91.14 8 | 68.469 7 |
| Japan | 2013 | 2.32934425 | 10.441146 51 | 109.01754 04 | 5 | 93.4992 | 33.978768 65 | 91.22 6 | 68.457 6 |
| Japan | 2014 | 2.29107197 | 10.445431 13 | 109.10703 14 | 5.6 | 93.3955 1 | 37.431434 57 | 91.30 4 | 68.445 5 |
| Japan | 2015 | 2.26023485 | 10.461978 12 | 109.45298 62 | 6.2 | 92.1003 7 | 35.427408 35 | 91.38 1 | 68.433 5 |
| Japan | 2016 | 2.24457519 | 10.469999 49 | 109.62088 93 | 6.4 | 91.5647 3 | 31.310246 85 | 91.45 7 | 68.422 5 |

| | | | | | | | | | |
|--------------|------|------------|-------------|-------------|------|-----------|-------------|--------|---------|
| Japan | 2017 | 2.23228826 | 10.48743276 | 109.9862459 | 6.9 | 90.60785 | 34.42321357 | 91.535 | 68.4088 |
| Japan | 2018 | 2.1940054 | 10.49511486 | 110.147436 | 7.3 | 89.04158 | 36.6099318 | 91.616 | 68.4088 |
| Japan | 2019 | 2.16312163 | 10.49248971 | 110.0923404 | 7.8 | 87.99147 | 35.21641811 | 91.698 | 68.4088 |
| Japan | 2020 | 2.10566579 | 10.45285015 | 109.2620763 | 8.5 | 87.32939 | 31.33520864 | 91.782 | 68.4088 |
| Japan | 2021 | 2.13087606 | 10.48405825 | 109.9154773 | 8.8 | 86.16989 | 36.73844623 | 91.867 | 68.4088 |
| Mexico | 2011 | 1.4335936 | 9.167008394 | 84.0340429 | 9.1 | 93.21927 | 62.16238727 | 78.111 | 34.3737 |
| Mexico | 2012 | 1.45696925 | 9.18835217 | 84.4258156 | 9 | 93.79669 | 64.2579319 | 78.405 | 34.3107 |
| Mexico | 2013 | 1.43179684 | 9.18386406 | 84.34335808 | 9.2 | 93.81856 | 62.69167477 | 78.699 | 34.2477 |
| Mexico | 2014 | 1.39648451 | 9.196493064 | 84.57548468 | 9.8 | 92.4674 | 64.09840903 | 78.993 | 34.1847 |
| Mexico | 2015 | 1.37621771 | 9.212461981 | 84.86945575 | 9.2 | 92.807106 | 70.41297467 | 79.285 | 34.1217 |
| Mexico | 2016 | 1.36526179 | 9.220340417 | 85.0146774 | 9.2 | 93.10026 | 75.69030341 | 79.577 | 34.0567 |
| Mexico | 2017 | 1.32532897 | 9.229532295 | 85.18426639 | 10.1 | 93.05998 | 76.95212604 | 79.867 | 33.9903 |
| Mexico | 2018 | 1.32446896 | 9.239595156 | 85.37011865 | 10.3 | 92.17794 | 80.21266166 | 80.156 | 33.9247 |
| Mexico | 2019 | 1.31457309 | 9.226159078 | 85.12201132 | 10.3 | 92.130424 | 77.46197226 | 80.444 | 33.8589 |
| Mexico | 2020 | 1.21870613 | 9.130717302 | 83.36999845 | 12.3 | 89.99393 | 76.8545557 | 80.731 | 33.7931 |
| Mexico | 2021 | 1.25291753 | 9.182769443 | 84.32325464 | 13 | 89.120514 | 83.06929763 | 81.016 | 33.7272 |
| Russia | 2011 | 2.45939728 | 9.118315026 | 83.14366891 | 3.2 | 89.15644 | 48.03539941 | 73.732 | 49.7711 |
| Russia | 2012 | 2.46661249 | 9.155251541 | 83.81863077 | 3.2 | 89.119896 | 47.15139039 | 73.791 | 49.7686 |
| Russia | 2013 | 2.42695501 | 9.16967848 | 84.08300343 | 3.6 | 88.66365 | 46.2871494 | 73.863 | 49.7661 |
| Russia | 2014 | 2.42458987 | 9.15839555 | 83.87620904 | 3.3 | 88.73328 | 47.80134126 | 73.952 | 49.7636 |
| Russia | 2015 | 2.42069403 | 9.135370445 | 83.45499317 | 3.2 | 88.308014 | 49.35934931 | 74.05 | 49.7611 |
| Russia | 2016 | 2.41383367 | 9.134465229 | 83.43845503 | 3.4 | 88.05194 | 46.51811984 | 74.164 | 49.7727 |
| Russia | 2017 | 2.43029725 | 9.150475081 | 83.73119421 | 3.2 | 87.95743 | 46.87652434 | 74.292 | 49.7844 |
| Russia | 2018 | 2.4576473 | 9.177278513 | 84.22244091 | 3.2 | 88.22665 | 51.58090037 | 74.433 | 49.7844 |
| Russia | 2019 | 2.45375175 | 9.19847267 | 84.61189946 | 3.2 | 87.93292 | 49.22875366 | 74.587 | 49.7844 |
| Russia | 2020 | 2.41135474 | 9.172879929 | 84.14172619 | 3.7 | 86.682976 | 45.9669082 | 74.754 | 49.7844 |
| Russia | 2021 | 2.44080054 | 9.233208723 | 85.25214331 | 3.5 | 86.8038 | 50.58619546 | 74.934 | 49.7844 |
| Saudi Arabia | 2011 | 3.02985458 | 8.048183663 | 64.77326028 | 0 | 99.99945 | 84.35943424 | 82.302 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2012 | 3.10825796 | 8.082685254 | 65.32980091 | 0 | 99.99757 | 81.74067855 | 82.52 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2013 | 3.03533022 | 8.104592043 | 65.68441218 | 0 | 99.996025 | 80.25150143 | 82.74 | 0.45448 |

| | | | | | | | | | |
|--------------|------|------------|-------------|-------------|-----|-----------|-------------|--------|---------|
| Saudi Arabia | 2014 | 3.00456708 | 8.079571357 | 65.27947331 | 0 | 99.99602 | 78.00011112 | 82.96 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2015 | 3.03666479 | 8.093203862 | 65.49994874 | 0 | 99.9962 | 67.10526923 | 83.18 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2016 | 3.03845881 | 8.155677704 | 66.51507881 | 0 | 99.996376 | 57.92166351 | 83.401 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2017 | 3.04151086 | 8.149884729 | 66.42062109 | 0 | 99.994514 | 59.53197916 | 83.622 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2018 | 3.06706314 | 8.136750712 | 66.20671215 | 0 | 99.986824 | 59.10291047 | 83.844 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2019 | 3.14608197 | 8.125167751 | 66.01835099 | 0 | 99.98228 | 56.79382049 | 84.065 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2020 | 3.04873806 | 7.980183747 | 63.68333264 | 0.1 | 99.92164 | 47.53315923 | 84.287 | 0.45448 |
| Saudi Arabia | 2021 | 3.09995512 | 8.023383987 | 64.3746906 | 0.1 | 99.917404 | 50.88392634 | 84.508 | 0.45448 |
| South Africa | 2011 | 2.19158102 | 8.401874509 | 70.59149527 | 9 | 96.99488 | 54.63635044 | 62.746 | 14.3251 |
| South Africa | 2012 | 2.14939906 | 8.444057401 | 71.30210539 | 8.3 | 97.29404 | 55.58261719 | 63.272 | 14.2951 |
| South Africa | 2013 | 2.1214291 | 8.445345799 | 71.32386567 | 7.8 | 97.07915 | 58.87502763 | 63.793 | 14.2651 |
| South Africa | 2014 | 2.15910218 | 8.39425868 | 70.46357878 | 7.6 | 96.763504 | 59.49957406 | 64.312 | 14.2351 |
| South Africa | 2015 | 2.08752912 | 8.319507447 | 69.21420417 | 7.6 | 96.51828 | 56.72667614 | 64.828 | 14.2051 |
| South Africa | 2016 | 2.07719783 | 8.126439768 | 66.0390233 | 7.8 | 95.963066 | 55.8612575 | 65.341 | 14.1751 |
| South Africa | 2017 | 2.03266533 | 7.962525501 | 63.40181235 | 7.9 | 95.43011 | 53.53593183 | 65.85 | 14.1451 |
| South Africa | 2018 | 2.04662509 | 7.76878393 | 60.35400376 | 8 | 95.66317 | 54.48554513 | 66.355 | 14.1151 |
| South Africa | 2019 | 2.06682706 | 7.474623191 | 55.86999185 | 8.7 | 95.527054 | 53.89799641 | 66.856 | 14.0851 |
| South Africa | 2020 | 1.97235628 | 7.135187725 | 50.91090386 | 9.8 | 95.66731 | 50.75965908 | 67.354 | 14.0551 |
| South Africa | 2021 | 1.96647719 | 7.151974227 | 51.15073535 | 9.7 | 94.58261 | 56.03471384 | 67.847 | 14.0251 |
| South Korea | 2011 | 2.54083524 | 10.21805941 | 104.4087381 | 1.4 | 86.72504 | 105.5663136 | 81.923 | 65.6137 |
| South Korea | 2012 | 2.53846708 | 10.23795981 | 104.815821 | 1.6 | 87.202614 | 105.4583277 | 81.851 | 65.4301 |
| South Korea | 2013 | 2.53951904 | 10.26579151 | 105.3864754 | 1.9 | 88.02235 | 97.95210495 | 81.779 | 65.2495 |
| South Korea | 2014 | 2.52196734 | 10.29115092 | 105.9077873 | 2.9 | 86.52979 | 90.6144419 | 81.707 | 65.1442 |
| South Korea | 2015 | 2.52081845 | 10.31466268 | 106.3922663 | 2.7 | 85.947235 | 79.13249439 | 81.634 | 65.0316 |
| South Korea | 2016 | 2.52055496 | 10.3419169 | 106.9552451 | 2.6 | 86.47476 | 73.60380947 | 81.562 | 64.8791 |
| South Korea | 2017 | 2.54261345 | 10.37286294 | 107.5962857 | 2.8 | 87.331406 | 77.12091781 | 81.503 | 64.7831 |
| South Korea | 2018 | 2.56321562 | 10.39979496 | 108.1557352 | 3.2 | 88.26761 | 78.98886551 | 81.459 | 64.6739 |
| South Korea | 2019 | 2.5241885 | 10.4191906 | 108.5595328 | 3.2 | 86.885864 | 75.75713897 | 81.43 | 64.5184 |
| South Korea | 2020 | 2.44446054 | 10.41078486 | 108.3844413 | 3.6 | 84.819756 | 69.03404509 | 81.414 | 64.4164 |
| South Korea | 2021 | 2.4750446 | 10.45716976 | 109.3523995 | 3.6 | 85.18961 | 80.19945693 | 81.414 | 64.3135 |

| | | | | | | | | | |
|----------------|------|------------|-----------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|------------|-------------|
| Turkey | 2011 | 1.53429691 | 8.3847467 95 | 70.303978 81 | 12. 7 | 88.6076 7 | 53.304175 64 | 71.40 2 | 27.536 |
| Turkey | 2012 | 1.56221799 | 8.4682296 6 | 71.710913 58 | 13 | 87.9688 9 | 52.830802 66 | 71.97 4 | 27.678 2 |
| Turkey | 2013 | 1.52371934 | 8.5430884 69 | 72.984360 58 | 13. 8 | 86.9667 36 | 52.527298 8 | 72.53 1 | 27.820 4 |
| Turkey | 2014 | 1.54892955 | 8.6184918 21 | 74.278401 26 | 11. 5 | 90.4991 9 | 53.766301 17 | 73.07 7 | 27.962 6 |
| Turkey | 2015 | 1.57803754 | 8.6586055 8 | 74.971450 6 | 13. 3 | 86.3270 34 | 51.088543 6 | 73.61 1 | 28.104 8 |
| Turkey | 2016 | 1.60278233 | 8.6958142 9 | 75.617186 17 | 13. 2 | 86.0140 7 | 48.328186 23 | 74.13 4 | 28.104 8 |
| Turkey | 2017 | 1.64538172 | 8.7359360 19 | 76.316578 12 | 11. 4 | 87.3684 | 55.762168 75 | 74.64 4 | 28.263 5 |
| Turkey | 2018 | 1.61354825 | 8.7735306 49 | 76.974840 05 | 11. 8 | 85.8701 7 | 62.614218 54 | 75.14 3 | 28.466 1 |
| Turkey | 2019 | 1.56090025 | 8.8125704 92 | 77.661398 67 | 14. 1 | 81.6163 | 63.193292 9 | 75.63 | 28.668 8 |
| Turkey | 2020 | 1.57606072 | 8.8486690 05 | 78.298943 16 | 13. 7 | 81.8973 85 | 61.343755 77 | 76.10 5 | 28.871 5 |
| Turkey | 2021 | 1.66321325 | 8.8885784 74 | 79.006827 29 | 12 | 84.3037 6 | 71.082443 96 | 76.56 9 | 29.074 2 |
| United Kingdom | 2011 | 2.00093641 | 10.664085 26 | 113.72271 45 | 4 | 88.0413 3 | 63.565400 97 | 81.57 | 12.723 5 |
| United Kingdom | 2012 | 2.03097714 | 10.672129 44 | 113.89434 67 | 4.2 | 87.4619 9 | 62.225982 73 | 81.83 7 | 12.802 9 |
| United Kingdom | 2013 | 2.00384832 | 10.682472 78 | 114.11522 46 | 5.2 | 85.7485 | 61.999111 91 | 82.10 2 | 12.882 2 |
| United Kingdom | 2014 | 1.91173758 | 10.706114 1 | 114.62087 9 | 6.6 | 84.2652 05 | 59.094804 12 | 82.36 5 | 12.961 6 |
| United Kingdom | 2015 | 1.86584802 | 10.720076 06 | 114.92003 08 | 7.7 | 81.5761 | 57.203549 69 | 82.62 6 | 13.041 |
| United Kingdom | 2016 | 1.80200118 | 10.733959 15 | 115.21787 91 | 7.7 | 81.2672 65 | 59.700398 41 | 82.88 6 | 13.057 5 |
| United Kingdom | 2017 | 1.76436177 | 10.758286 33 | 115.74072 47 | 8.8 | 79.6895 2 | 63.121650 03 | 83.14 3 | 13.078 2 |
| United Kingdom | 2018 | 1.73846846 | 10.768796 02 | 115.96696 78 | 10. 2 | 78.7583 7 | 64.542648 25 | 83.39 8 | 13.115 4 |
| United Kingdom | 2019 | 1.69287382 | 10.776134 79 | 116.12508 1 | 11. 4 | 77.9192 7 | 64.665133 64 | 83.65 2 | 13.152 6 |
| United Kingdom | 2020 | 1.57777386 | 10.668547 48 | 113.81790 53 | 13. 6 | 74.6116 6 | 58.781137 6 | 83.90 3 | 13.185 6 |
| United Kingdom | 2021 | 1.62125403 | 10.746935 35 | 115.49661 94 | 12. 2 | 76.7635 8 | 58.584536 62 | 84.15 2 | 13.221 5 |
| United States | 2011 | 2.86983691 | 9.7839441 14 | 95.725562 42 | 8.4 | 84.9336 2 | 30.842478 58 | 80.94 4 | 33.779 5 |
| United States | 2012 | 2.82211617 | 9.8435075 54 | 96.894640 97 | 8.5 | 84.9784 1 | 30.681839 58 | 81.11 9 | 33.809 5 |
| United States | 2013 | 2.83899483 | 9.8726260 71 | 97.468745 54 | 8.9 | 84.8178 4 | 29.941306 28 | 81.29 9 | 33.839 6 |
| United States | 2014 | 2.84018411 | 9.9051132 4 | 98.111268 31 | 9 | 84.7338 | 29.906569 34 | 81.48 3 | 33.869 7 |
| United States | 2015 | 2.80101782 | 9.8978332 36 | 97.967102 76 | 8.9 | 84.4923 1 | 27.688213 93 | 81.67 1 | 33.899 7 |
| United States | 2016 | 2.76849649 | 9.8163507 75 | 96.360742 53 | 9.3 | 83.6808 8 | 26.452597 79 | 81.86 2 | 33.899 7 |
| United States | 2017 | 2.74978109 | 9.7643757 92 | 95.343034 61 | 9.7 | 82.9966 6 | 27.125338 22 | 82.05 8 | 33.866 9 |
| United States | 2018 | 2.77265072 | 9.7529910 71 | 95.120834 83 | 9.9 | 83.4234 16 | 27.445359 13 | 82.25 6 | 33.866 9 |

| | | | | | | | | | |
|---------------|------|------------|-------------|-------------|------|-----------|-------------|--------|---------|
| United States | 2019 | 2.74087177 | 9.75413809 | 95.14320989 | 10.2 | 83.05304 | 26.25848062 | 82.459 | 33.8669 |
| United States | 2020 | 2.62589215 | 9.660138816 | 93.31828195 | 11 | 81.48905 | 23.07977787 | 82.664 | 33.8669 |
| United States | 2021 | 2.69178693 | 9.6523363 | 93.16759605 | 10.9 | 82.049805 | 25.21365603 | 82.873 | 33.8669 |

Lampiran III. Uji Chow

Redundant Fixed Effects Tests

Equation: Untitled

Test cross-section fixed effects

| Effects Test | Statistic | d.f. | Prob. |
|--------------------------|-------------|----------|--------|
| Cross-section F | 1595.916302 | (18,183) | 0.0000 |
| Cross-section Chi-square | 1058.049784 | 18 | 0.0000 |

Cross-section fixed effects test equation:

Dependent Variable: LNCO2

Method: Panel Least Squares

Date: 03/02/26 Time: 23:16

Sample: 2011 2021

Periods included: 11

Cross-sections included: 19

Total panel (balanced) observations: 209

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|----------|
| C | 10.76213 | 3.378598 | 3.185383 | 0.0017 |
| LNGDPK | -2.042812 | 0.693243 | -2.946745 | 0.0036 |
| LNGDPK2 | 0.115348 | 0.036301 | 3.177572 | 0.0017 |
| RE | -0.040581 | 0.005123 | -7.921962 | 0.0000 |
| FOS | -0.001818 | 0.004116 | -0.441647 | 0.6592 |
| TRADE | -0.001609 | 0.002112 | -0.761622 | 0.4472 |
| URB | 0.011029 | 0.003476 | 3.172543 | 0.0017 |
| FOR | 0.000151 | 0.001970 | 0.076499 | 0.9391 |
| R-squared | 0.600974 | Mean dependent var | | 1.928036 |
| Adjusted R-squared | 0.587077 | S.D. dependent var | | 0.710987 |
| S.E. of regression | 0.456873 | Akaike info criterion | | 1.308705 |
| Sum squared resid | 41.95540 | Schwarz criterion | | 1.436641 |
| Log likelihood | -128.7597 | Hannan-Quinn criter. | | 1.360430 |
| F-statistic | 43.24657 | Durbin-Watson stat | | 0.008138 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | | |

Lampiran IV. Uji Hausman

Correlated Random Effects - Hausman Test

Equation: UJI_CHOW

Test cross-section random effects

| Test Summary | Chi-Sq. Statistic | Chi-Sq. d.f. | Prob. |
|----------------------|-------------------|--------------|--------|
| Cross-section random | 5.951716 | 7 | 0.5454 |

Cross-section random effects test comparisons:

| Variable | Fixed | Random | Var(Diff.) | Prob. |
|----------|-----------|-----------|------------|--------|
| LNGDPK | 0.087893 | 0.068376 | 0.004882 | 0.7800 |
| LNGDPK2 | 0.003603 | 0.005406 | 0.000019 | 0.6816 |
| RE | -0.024835 | -0.022690 | 0.000002 | 0.0942 |
| FOS | 0.016296 | 0.017792 | 0.000001 | 0.1433 |
| TRADE | -0.000888 | -0.000755 | 0.000000 | 0.0712 |
| URB | 0.012040 | 0.013509 | 0.000002 | 0.2393 |
| FOR | 0.020602 | 0.008472 | 0.000040 | 0.0543 |

Lampiran V. Hasil Estimasi Random Effect Model (REM)

Dependent Variable: LNCO2

Method: Panel EGLS (Cross-section random effects)

Date: 03/02/26 Time: 23:31

Sample: 2011 2021

Periods included: 11

Cross-sections included: 19

Total panel (balanced) observations: 209

Swamy and Arora estimator of component variances

White cross-section (period cluster) standard errors & covariance (d.f. corrected)

Standard error and t-statistic probabilities adjusted for clustering

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|----------|-------------|------------|-------------|--------|
| C | -1.648598 | 1.513224 | -1.089461 | 0.3015 |
| LNGDPK | 0.068376 | 0.387828 | 0.176304 | 0.8636 |
| LNGDPK2 | 0.005406 | 0.023948 | 0.225754 | 0.8259 |
| RE | -0.022690 | 0.001902 | -11.92795 | 0.0000 |
| FOS | 0.017792 | 0.003615 | 4.921502 | 0.0006 |
| TRADE | -0.000755 | 0.000484 | -1.558723 | 0.1501 |
| URB | 0.013509 | 0.004595 | 2.939833 | 0.0148 |
| FOR | 0.008472 | 0.006397 | 1.324498 | 0.2148 |

Effects Specification

| | S.D. | Rho |
|----------------------|----------|--------|
| Cross-section random | 0.580782 | 0.9957 |
| Idiosyncratic random | 0.038096 | 0.0043 |

Weighted Statistics

| | | | |
|--------------------|----------|--------------------|----------|
| R-squared | 0.741291 | Mean dependent var | 0.038124 |
| Adjusted R-squared | 0.732282 | S.D. dependent var | 0.073434 |
| S.E. of regression | 0.037996 | Sum squared resid | 0.290183 |
| F-statistic | 82.27653 | Durbin-Watson stat | 0.791860 |
| Prob(F-statistic) | 0.000000 | | |

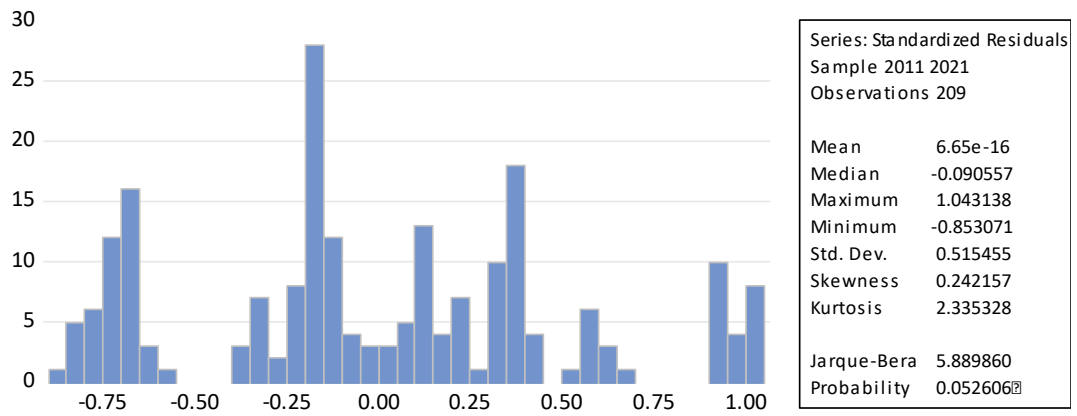
Unweighted Statistics

| | | | |
|-------------------|----------|--------------------|----------|
| R-squared | 0.474395 | Mean dependent var | 1.928036 |
| Sum squared resid | 55.26438 | Durbin-Watson stat | 0.004158 |

Lampiran VI. Uji Multikolinieritas

| | LNGDPK | LNGDPK2 | RE | FOS | TRADE | URB | FOR |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| LNGDPK | 1.000000 | 0.998577 | -0.244352 | -0.427849 | 0.186217 | 0.633447 | 0.210958 |
| LNGD... | 0.998577 | 1.000000 | -0.236388 | -0.422077 | 0.197170 | 0.614867 | 0.198087 |
| RE | -0.244352 | -0.236388 | 1.000000 | -0.479999 | -0.312559 | -0.386971 | 0.252637 |
| FOS | -0.427849 | -0.422077 | -0.479999 | 1.000000 | 0.003399 | -0.267451 | -0.287227 |
| TRADE | 0.186217 | 0.197170 | -0.312559 | 0.003399 | 1.000000 | 0.014367 | -0.053996 |
| URB | 0.633447 | 0.614867 | -0.386971 | -0.267451 | 0.014367 | 1.000000 | 0.110532 |
| FOR | 0.210958 | 0.198087 | 0.252637 | -0.287227 | -0.053996 | 0.110532 | 1.000000 |

Lampiran VII. Uji Normalitas



Lampiran VIII. Uji Kointegrasi

Kao Residual Cointegration Test
 Series: LNCO2 LNGDPK LNGDPK2 RE FOS TRADE URB FOR
 Date: 03/02/26 Time: 16:08
 Sample: 2011 2021
 Included observations: 209
 Null Hypothesis: No cointegration
 Trend assumption: No deterministic trend
 User-specified lag length: 1
 Newey-West automatic bandwidth selection and Bartlett kernel

| | t-Statistic | Prob. |
|-------------------|-------------|--------|
| ADF | -2.944110 | 0.0016 |
| Residual variance | 0.000910 | |
| HAC variance | 0.000787 | |

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
 Dependent Variable: D(RESID)
 Method: Least Squares
 Date: 03/02/26 Time: 16:08
 Sample (adjusted): 2013 2021
 Included observations: 171 after adjustments

| Variable | Coefficient | Std. Error | t-Statistic | Prob. |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------|
| RESID(-1) | -0.455241 | 0.076302 | -5.966322 | 0.0000 |
| D(RESID(-1)) | 0.015556 | 0.079019 | 0.196861 | 0.8442 |
| R-squared | 0.212351 | Mean dependent var | | -0.001801 |
| Adjusted R-squared | 0.207690 | S.D. dependent var | | 0.032204 |
| S.E. of regression | 0.028666 | Akaike info criterion | | -4.254617 |
| Sum squared resid | 0.138869 | Schwarz criterion | | -4.217873 |
| Log likelihood | 365.7698 | Hannan-Quinn criter. | | -4.239708 |
| Durbin-Watson stat | 2.019343 | | | |