



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERAN MODAL MANUSIA DAN ENERGI TERBARUKAN DALAM TRANSISI MENUJU PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN DI KAWASAN ASIA

SEBA OCTAVIA



**DEPARTEMEN ILMU EKONOMI
FAKULTAS EKONOMI DAN MANAJEMEN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Peran Modal Manusia dan Energi Terbarukan dalam Transisi Menuju Pembangunan Berkelanjutan di Kawasan Asia” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Seba Octavia
H1401221065

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



ABSTRAK

SEBA OCTAVIA. Peran Modal Manusia dan Energi Terbarukan dalam Transisi Menuju Pembangunan Berkelanjutan di Kawasan Asia. Dibimbing oleh EISHA MAGHFIRUHA RACHBINI.

World Meteorological Organization melaporkan suhu rata-rata global terus meningkat mencapai 1.4°C sebagai akibat dari peningkatan emisi karbon. Asia merupakan kawasan yang menjadi emitor tertinggi emisi karbon di dunia, di tahun 2021, 58 persen dari total emisi di dunia berasal dari kawasan Asia. Modal manusia dan penggunaan energi terbarukan diduga mampu menekan emisi karbon dan mendorong pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis gambaran dan pengaruh modal manusia, energi terbarukan, dan GDP per kapita terhadap emisi karbon di 14 negara Asia dengan periode analisis 2010-2021 dengan metode analisis berupa analisis deskriptif, tipologi klassen, dan regresi data panel menggunakan *Fixed Effect Model* (FEM). Hasil dari temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas modal manusia pada tahap awal akan meningkatkan emisi, namun setelah mencapai ambang batas tertentu efek penurunannya baru terlihat. Penggunaan energi terbarukan terbukti mampu menekan emisi karbon dan GDP per kapita berpengaruh positif terhadap emisi karbon.

Kata kunci: Asia, emisi karbon, energi terbarukan, indeks modal manusia, tenaga kerja terampil

ABSTRACT

SEBA OCTAVIA. The Role of Human Capital and Renewable Energy in the Transition Towards Sustainable Development in the Asian Region. Supervised by EISHA MAGHFIRUHA RACHBINI.

The World Meteorological Organization reported that the global average temperature continues to rise, reaching 1.4°C , as a result of increasing carbon emissions. Asia is the region with the highest carbon emitter in the world in 2021, 58 percent of total global emissions originated from the Asian region. Human capital and renewable energy capable to reducing carbon emissions and fostering sustainable development. This study aims to analyze the pattern and influence of human capital, renewable energy, and GDP per capita on carbon emissions in 14 Asian economies over the 2010–2021 period, employing descriptive analysis, Klassen typology, and panel data regression. The findings indicate that human capital capacity increases emissions in the early stages, with the reducing effect only becoming apparent after a certain threshold is reached. Renewable energy use is found to significantly reduce carbon emissions, while GDP per capita has a positive effect on emissions.

Keywords: Asian economies, carbon emission, high skill labour, human capital index, renewable energy



PERAN MODAL MANUSIA DAN ENERGI TERBARUKAN DALAM TRANSISI MENUJU PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN DI KAWASAN ASIA

SEBA OCTAVIA

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Ekonomi Pembangunan

**DEPARTEMEN ILMU EKONOMI
FAKULTAS EKONOMI DAN MANAJEMEN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:

- 1 Dr.Ir. Iman Sugema, M.Ec
- 2 Syarifah Amalia, SE, M.App, Ec





@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Judul Skripsi : Peran Modal Manusia dan Energi Terbarukan dalam Transisi Menuju Pembangunan Berkelanjutan di Kawasan Asia

Nama : Seba Octavia
NIM : H1401221065

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Eisha Maghfiruha Rachbini S.E., M.Sc



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Tony Irawan, S.E., M.App.Ec.
NIP. 198203062005011001



Tanggal Ujian:
3 Agustus 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “Peran Modal Manusia dan Energi Terbarukan dalam Transisi Menuju Pembangunan Berkelanjutan di Kawasan Asia” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Ekonomi di Fakultas Ekonomi dan Manajemen, IPB University. Proses penyusunan karya ilmiah ini tentunya dengan arahan, dukungan, motivasi, dan saran dari berbagai pihak. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Eisha Maghfiruha Rachbini, S.E., M.Sc.. selaku dosen pembimbing yang telah menuntun, mengarahkan, memotivasi, serta memberikan berbagai ilmu baru hingga skripsi ini dapat diselesaikan.
2. Bapak Dr.Ir. Iman Sugema, M.Ec selaku dosen penguji dan Ibu Syarifah Amalia, SE, M.App, Ec selaku dosen penguji komdik atas arahan dan masukan yang diberikan untuk.
3. Kedua orang tua penulis, Mama dan Papa, kedua kakak penulis, adik penulis, dan kedua ponakan penulis atas limpahan kasih sayang, doa, serta dukungan moril dan materil yang senantiasa mengiringi setiap langkah penulis.
4. Seluruh dosen, staff pengajar, dan tenaga kependidikan Departemen Ilmu Ekonomi FEM IPB yang telah mendidik dan membuat penulis bersyukur untuk dapat berkuliah di Program Studi Ekonomi Pembangunan IPB.
5. Rizqa, Rahma, Ali, Vinda, dan Rayyan selaku teman-teman satu bimbingan atas segala waktu, ide, dan dedikasinya selama penyusunan skripsi serta kebersamaan selama tingkat akhir.
6. Alif, Dena, Upi, Selvi, Wafi, dan Nana selaku teman-teman yang telah kebersamaan penulis selama masa perkuliahan di Departemen Ilmu Ekonomi.
7. Teman-teman Artis dja, Kontainer Miaw, Kontainer Bawah dan Atas, KKN Kwasen, XL FFL, Semoga Ga Tipes, Jastipbyiei, dan teman-teman Ilmu Ekonomi 59 yang telah mengisi hari-hari penulis dan selalu memberikan pengalaman-pengalaman baru selama masa perkuliahan ini.

Bogor, Agustus 2026

Seba Octavia



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	6
1.4 Manfaat	7
1.5 Ruang Lingkup	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Teori Pertumbuhan Endogen	8
2.2 Human Capital Theory	9
2.3 Hipotesis <i>Enviromental Kuznets Curve</i> (EKC) dan Modal Manusia	9
2.4 Teori Perdagangan Hickser-Ohlin	11
2.5 Hubungan Emisi Karbon dengan Variabel Lainnya	12
2.6 Penelitian Terdahulu	14
2.7 Kerangka Pemikiran	15
2.8 Hipotesis Penelitian	16
III METODE	18
3.1 Jenis dan Sumber Data	18
3.2 Metode Analisis	19
3.3 Model Penelitian	24
3.4 Definisi Operasional	25
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Analisis Deskriptif	27
4.2 Hasil Analisis Regresi	40
V SIMPULAN DAN SARAN	46
5.1 Simpulan	46
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN	54
RIWAYAT HIDUP	60



DAFTAR TABEL

1	Jenis dan sumber data	18
2	Deskriptif statistik variabel penelitian	27
3	Hasil pengujian model terbaik	40
4	Rangkuman hasil estimasi regresi data panel	41

DAFTAR GAMBAR

1	Perkembangan rata-rata suhu global tahun 1990-2024	1
2	Perkembangan emisi karbon berdasarkan kawasan tahun 1990-2024	2
3	Tren total penggunaan energi berdasarkan jenisnya di dunia tahun 1990-2024	3
4	Tren emisi karbon di 14 negara Asia tahun 2010-2024	5
5	Kurva pertumbuhan endogen	8
6	Kurva <i>Enviromental Kuznets Curve</i>	10
7	Kurva EKC dengan modal manusia	11
8	Kerangka Pemikiran	16
9	Tipologi Klassen	19
10	Kurva hasil regresi	24
11	Persentase rata-rata kontribusi emisi karbon oleh 14 negara Asia tahun 2010-2021	28
12	Perkembangan emisi karbon di 14 negara Asia tahun 2010-2021	29
13	Perkembangan <i>human capital index</i> di 14 negara Asia tahun 2010-2021	30
14	Plot hubungan antara <i>human capital index</i> dengan emisi karbon pada 14 negara Asia	31
15	Perkembangan proporsi jumlah <i>high skill labour</i> terhadap populasi usia produktif tahun 2010-2021	32
16	Plot hubungan antara jumlah <i>high skill labour</i> dengan emisi karbon pada 14 negara Asia	33
17	Perkembangan konsumsi energi terbarukan di 14 negara Asia tahun 2010-2021	34
18	Plot hubungan antara konsumsi energi terbarukan dengan emisi karbon pada 14 negara Asia	35
19	Perkembangan GDP per kapita 14 negara Asia tahun 2010-2021	37
20	Plot hubungan antara GDP per kapita dan emisi karbon pada 14 negara Asia	38
21	Perkembangan tingkat keterbukaan perdagangan di 14 negara Asia tahun 2010-2021	39
22	Perkembangan <i>medium-high tech manufacturing</i> di 14 negara Asia tahun 2010-2021	39



DAFTAR LAMPIRAN

1	Hasil uji Chow model 1	54
2	Hasil uji Hausman model 1	54
3	Uji Multikolinearitas model 1	55
4	Uji Heteroskedastisitas model 1	55
5	Uji Autokorelasi model 1	55
6	Hasil estimasi FEM <i>robust standard error</i> model 1	56
7	Uji korelasi model 1	56
8	Hasil uji Chow model 2	57
9	Hasil uji Hausman model 2	57
10	Uji Multikolinearitas model 2	58
11	Uji Heteroskedastisitas model 2	58
12	Uji Autokorelasi model 2	58
13	Hasil estimasi FEM <i>robust standard error</i> model 2	59
14	Uji korelasi model 2	59

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

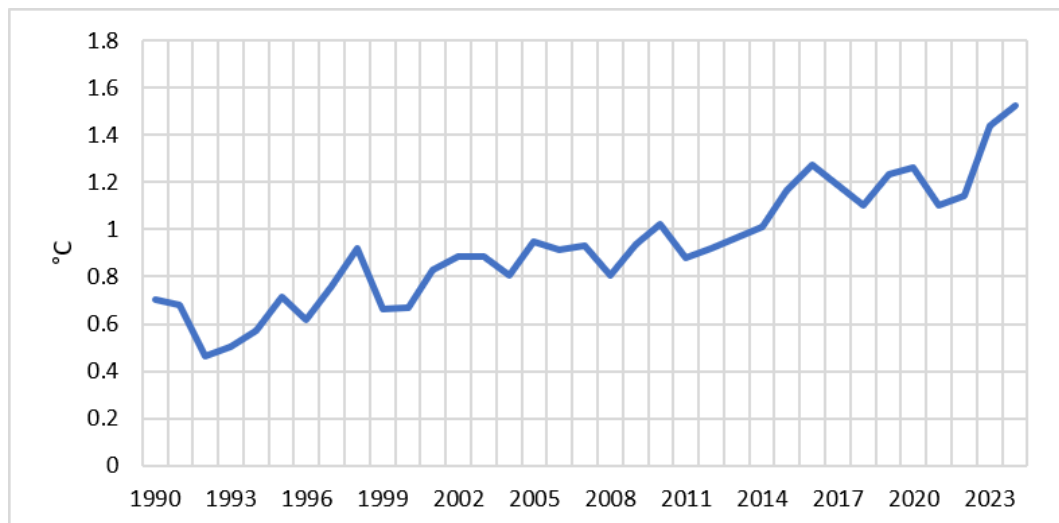
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

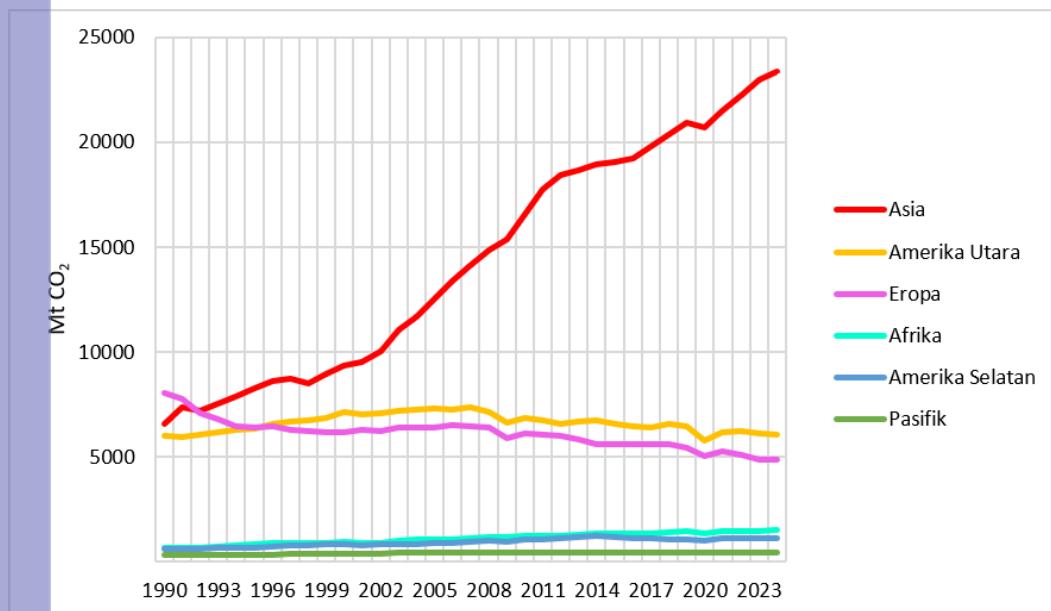
Perubahan iklim telah berkembang menjadi salah satu isu utama global yang menghambat pembangunan ekonomi dan mengancam keberlangsungan kehidupan di seluruh dunia (Zhang *et al.* 2026). Fenomena ini ditandai dengan meningkatnya suhu global, intensitas cuaca ekstrem yang semakin tinggi, serta berbagai dampak ekologis yang kian sulit dikendalikan. Perubahan iklim terjadi ketika emisi gas rumah kaca (GHGs) seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), dan gas fluorinated (HFCs, PFCs, SF_6 , NF_3) yang dihasilkan dari aktivitas manusia dan alam menyebabkan pemanasan jangka panjang pada atmosfer bumi (Mella 2022). Gas rumah kaca tersebut meliputi karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), serta gas fluorinated seperti HFCs, PFCs, SF_6 , dan NF_3 , bekerja dengan memerangkap panas di atmosfer dan mencegahnya lepas ke angkasa. Di antara gas-gas tersebut, karbon dioksida (CO_2) berkontribusi paling besar terhadap emisi gas rumah kaca (GHGs) yang menyebabkan perubahan iklim dengan meningkatkan rata-rata suhu global secara terus-menerus dari waktu ke waktu (Mor 2025; OWID 2026). Data dari World Meteorological Organization (WMO 2026) menunjukkan bahwa suhu rata-rata global terus meningkat mencapai 1.4°C pada tahun 2024 dan menunjukkan peningkatan yang terus berlanjut.



Gambar 1 Perkembangan rata-rata suhu global tahun 1990-2024 (diolah dari World Meteorological Organization, 2026)

Aktivitas manusia berperan penting sebagai pemicu utama masalah emisi karbon. Berbagai studi terdahulu menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi, penggunaan energi, permintaan akan barang dan jasa, hingga tingkat populasi secara signifikan memengaruhi tingkat emisi (Yasin *et al.* 2024; Raihan *et al.* 2026). Klemm dan Vennemann (2021) menegaskan bahwa tekanan terhadap lingkungan akan semakin besar seiring dengan pertumbuhan populasi dan penggunaan energi. Dengan demikian, akan memicu peningkatan permintaan terhadap air, lahan, infrastruktur, dan energi, yang pada akhirnya memperbesar kontribusi aktivitas manusia terhadap kerusakan lingkungan dan peningkatan emisi karbon.

Populasi yang terus tumbuh dan pesatnya urbanisasi mengakibatkan permintaan akan kebutuhan manusia semakin bertambah, yang pada akhirnya memberikan tekanan besar terhadap industri dan pertumbuhan ekonomi (Ji *et al.* 2021). Akibatnya, suhu global berpotensi untuk terus meningkat hingga mengancam lingkungan dan mengganggu kehidupan manusia. Sehingga banyak negara mulai kesulitan menjaga kualitas lingkungan (Umar *et al.* 2021). Sebagai respon atas isu tersebut, negara-negara di dunia telah berkomitmen melalui berbagai inisiatif global, mulai dari *Earth Summit* di Rio de Janeiro 1992, *Kyoto Protocol* 1997, hingga *Paris Agreement* 2015 dalam menjaga kualitas lingkungan untuk mencegah degradasi lingkungan di masa depan (Mehmood dan Mansoor 2021; Usman dan Hammar 2020; Zeng *et al.* 2020). Melalui *Paris Agreement* ini, setidaknya 196 negara di seluruh dunia telah berkomitmen untuk menjaga kenaikan suhu global di bawah 2°C (UNFCCC 2015). Sehingga negara-negara di dunia saat ini terus berupaya untuk memitigasi dampak dari perubahan iklim dan mencapai pembangunan yang berkelanjutan. Upaya-upaya tersebut mulai menunjukkan hasil berupa tren penurunan emisi karbon di beberapa kawasan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah.

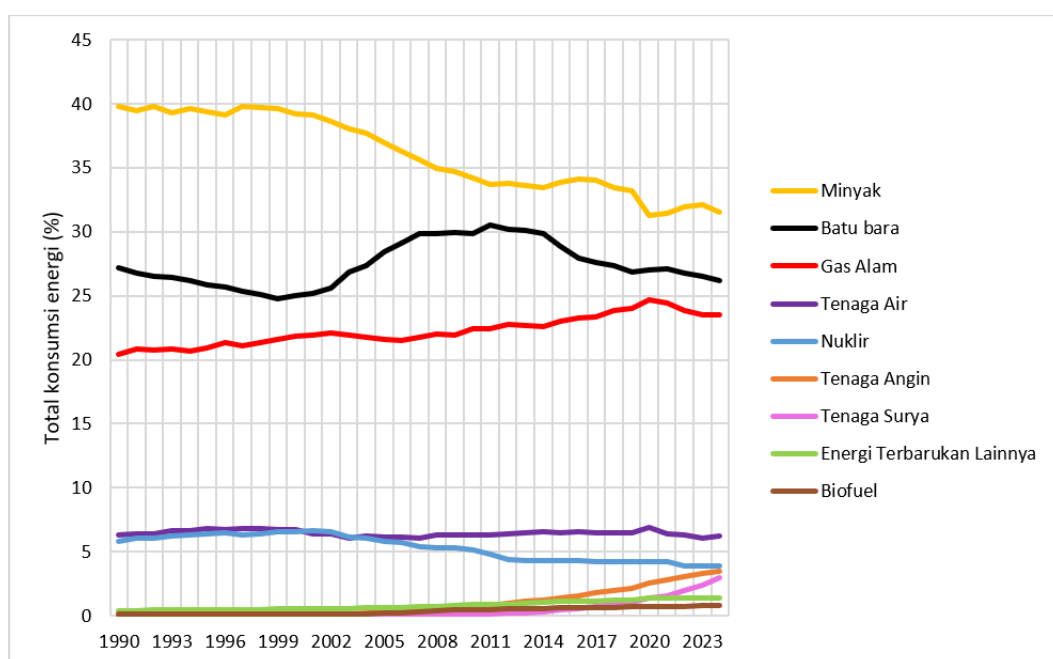


Gambar 2 Perkembangan emisi karbon berdasarkan kawasan tahun 1990-2024 (diolah dari Our World in Data, 2026)

Sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2, emisi karbon di kawasan North America dan Eropa menunjukkan tren yang menurun, yang mana penurunan emisi karbon di North America mulai terasa di sekitar tahun 2007. Sementara di kawasan Eropa tren penurunan emisi karbon telah konsisten sejak tahun 1990 hingga saat ini. Akan tetapi, di kawasan Asia justru menunjukkan tren yang berbeda. Emisi karbon di kawasan Asia terus menunjukkan tren yang meningkat hingga saat ini. Hal tersebut dikarenakan ketergantungan yang tinggi akan bahan bakar fosil seperti batu bara. Batu bara menjadi energi utama yang menggerakkan perekonomian di Asia karena menyumbang lebih dari 50 persen produksi listrik di negara-negara besar (UNDP 2022). Maka dari itu peningkatan

emisi yang terus terjadi di Asia sebagian besar didorong oleh kebutuhan dasar manusia.

Permasalahan terkait isu emisi karbon salah satunya dapat diatasi dengan beralih dari penggunaan energi fosil ke energi terbarukan. Transisi ke energi terbarukan tersebut merupakan kunci untuk menekan emisi karbon sekaligus mendorong pembangunan ekonomi yang berkelanjutan, sehingga mendorong negara-negara dalam mencapai *low-carbon economy*. Hal tersebut sesuai dengan studi oleh Yao *et al.* (2019) pada 17 negara berkembang dan maju yang menemukan bahwa setiap peningkatan 10 persen penggunaan energi terbarukan, emisi karbon berkurang sebesar 1,6 persen. Penggunaan energi terbarukan membantu mengurangi emisi karbon, yang pada akhirnya mendorong keberlanjutan lingkungan, begitu pula studi oleh Li *et al.* (2023) yang menyimpulkan bahwa peningkatan penggunaan energi terbarukan terbukti dapat meringankan tekanan terhadap lingkungan. Studi yang dilakukan oleh Ozturk dan Acaravci (2010) menunjukkan bahwa meskipun tren penggunaan energi terbarukan terus meningkat, sebagian besar sumber energi yang digunakan secara global masih berasal dari bahan bakar fosil. Jika merujuk pada Gambar 3, meskipun hingga saat ini penggunaan energi masih didominasi oleh bahan bakar fosil, akan tetapi trennya menunjukkan penurunan. Sehingga potensi penggunaan energi terbarukan dalam bauran energi akan semakin terlihat dalam jangka Panjang.



Gambar 3 Tren total penggunaan energi berdasarkan jenisnya di dunia tahun 1990-2024 (diolah dari Our World in Data, 2026)

Keberhasilan dalam penerapan energi terbarukan dianggap turut bergantung pada kualitas sumber daya manusia yang tersedia. Hal ini dikarenakan modal manusia yang berkualitas menjadi faktor kunci dalam mendorong efisiensi energi, inovasi teknologi, dan kesadaran akan kualitas lingkungan. Seseorang dengan pendidikan yang tinggi cenderung lebih patuh terhadap aturan dan regulasi lingkungan. Artinya, semakin tinggi kualitas modal manusia, semakin baik pula

kepatuhan terhadap kebijakan lingkungan, sehingga mampu memitigasi kerusakan lingkungan (Padhan *et al.* 2020; Adedoyin dan Zakari 2020). Selain itu modal yang terampil memungkinkan industri untuk terus berinovasi yang berimplikasi pada adopsi proses produksi yang semakin modern dan mampu meminimalkan limbah industri. Misalnya saja penelitian yang dilakukan oleh Avenyo dan Tregenna (2022) menunjukkan bahwa aktivitas industri secara umum meningkatkan polusi, namun sektor manufaktur berteknologi menengah dan tinggi (*medium-high tech manufacturing*) justru dikaitkan dengan tingkat emisi yang lebih rendah dibandingkan manufaktur berteknologi rendah (*low tech manufacturing*). Fenomena ini membuktikan bahwa penggunaan teknologi dan pergeseran struktur industri yang lebih modern dapat membantu negara dalam menjaga kualitas lingkungannya sehingga meminimalisir emisi karbon.

Studi oleh Haq *et al.* (2025) menegaskan bahwa investasi pada modal manusia itu penting karena dampaknya tidak tunggal. Modal manusia secara bersamaan akan mendorong ekonomi untuk terus tumbuh, menjaga kualitas lingkungan, hingga mendorong pengembangan teknologi. Ketiga hal tersebut akan saling mendukung untuk menuju pembangunan yang berkelanjutan.

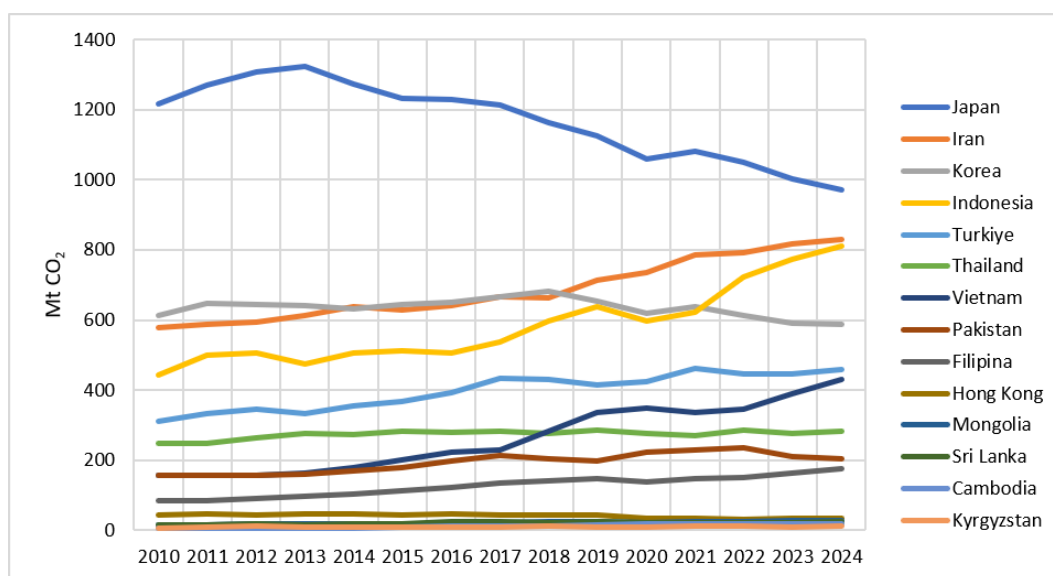
Meskipun penelitian yang membahas hubungan antara modal manusia dengan emisi karbon telah banyak dilakukan, namun fokusnya masih pada hubungan yang linear, sehingga hasil yang diperoleh pun beragam. Hubungan antara pengaruh modal manusia terhadap emisi karbon diduga memiliki hubungan yang *non-linear*, yang mengacu pada hipotesis *Enviromental Kuznet Curve* (EKC). Beberapa studi terdahulu seperti studi oleh Khan (2020), Gnangoin *et al.* (2022), Zheng *et al.* (2023), dan Gnangoin *et al.* (2023) berasumsi bahwa peningkatan modal manusia pada tahap awal akan meningkatkan emisi karbon, akan tetapi setelah mencapai titik atau ambang batas tertentu, peningkatan kapasitas modal manusia akan menurunkan emisi karbon.

Selain itu arah pengaruh hubungan modal manusia dengan emisi karbon menunjukkan hasil yang berbeda-beda. Perbedaan hasil tersebut dikarenakan indikator yang digunakan untuk mengukur modal manusia berbeda-beda antar peneliti. Berbagai penelitian terdahulu dalam mengukur modal manusia menggunakan indikator seperti *educational enrollment*, *average year of education*, *school enrollment for general education*, *school enrollment for vocational education*, *knowledgeable human capital*, *skilled human capital*, *institutional human capital* (Bano *et al.* 2018; Huang *et al.* 2020; Lee *et al.* 2025; Maftoon *et al.* 2025). Pada penelitian ini indikator yang digunakan untuk mengukur kapasitas modal manusia berupa *human capital index based on years of schooling and returns to education* (HCI) dan *high skill labour level 3-4* (HSL). *Human Capital Index* (HCI) mencerminkan kualitas pendidikan secara umum melalui lama sekolah dan tingkat pengembalian pendidikan, sedangkan *high skill labour* (HSL) mencerminkan jumlah tenaga kerja dengan tingkat keterampilan tinggi yang secara langsung berkontribusi pada inovasi dan adopsi teknologi. Penggunaan dua indikator ini dimaksudkan agar analisis tidak hanya menggambarkan akumulasi modal manusia secara agregat, tetapi juga kemampuan spesifik suatu negara dalam mengembangkan inovasi teknologi rendah karbon dalam mendorong transisi energi dan penurunan emisi karbon.

1.2 Rumusan Masalah

Mengurangi emisi karbon merupakan salah satu tantangan terbesar yang dihadapi dunia saat ini (Kartal 2021). Diantara kawasan-kawasan lain di dunia, Asia merupakan salah satu kawasan yang menjadi emitor tertinggi emisi karbon di dunia. Bahkan di tahun 2021, 58 persen dari total emisi di dunia berasal dari kawasan Asia. Selain itu, dalam kurun 2000–2021, kawasan lain berhasil memangkas emisi sebesar 700 juta ton, sementara kawasan Asia justru mencatat peningkatan sebesar 12,4 miliar ton (UNDP 2022). Hal tersebut dikarenakan pertumbuhan ekonomi yang terus dialami oleh negara-negara di kawasan Asia. Jika merujuk pada Gambar 4, tren emisi karbon di negara-negara Asia sangat beragam, misalnya saja Jepang yang tren emisinya terus menurun, Korea yang fluktuatif, Kamboja dan Kyrgyzstan yang emisinya cenderung rendah, hingga Iran dan Indonesia yang terus meningkat pesat. Perbedaan tingkat emisi ini diperkirakan karena negara-negara tersebut berada di tahapan pertumbuhan ekonomi yang berbeda.

Menurut Friedrich *et al.* dalam Evitasari dan Komarulzaman (2023), negara-negara maju yang telah melewati masa industrialisasi, secara historis telah menyumbang lebih dari dua pertiga atau 76 persen dari total emisi karbon global. Jika merujuk pada *Paris Agreement 2015*, negara-negara yang tergolong dalam negara maju wajib memimpin bahkan memikul tanggung jawab yang lebih besar sebagai konsekuensi atas kerusakan lingkungan di masa lalu (Robinson dan Shine 2018). Sementara itu negara-negara berkembang belum mencapai tahap industrialisasi dan tengah berusaha mencapai pertumbuhan ekonomi yang tentu saja menghasilkan emisi karbon sebagai akibat dari aktivitas ekonominya. Secara lebih lanjut Gambar 4 di bawah ini menunjukkan grafik perkembangan tren emisi karbon di 14 negara Asia seperti Jepang, Korea, Hong Kong, hingga Kyrgyzstan.



Gambar 4 Tren emisi karbon di 14 negara Asia tahun 2010-2024 (diolah dari World Development Indicator, 2026)

Perbedaan tingkat emisi sebagai akibat dari perbedaan tingkat pembangunan di negara-negara tersebut membuat perhatian global harus difokuskan pada cara mendorong pembangunan yang rendah karbon. Salah satu

faktor yang diyakini mampu mendorong pembangunan berkelanjutan yaitu penggunaan energi terbarukan. Beberapa negara seperti Indonesia dan Vietnam memiliki potensi *hydropower* yang melimpah, Kyrgyzstan yang memiliki potensi besar pembangkit listrik tenaga air, Jepang dengan potensi energi terbarukannya yang berasal dari tenaga surya, *offshore wind*, hingga panas bumi (*geothermal*) dengan kapasitas potensial yang mencapai 23 GW (Shinozaki *et al.* 2025). Begitu pun dengan Iran, meskipun Iran merupakan negara penghasil minyak dan gas, potensi energi terbarukan di negara tersebut tetap terlihat. Misalnya saja potensi energi solar dan anginnya secara berturut-turut diperkirakan mencapai 60 GW dan 30 GW (UNDP 2025). Variasi potensi energi terbarukan di negara-negara tersebut dikarenakan letak geografisnya, misalnya negara dengan iklim kering seperti Iran, Turkiye, dan Mongolia memiliki potensi besar terhadap energi surya, sedangkan wilayah pesisir seperti Jepang dan Mongolia memiliki potensi terhadap energi angin. Begitu pun dengan negara-negara dengan pengunungan vulkanik yang masih aktif seperti Indonesia, Filipina, dan Jepang yang cenderung memiliki potensi energi dari panas bumi.

Akan tetapi, efektivitas energi terbarukan dalam menekan emisi karbon tidak berdiri sendiri dan masih bergantung pada kualitas sumber daya manusia yang tersedia. Studi-studi terdahulu turut menunjukkan bahwa dengan tingkat pendidikan yang semakin tinggi akan mendorong masyarakat untuk beralih ke energi terbarukan dan memproduksi barang-barang yang lebih ramah lingkungan (Desha *et al.* 2014). Tidak hanya itu, Bayar *et al.* (2022) dalam studinya juga menunjukkan bahwa modal manusia memiliki arah pengaruh yang negatif dengan emisi karbon. Sehingga peningkatan kualitas modal manusia terbukti bisa menurunkan emisi karbon tanpa harus menghambat pertumbuhan ekonomi.

Dalam konteks ini, modal manusia diduga memiliki hubungan yang *non-linear* dengan emisi karbon, yang mana peningkatan kapasitas modal manusia pada tahap awal akan meningkatkan emisi karbon. Namun setelah mencapai tahap tertentu, peningkatan kapasitas modal manusia akan mulai menurunkan emisi karbon sesuai dengan teori *Enviromental Kuznet Curve* (EKC). Meski demikian, hubungan *non-linear* antara modal manusia dan emisi karbon di negara-negara Asia masih sedikit yang mengkajinya. Berdasarkan latar belakang dan penjelasan di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana gambaran perkembangan dan hubungan antara modal manusia terhadap emisi karbon di 14 Negara Asia dalam kerangka *Environmental Kuznets Curve* (EKC)?
2. Bagaimana gambaran perkembanga dan hubungan antara energi terbarukan terhadap emisi karbon di 14 Negara Asia?
3. Bagaimana gambaran perkembangan dan hubungan antara GDP per kapita terhadap emisi karbon di 14 Negara Asia?

1.3 Tujuan

Secara spesifik, berdasarkan latar belakang dan masalah, tujuan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi perkembangan dan hubungan antara modal manusia terhadap emisi karbon di 14 Negara Asia dalam kerangka *Environmental Kuznets Curve* (EKC)

2. Mengidentifikasi perkembangan dan hubungan antara energi terbarukan terhadap emisi karbon di 14 Negara Asia
3. Mengidentifikasi perkembangan dan hubungan antara GDP per kapita terhadap emisi karbon di 14 negara Asia

1.4 Manfaat

Melalui penelitian ini diharapkan dapat berguna dan memberi manfaat kepada berbagai pihak

1. Pelaku kebijakan, hasil penelitian ini diharapkan mampu untuk mengoptimalkan peran modal manusia dan energi terbarukan dalam upaya menurunkan intensitas karbon.
2. Penulis dan peneliti selanjutnya, penelitian ini menawarkan kesempatan untuk memperluas pengetahuan dan mengaitkan temuan dengan teori yang relevan dalam literatur ekonomi. Selain itu penelitian ini juga diharapkan dapat memperkaya literatur yang membahas terkait modal manusia, energi terbarukan, dan GDP per kapita dalam kaitannya dengan emisi karbon, sehingga penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

1.5 Ruang Lingkup

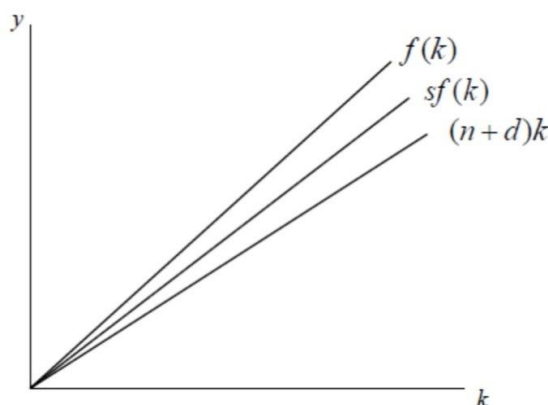
Penelitian ini berfokus pada analisis hubungan antara modal manusia, energi terbarukan, dan GDP per kapita terhadap emisi karbon di negara-negara Asia. Penelitian ini juga memasukkan beberapa variabel kontrol, yaitu *medium-high tech manufacturing* dan tingkat keterbukaan perdagangan yang secara teoritis dapat memengaruhi dinamika emisi karbon suatu negara. Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa data panel dengan sampel sebanyak 14 negara Asia dalam periode waktu 2010-2021. Keempat belas negara tersebut mewakili keragaman sub-kawasan di Asia seperti Asia Timur, Asia Tenggara, Asia Selatan, Asia Tengah, dan Asia Barat, sehingga tidak terbatas pada satu sub-kawasan tertentu. Sehingga merepresentasikan variasi tingkat pembangunan ekonomi, struktur industri, transisi energi, serta kualitas modal manusia yang tercermin dari perbedaan tingkat pendidikan dan proporsi tenaga kerja berkeahlian tinggi antarnegara. Selain itu, keempat belas negara dari 48 negara di Kawasan Asia tersebut secara kumulatif menyumbang rata-rata 21.79 persen atau lebih dari satu per lima dari total emisi karbon di kawasan Asia sepanjang periode 2010-2021. Pemilihan sampel juga turut mempertimbangkan konsistensi ketersediaan data.



II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Pertumbuhan Endogen

Dalam teori pertumbuhan endogen, pertumbuhan ekonomi ditentukan bukan oleh kekuatan dari luar sistem, melainkan oleh sistem yang mengatur proses produksi. Seperti inovasi, teknologi, dan investasi dalam sumber daya manusia atau modal manusia. Dasar model teori ini dibangun atas asumsi *increasing return to scale* atau *non-diminishing return* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, yang mana tabungan dan investasi dapat membuat pertumbuhan ekonomi tidak stabil (*steady state condition*) tetapi dapat terus bertumbuh (Dornbusch *et al.* 1998).



Gambar 5 Kurva pertumbuhan endogen (Dornbusch *et al.* 1998)

Lebih lanjut lagi pertumbuhan endogen dijelaskan melalui persamaan $Y = AK$. Dalam persamaan ini, A mewakili setiap faktor yang memengaruhi teknologi, dan K mencakup modal fisik dan manusia. Perlu diperhatikan bahwa tidak ada hasil yang menurun (*diminishing return*) atas capital dalam formulasi tersebut. Kemungkinan yang bisa terjadi adalah investasi pada modal fisik dan manusia dalam bentuk pengetahuan (*knowledge*) dapat menghasilkan penghematan eksternal dan peningkatan produktivitas yang melebihi penghasilan yang cukup untuk menutup *diminishing returns*. Dengan demikian perkembangan sains dan teknologi telah memungkinkan terjadi perkembangan ilmu pengetahuan (*increasing returns to knowledge*) sehingga asumsi bahwa terjadi *constant returns to capital* menjadi realistis dalam jangka panjang.

Selain itu model ini menjelaskan bahwa tidak ada kekuatan yang menyamakan tingkat pertumbuhan antar negara, tingkat pertumbuhan nasional yang konstan dan berbeda antar negara tergantung pada besarnya tabungan nasional dan tingkat teknologi. Konsekuensinya, bagi negara yang miskin modal fisik dan manusia sulit untuk menyamai tingkat pendapatan per kapita negara yang kaya *capital*, walaupun memiliki tingkat tabungan nasional yang sama besar. Dengan demikian, pertumbuhan endogen menekankan bahwa investasi dalam modal manusia merupakan faktor penting untuk pertumbuhan ekonomi dan bersifat endogen (Juhro dan Trisnanto 2018; Ehrlich dan Pei 2020; Nihal *et al.* 2023)

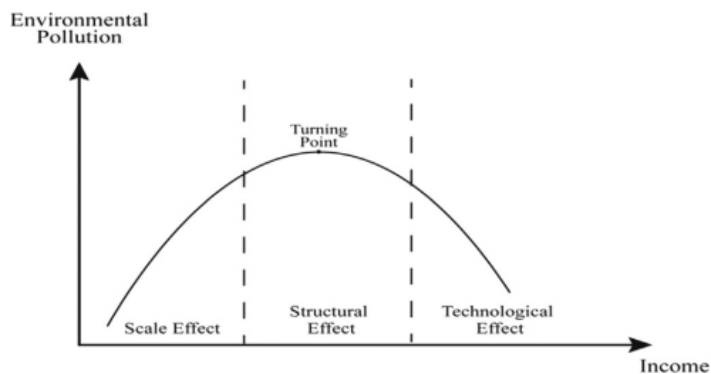
2.2 Human Capital Theory

Human Capital Theory yang dikemukakan oleh Gary Becker (1964) menegaskan bahwa modal manusia yang tercermin dalam pendidikan, keterampilan, dan pelatihan merupakan salah satu aset utama yang berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas tenaga kerja. Teori ini memandang bahwa investasi dalam pendidikan dan pelatihan sebagai analog dengan investasi dalam modal fisik, yang mana pengembalian atas investasi ini diwujudkan dalam bentuk peningkatan produktivitas dan pendapatan. Dalam konteks ini, modal manusia dipandang sebagai sumber daya tak berwujud yang tercermin dalam kemampuan seseorang untuk belajar, berkembang, dan menyebarkan pengetahuan kepada orang lain. Pentingnya teori ini terletak pada dampaknya terhadap kebijakan publik, yang mana pemerintah dan perusahaan didorong untuk menginvestasikan lebih banyak dalam pelatihan dan pendidikan untuk meningkatkan kinerja ekonomi. Teori ini juga menggaris bawahi peran penting pengembangan modal manusia dalam pertumbuhan ekonomi jangka panjang hingga pembangunan berkelanjutan. (Muta'ali 2024)

2.3 Hipotesis *Enviromental Kuznets Curve* (EKC) dan Modal Manusia

EKC pada dasarnya terinspirasi dari gagasan Kuznetsz (1995) yang awalnya meneliti hubungan antara ketimpangan pendapatan (*income inequality*) dan pertumbuhan ekonomi. Kuznets menemukan bahwa ketimpangan pendapatan pertama-tama meningkat, lalu mencapai titik puncak (*turning point*), kemudian menurun seiring berkembangnya ekonomi dari negara berpendapatan rendah menjadi negara berpendapatan tinggi. Hubungan ini membentuk *inverted U-shaped*. Dengan konsep yang sama, hipotesis EKC menyatakan bahwa pertumbuhan ekonomi yang lebih lanjut justru akan meningkatkan kualitas lingkungan setelah negara melewati tingkat pendapatan tertentu. Hal ini dikarenakan ketika pendapatan suatu negara masih tergolong rendah, maka fokus negara adalah bagaimana cara meningkatkan pendapatan, baik melalui produksi, investasi yang mendorong terjadinya peningkatan pendapatan dan cenderung mengabaikan kualitas lingkungan. Akibatnya pertumbuhan pendapatan akan diikuti oleh kenaikan tingkat polusi dan setelah beberapa lama akan terjadi *Turning Point* dan pertumbuhan akan tetap berjalan. Artinya, polusi lingkungan merupakan fungsi berbentuk *inverted U-shaped* dari pendapatan per kapita.

Pada Gambar 5 terlihat beberapa fase dalam skema EKC, setidaknya ada tiga tahap penting dalam pembangunan ekonomi yang mempengaruhi kualitas lingkungan dengan cara berbeda (Özcan dan Öztürk 2019).



Gambar 6 Kurva *Enviromental Kuznets Curve* (Bilgili et al. 2016)

1) Tahap *Pre-industrial*

Pada tahap awal, degradasi lingkungan meningkat karena masyarakat masih berjuang memenuhi kebutuhan dasar seperti makanan dan tempat tinggal. Regulasi lingkungan masih lemah, kesadaran lingkungan rendah, dan hampir tidak ada dana yang dialokasikan untuk perlindungan lingkungan. Polusi dianggap sebagai efek samping yang dapat diterima dari pertumbuhan ekonomi.

2) Tahap *Industrial*

Saat ekonomi mulai terindustrialisasi, polusi cenderung meningkat seiring dengan output produksi. Namun, seiring meningkatnya pendapatan, masyarakat mulai lebih peduli terhadap lingkungan. Regulasi lingkungan menjadi lebih efektif, dan konsumen berpendapatan tinggi mulai bersedia membayar lebih untuk produk ramah lingkungan.

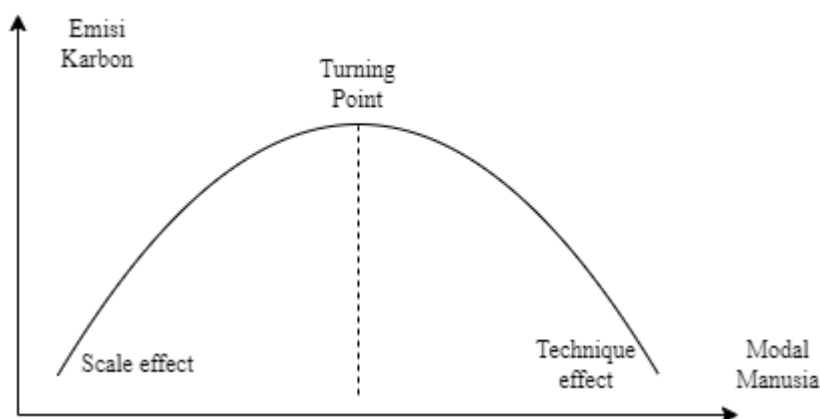
3) Tahap *Post-Industrial*

Pada tahap ini, ekonomi sudah berkembang pesat dan masyarakat dianggap sudah cukup kaya. Pada tahap ini pertumbuhan ekonomi justru mulai membantu lingkungan, bukan merusaknya. Pertama, masyarakat yang sudah kaya mulai lebih peduli terhadap lingkungan. Mereka rela membayar lebih mahal untuk produk ramah lingkungan dan menuntut regulasi lingkungan yang lebih ketat dari pemerintah. Grossman dan Krueger (1995) menyatakan bahwa negara-negara kaya memiliki standar lingkungan yang jauh lebih ketat dibanding negara berpendapatan menengah dan rendah. Kedua, struktur ekonominya berubah. Industri berat yang banyak menghasilkan polusi mulai digantikan oleh sektor jasa dan industri berbasis teknologi informasi yang jauh lebih bersih dan efisien. Jadi emisi yang dihasilkan per unit output semakin sedikit. Ketiga, kualitas lingkungan pada tahap ini sudah dianggap sebagai barang mewah (*luxury good*) artinya, semakin tinggi pendapatan seseorang, semakin besar pula permintaan mereka terhadap lingkungan yang bersih dan sehat (Wang 2017).

Selain hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan kualitas lingkungan, hipotesis *Enviromental Kuznets Curve* (EKC) dapat juga diterapkan untuk melihat pengaruh modal manusia terhadap kualitas lingkungan. Misalnya pada penelitian Gngoin *et al.* (2022) yang mengeksplorasi tentang pengaruh modal manusia terhadap emisi karbon pada negara berkembang. Gngoin *et al.* (2022) membangun argumen ini dengan menambahkan variabel kuadrat dari modal

manusia ke dalam model, sejalan dengan logika pengujian EKC konvensional yang biasanya diterapkan pada variabel tingkat pendapatan. Pengujian hipotesis EKC dalam penelitian Gnangoin *et al.* (2022) berdasarkan hasil dari studi terdahulu yang menyoroti dua fase perkembangan modal manusia. Pada tahap awal, akumulasi modal manusia di negara berkembang cenderung diarahkan untuk mendukung pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi yang masih bergantung pada energi fosil, sementara kurikulum pendidikan pada umumnya belum memuat isu lingkungan secara memadai, sehingga peningkatan kapasitas modal manusia pada tahap ini justru berasosiasi dengan kenaikan emisi karbon. Sebaliknya, setelah kapasitas modal manusia melampaui ambang batas tertentu, tenaga kerja terdidik mulai mendorong penggunaan teknologi, transformasi menuju proses produksi rendah karbon, serta pengelolaan sumber daya energi yang lebih efisien, sehingga hubungan antara modal manusia dan emisi karbon berbalik arah menjadi negatif.

Pola nonlinear ini turut didukung oleh temuan empiris sebelumnya, misalnya Yao *et al.* (2020) menemukan bahwa hubungan antara modal manusia dan emisi karbon bersifat positif sebelum tahun 1950, namun berubah menjadi negatif setelah tahun 1950, yang mengindikasikan adanya pergeseran struktural dalam hubungan tersebut seiring waktu. Li dan Ullah (2022) turut menemukan bahwa peningkatan tingkat pendidikan berkorelasi dengan penurunan emisi karbon. Sehingga penelitian ini mengadopsi kerangka berpikir yang sama untuk menguji apakah hubungan antara modal manusia dan emisi karbon juga membentuk pola *inverted U-shaped* seperti dalam hipotesis EKC. Pada Gambar 6 disajikan kerangka hipotesis EKC dengan variabel modal manusia.



Gambar 7 Kurva EKC dengan modal manusia (diadaptasi dari Gnangoin *et al.* 2022)

2.4 Teori Perdagangan Hickser-Ohlin

Teori Perdagangan Internasional modern mengalami perkembangan signifikan ketika dua ekonom asal Swedia, yaitu Eli Heckscher (1919) dan Bertil Ohlin (1933), menyatakan bahwa perbedaan produktivitas antar negara disebabkan oleh perbedaan proporsi faktor produksi yang dimiliki masing-masing negara, atau yang dikenal sebagai *endowment factors* (Bakara *et al.* 2024). Inti dari teori H-O adalah bahwa pola perdagangan suatu negara ditentukan oleh faktor produksi yang dimilikinya secara relatif melimpah, termasuk modal manusia. Oleh karena itu, teori ini juga dikenal sebagai *The Proportional Factor Theory*, karena menekankan

pentingnya proporsi faktor produksi dalam menentukan pola perdagangan internasional (Darwanto dalam Bandiyah *et al.* 2025).

Ketika suatu negara meningkatkan keterbukaan perdagangannya, aktivitas produksi dan ekonomi akan meningkat untuk memenuhi permintaan ekspor, yang pada gilirannya cenderung mendorong kenaikan konsumsi energi dan emisi karbon (*scale effect*). Sehingga komposisi produksi yang dihasilkan dari peningkatan aktivitas perdagangan tersebut (*composition effect*) sangat bergantung pada faktor produksi yang digunakan di negara tersebut (Poncet *et al.* 2015). Pada negara dengan kapasitas modal manusia yang tinggi, aktivitas produksi yang dihasilkan cenderung lebih efisien dan tidak seintensif energi dibandingkan negara dengan kapasitas modal manusia yang rendah (Edziah *et al.* 2021)

Akan tetapi, keterbukaan perdagangan juga berpotensi memberikan manfaat bagi lingkungan apabila efek teknologi (*technique effect*) yang dibawa melalui perdagangan lebih besar daripada efek komposisi (*composition effect*) dan efek skala (*scale effect*) yang ditimbulkannya (Setyowati dan Atmanti 2025; Siregar dan Hasbi 2023). Dalam konteks ini, modal manusia berperan penting dalam menentukan seberapa dominan *technique effect* tersebut bekerja, sehingga semakin tinggi kapasitas modal manusia di suatu negara, semakin besar pula peluang bagi *technique effect* untuk mengimbangi atau bahkan melampaui *scale effect* dan *composition effect*. Sehingga teori ini menjadi landasan teoritis untuk memahami bagaimana pola spesialisasi yang terbentuk akibat perdagangan bebas dapat membawa konsekuensi lingkungan yang berbeda-beda, tergantung pada kondisi regulasi, tingkat teknologi, dan struktur industri masing-masing negara.

2.5 Hubungan Emisi Karbon dengan Variabel Lainnya

2.5.1 Modal Manusia

Modal manusia merupakan salah satu faktor yang diyakini berpengaruh terhadap penurunan emisi karbon. Peningkatan kualitas modal manusia melalui pendidikan dan pelatihan mendorong adopsi teknologi yang lebih bersih, efisiensi energi, serta pergeseran pola produksi dan konsumsi ke arah yang lebih ramah lingkungan (Payab *et al.* 2023). Masyarakat dengan tingkat pendidikan yang lebih tinggi cenderung lebih sadar terhadap dampak lingkungan dan lebih responsif terhadap kebijakan iklim, sehingga secara tidak langsung turut menekan laju emisi karbon. Hal ini sejalan dengan temuan Udemba (2020) yang mengonfirmasi bahwa peningkatan modal manusia berpengaruh signifikan terhadap penurunan emisi karbon. Sehingga dengan semakin tingginya kualitas modal manusia, semakin besar potensi penurunan intensitas karbon dari berbagai sektor ekonomi.

2.5.2 Energi Terbarukan

Konsumsi energi dari penggunaan bahan bakar fosil merupakan salah satu sumber utama emisi karbon (Jiang *et al.* 2022). Akan tetapi tidak dapat dipungkiri bahwa berbagai jenis energi tersebut sangat penting bagi aktivitas industri seperti manufaktur untuk menghasilkan output bagi perekonomian. Peralihan penggunaan energi terbarukan diyakini mampu menjadi solusi dalam mengurangi emisi karbon. Sakilu dan Chen (2025) dalam studinya turut mengkonfirmasi bahwa konsumsi energi terbarukan mampu meningkatkan

efisiensi energi dan menurunkan emisi karbon dalam jangka panjang. Sehingga secara teoritis, substitusi energi fosil dengan energi terbarukan dalam proses produksi sektor manufaktur secara langsung mengurangi intensitas karbon per unit output.

2.5.3 GDP per Kapita

Pertumbuhan ekonomi yang diukur melalui GDP per kapita sering kali berkorelasi dengan emisi karbon (Junsheng *et al.* 2024). Hal ini dikarenakan peningkatan GDP per kapita akan diiringi dengan perubahan pola konsumsi masyarakat. Tingkat pendapatan yang lebih tinggi akan berkorelasi dengan peningkatan permintaan barang dan jasa serta gaya hidup yang lebih intensif energi. Sehingga terjadi peningkatan skala ekonomi yang secara langsung menyebabkan eksploitasi sumber daya yang lebih besar dan pelepasan emisi yang lebih tinggi ke lingkungan. Selain itu Bakri *et al.* (2025) dalam studinya menjelaskan bahwa di negara-negara besar ketika pertumbuhan industri yang cepat diiringi oleh konsumsi energi yang tinggi, serta ketergantungan yang kuat pada bahan bakar fosil seperti batu bara menjadi penyebab utama emisi karbon terus meningkat seiring pertumbuhan ekonomi

2.5.4 Medium-High Tech Manufacturing

Avenyo dan Tregenna (2022) dalam studinya menyebutkan bahwa *medium-high tech manufacturing* dianggap lebih minim emisi dibandingkan dengan *low tech manufacturing*. Sehingga perkembangan struktur industri ke *medium-high tech manufacturing* mampu menekan emisi karena karakteristik industrinya yang lebih bersih akibat adanya *technique effect*, yaitu penggantian teknologi lama yang polutif dengan teknologi baru yang lebih bersih. Selain itu, *medium-high tech manufacturing* biasanya turut mengandalkan proses penelitian dan pengembangan dalam aktivitas industrinya (Avenyo dan Tregenna 2021). Sehingga perkembangan struktur industri *medium-high tech manufacturing* dapat mendorong pertumbuhan ekonomi dengan tetap memerhatikan kualitas lingkungan.

2.5.5 Keterbukaan Perdagangan

Keterbukaan perdagangan termasuk variabel yang penting dalam pembahasan emisi karbon, karena keterbukaan perdagangan terhadap emisi karbon dapat bekerja melalui tiga jalur, yaitu *scale effect* (perdagangan yang lebih besar mendorong produksi dan meningkatkan emisi), *composition effect* (pergeseran struktur industri ke sektor yang lebih bersih), dan *technology effect* (masuknya teknologi produksi yang lebih efisien melalui perdagangan). Banyak studi telah dilakukan mengenai korelasi antara keterbukaan perdagangan dan emisi karbon. Namun demikian, temuan dari penelitian sebelumnya tentang hubungan antara keterbukaan perdagangan dan emisi karbon belum mencapai konsensus dan tetap menjadi perdebatan. Fang *et al.* (2019), Mahmood *et al.* (2019) dan Shahzad *et al.* (2017) mengidentifikasi korelasi positif antara keterbukaan perdagangan dan emisi karbon, menunjukkan bahwa keterbukaan perdagangan menyebabkan peningkatan emisi karbon. Peningkatan volume perdagangan akan meningkatkan produksi dan konsumsi energi, yang cenderung

meningkatkan emisi karbon. Sebaliknya, Gozgor (2017) dan Zhou *et al.* (2025) menemukan korelasi negatif antara keterbukaan perdagangan dan emisi karbon, yang mana pada jangka panjang keterbukaan perdagangan akan mengarah pada pengurangan emisi karbon. Keterbukaan perdagangan memfasilitasi suatu negara dalam transfer teknologi dari negara maju ke negara berkembang. Melalui investasi dan perdagangan, inovasi teknologi hijau ini tersebar secara global dan mempercepat transformasi rendah karbon di ekonomi negara berkembang. Dengan demikian, efek keterbukaan perdagangan tidak selalu konsisten, pada negara dengan struktur industri yang padat karbon, keterbukaan perdagangan justru dapat meningkatkan emisi. Maka dari itu, tanpa dukungan regulasi lingkungan dan adopsi teknologi hijau, keterbukaan perdagangan berpotensi memperbesar tekanan lingkungan daripada memperbaikinya

2.6 Penelitian Terdahulu

Berbagai studi telah banyak membahas mengenai Modal Manusia serta hubungannya terhadap Emisi Karbon (CO₂), Roy (2026) dalam studinya menganalisa pengaruh modal manusia dan konsumsi energi terbarukan terhadap emisi karbon di negara-negara SAARC dengan periode analisis tahun 1990-2020 menggunakan metode *panel corected standard error* (PCSE). Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan modal manusia yang diukur dengan *gross secondary school enrollment* dan konsumsi energi terbarukan secara signifikan efektif dalam menurunkan emisi karbon. Sehingga meningkatkan kualitas modal manusia melalui kurikulum pendidikan berbasis keterampilan sangat penting untuk mendukung agenda pembangunan berkelanjutan di SSARC.

Maftoon *et al.* (2025) menganalisis hubungan antara konsumsi energi terbarukan, modal manusia yang diukur dengan *human capital index based on years of schooling and returns to education*, dan emisi karbon pada 126 negara di seluruh dunia pada periode 2001-2020 dengan pendekatan *two-stage least squares* (2SLS). Hasil analisis mengungkapkan bahwa REC dan HC secara langsung dapat meningkatkan emisi karena inefisiensi masa transisi energi. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa kebijakan perluasan energi hijau harus dibarengi dengan investasi besar pada pendidikan dan pengembangan keterampilan agar teknologi bersih dapat diadopsi dan dioptimalkan secara efisien untuk mencapai target keberlanjutan.

Shabani (2024) dalam penelitiannya menganalisis bagaimana tingkat modal manusia yang diukur dengan *human capital index based on years of schooling and assumed rate return to education* mempengaruhi efektivitas energi terbarukan (RE) dalam mengurangi emisi karbon di 67 negara maju dan berkembang dari tahun 1999-2019 menggunakan pendekatan *dynamic threshold panel data model*. Hasil analisis menunjukkan bahwa energi terbarukan secara konsisten berdampak negatif terhadap emisi karbon. Namun, penelitian ini menemukan adanya efek ambang batas (*threshold*) yang signifikan pada modal manusia, di mana ketika kualitas modal manusia melewati angka tertentu (3,407 untuk negara maju dan 2,949 untuk negara berkembang), efektivitas energi terbarukan dalam menurunkan emisi meningkat drastis hingga 4,75 sampai 5 kali lipat. Dengan demikian, investasi besar pada modal manusia melalui pendidikan dan R&D sangat penting untuk mempercepat adopsi teknologi hijau dan mencapai target pengurangan karbon secara efektif.

Adikari *et al.* (2023) menganalisis dampak modal manusia yang diukur dengan *human capital index based on years of schooling and assumed rate return to education* terhadap emisi karbon di Sri Lanka tahun 1978-2019 dengan metode Autoregressive Distributed Lag (ARDL). Hasil analisis pada studi ini menunjukkan bahwa dalam jangka panjang modal manusia berpengaruh negatif terhadap emisi karbon. Investasi pada pendidikan untuk meningkatkan kualitas modal manusia merupakan langkah penting guna menurunkan tingkat degradasi lingkungan dalam jangka panjang serta untuk mencapai target pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goal 13*).

Zhang *et al.* (2021) menganalisis bagaimana sumber daya alam, modal manusia yang diukur dengan *human capital index based on years of schooling and assumed rate return to education*, dan pertumbuhan ekonomi memengaruhi kualitas lingkungan di Pakistan dengan periode analisis antara tahun 1985-2018. Metode yang digunakan dalam studi ini yaitu *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL), dengan menggunakan model ARDL, studi ini menemukan bahwa dalam jangka panjang modal manusia dan sumber daya alam memiliki arah pengaruh yang negatif terhadap emisi karbon. Modal manusia yang terdidik dan terampil mampu mengadopsi teknologi produksi baru yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Sehingga sumber daya alam digunakan lebih optimal dan kerusakan lingkungan akan berkurang.

Penelitian oleh Lin *et al.* (2021) berfokus pada analisis hubungan antara modal manusia yang diukur dengan *the number of patents every one million R&D staff full-time equivalent* dengan emisi karbon di 30 provinsi di China dengan periode analisis antara tahun 2003-2017. Dalam analisisnya, model estimasi yang digunakan diantaranya *Fixed Effect*, *Ordinary Least Squares* (OLS), dan *System Generalized Method of Moments* (SYS-GMM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa modal manusia secara signifikan mampu menurunkan emisi karbon melalui inovasi *green technology*.

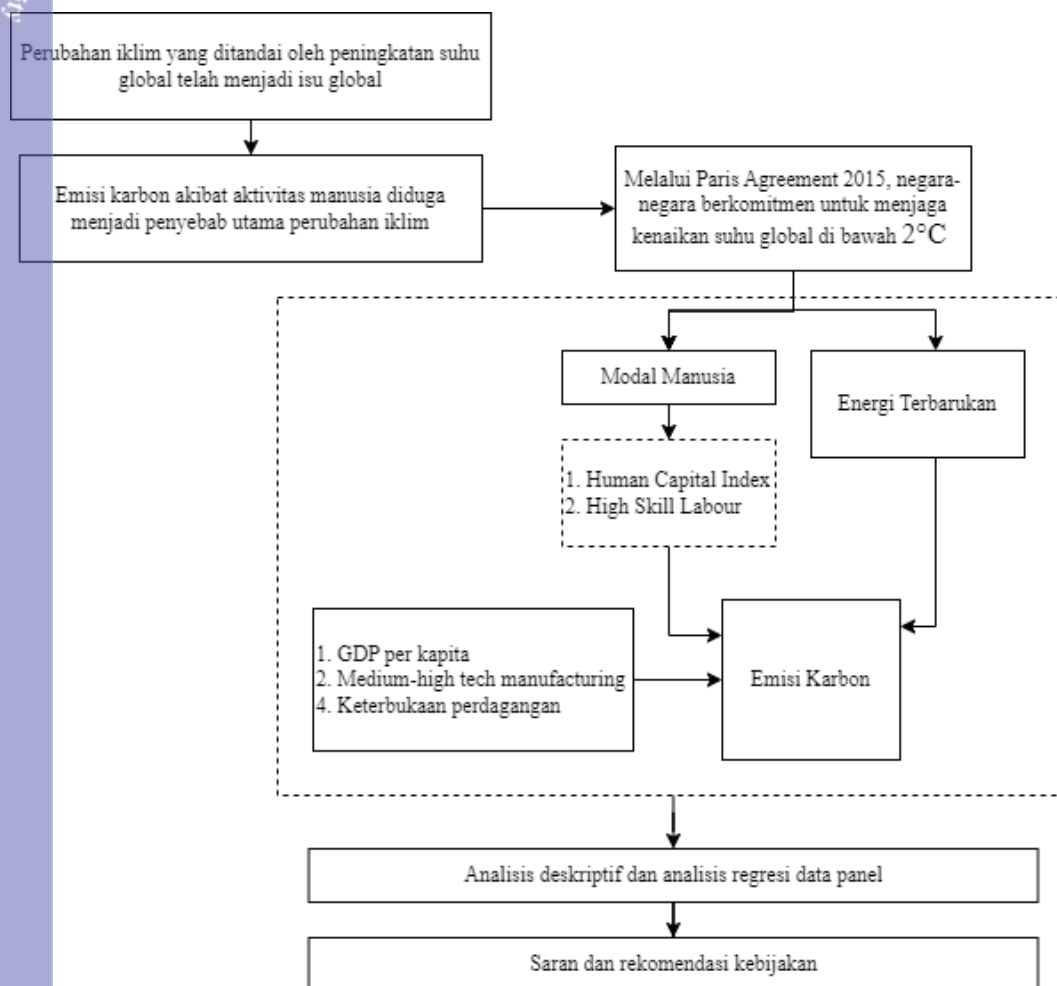
Khan (2020) dalam penelitiannya menganalisis peran modal manusia yang diukur dengan *primary, secondary, tertiary and average years of schooling* dalam hubungannya dengan pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon di 122 negara pada periode 1980-2014 dengan metode *threshold regression*. Hasil dari penelitian ini mengonfirmasi pola EKC tidak sama untuk setiap negara, melainkan bergantung pada tingkat pendidikan atau modal manusia. Temuan ini menunjukkan bahwa EKC hanya akan bekerja dengan baik jika suatu negara sudah melewati ambang batas pendidikan tertentu.

2.7 Kerangka Pemikiran

Peningkatan rata-rata suhu bumi yang terus terjadi tiap tahunnya akibat aktivitas manusia diduga sebagai penyebab utama perubahan iklim. Mengingat isu perubahan iklim telah ditetapkan menjadi isu global, setelah dilakukannya *Paris Agreement* 2015, seluruh negara di dunia terus melakukan upaya dekarbonisasi. Dikarenakan Asia merupakan kawasan dengan emitor emisi karbon terbesar, maka dari itu upaya dekarbonisasi di kawasan Asia perlu dicapai. Untuk mencapai target dekarbonisasi tersebut, transisi ke energi terbarukan dianggap mampu menekan emisi karbon. Selain itu peran modal manusia juga menjadi sangat penting. Kapasitas modal manusia yang lebih tinggi dapat mendukung pengembangan, adopsi, dan pemanfaatan teknologi ramah lingkungan secara lebih efektif. Sehingga

akan mendorong pergeseran struktur industri yang lebih modern dan mendorong pertumbuhan ekonomi sekaligus menjaga kualitas lingkungan.

Dalam penelitian ini, variabel lainnya seperti *medium-high tech manufacturing* dan tingkat keterbukaan perdagangan turut dipertimbangkan sebagai variabel kontrol yang secara teoritis mampu memengaruhi dinamika emisi karbon. Analisis deskriptif dan tipologi Klassen digunakan untuk mengetahui gambaran hubungan antara modal manusia, energi terbarukan, dan pertumbuhan ekonomi terhadap emisi karbon di 14 negara Asia. Selanjutnya, penelitian ini menggunakan analisis regresi data panel untuk menguji pengaruh modal manusia, energi terbarukan, dan pertumbuhan ekonomi terhadap emisi karbon di 14 negara Asia dengan periode analisis antara tahun 2010-2021, yang mana modal manusia dengan emisi karbon diduga memiliki hubungan non-linear yang mirip dengan hipotesis *Enviromental Kuznets Curve* (EKC). Kerangka penelitian yang digunakan untuk analisis ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Kerangka Pemikiran

2.8 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan pada penelitian -penelitian terdahulu, hipotesis penelitian yang dibangun diantaranya sebagai berikut:

1. Modal manusia diduga memiliki pengaruh positif terhadap emisi karbon.

Pada masa awal peningkatan kapaisitas modal manusia akan diikuti oleh peningkatan emisi karbon karena peningkatan kualitas sumber daya manusia pada awalnya mendorong perluasan aktivitas ekonomi, industrialisasi, dan konsumsi energi yang lebih tinggi, sehingga turut meningkatkan emisi karbon.

2. Modal manusia kuadratik diduga berpengaruh negatif terhadap emisi karbon. Pada model EKC, setelah mencapai tahap tertentu, peningkatan kapasitas modal manusia cenderung akan menurunkan emisi karbon. Hal ini dikarenakan kemampuan sumber daya manusia dalam mengadopsi maupun inovasi teknologi yang ramah lingkungan, mendorong efisiensi penggunaan energi, dan regulasi yang lebih ketat.
3. Konsumsi energi terbarukan diduga memiliki pengaruh negatif terhadap emisi karbon, yang mana energi terbarukan akan menggantikan penggunaan bahan bakar fosil sehingga efeknya langsung menekan emisi karbon.
4. GDP per kapita diduga memiliki pengaruh positif terhadap emisi karbon. Pada masa awal, peningkatan GDP per kapita mencerminkan meningkatnya aktivitas ekonomi yang cenderung meningkatkan konsumsi energi dan aktivitas industri sehingga mendorong peningkatan emisi karbon pada tahap awal pembangunan.
5. *Medium-high tech manufacturing* diperkirakan berpengaruh negatif terhadap emisi karbon, yang mana pergeseran hingga peningkatan penggunaan teknologi yang lebih modern dalam aktivitas industrinya mampu meminimalisir emisi karbon yang dihasilkan dari aktivitas industrinya.
6. Keterbukaan perdagangan diperkirakan berpengaruh positif terhadap emisi karbon, yang mana perdagangan mampu mendorong ekspansi ekonomi sehingga meningkatkan konsumsi energi dan emisi karbon.



III METODE

3.1 Jenis dan Sumber Data

Untuk melihat peran modal manusia dalam mendorong efektivitas penggunaan energi terbarukan dalam menekan emisi karbon, penelitian ini menggunakan data panel dari data *time series* tahunan 2010-2021 dan *cross section* 14 negara yang termasuk dalam kawasan Asia seperti Hong Kong (HKG), Jepang (JPN), Korea (KOR), Iran (IRN), Mongolia (MNG), Thailand (THA), Turki (TUR), Indonesia (IDN), Kamboja (KHM), Kyrgyzstan (KGZ), Pakistan (PAK), Filipina (PHL), Sri Lanka (LKA), dan Vietnam (VNM). Penelitian ini menggunakan data sekunder yang bersumber dari ILOSTAT, *Penn World Table* (PWT), dan *World Development Indicator* (WDI). *Tools* yang dipilih untuk pengolahan data pada penelitian ini diantaranya *Stata 15* dan *Microsoft Excel*. Jenis dan sumber data dapat dilihat secara lebih lanjut pada Tabel 1.

Tabel 1 Jenis dan sumber data

Variabel	Indikator	Satuan	Sumber
Emisi Karbon	Total emisi gas karbon dioksida dari aktivitas manusia di berbagai sektor	Mt CO ₂	WDI
Konsumsi Energi Terbarukan	Jumlah penggunaan energi yang bersumber dari sumber-sumber energi terbarukan terhadap konsumsi energi total.	Persen (%)	WDI
<i>Human Capital Index</i>	<i>Human capital index based on years of schooling and returns to education</i>	Indeks	PWT
<i>High Skill Labour</i>	Jumlah tenaga kerja dengan tingkat keterampilan tertinggi (<i>skill level</i> 3-4 berdasarkan klasifikasi ISCO-08)	Ribu jiwa	ILOSTAT
GDP per Kapita	GDP per capita (<i>constant</i> 2015 US\$)	USD	WDI
<i>Medium-high tech manufacturing</i>	Persentase <i>manufacturing value added</i>	Persen (%)	WDI
Keterbukaan Perdagangan	Rasio jumlah total ekspor dan impor barang serta jasa yang diukur sebagai persentase dari GDP	Persen (%)	WDI

Variabel dependen yang digunakan pada penelitian ini adalah emisi karbon, sementara variabel independen utamanya adalah modal manusia, energi terbarukan, dan pertumbuhan ekonomi. Pada penelitian ini, digunakan dua indikator untuk mengukur kapasitas modal manusia, yaitu *human capital index based on years of schooling and returns to education* dan tenaga kerja dengan tingkat keterampilan tertinggi (*skill level* 3-4 berdasarkan klasifikasi ISCO-08). Beberapa variabel kontrol turut ditambahkan pada penelitian ini seperti industrialisasi dan tingkat keterbukaan perdagangan.

3.2 Metode Analisis

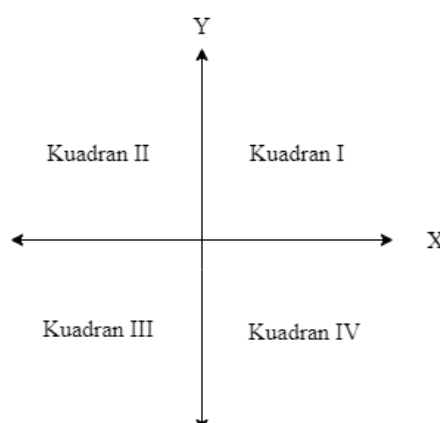
Dalam penelitian ini metode analisis yang digunakan yaitu analisis deskriptif dan kuantitatif. Analisis deskriptif digunakan dalam mendeskripsikan gambaran mengenai hubungan antara modal manusia, konsumsi energi terbarukan dan pertumbuhan ekonomi terhadap emisi karbon di negara-negara Asia yang disajikan dalam bentuk grafik maupun dalam bentuk diagram. Sementara analisis kuantitatif yang dilakukan melalui pendekatan ekonometrik dengan analisis regresi data panel digunakan untuk menganalisa pengaruh modal manusia, konsumsi energi terbarukan dan pertumbuhan ekonomi lain terhadap emisi karbon di 14 negara Asia.

3.2.1 Analisis Deskriptif

Analisis deskriptif memegang peranan penting dalam memberi gambaran awal yang sederhana namun esensial pada penelitian ini. Dalam penelitian ini analisis deskriptif bertujuan untuk memotret dinamika dari setiap variabel yang diteliti, melihat bagaimana pergerakan setiap variabel, hingga mengidentifikasi pola dan hubungan antar variabel. Melalui analisis deskriptif akan memperoleh gambaran mengenai hubungan antara modal manusia, energi terbarukan, dan pertumbuhan ekonomi terhadap emisi karbon di 14 negara Asia. Lebih dari itu, analisis ini tidak hanya terbatas pada indikator utama, melainkan juga akan turut menyertakan variabel-variabel lain yang relevan untuk membantu memberi konteks dan memperjelas temuan yang akan dibahas.

3.2.2 Tipologi Klassen

Tipologi Klassen merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi posisi masing-masing negara ke dalam 4 kuadran berdasarkan posisi relatif negara terhadap dua variabel. Pada penelitian ini variabel yang digunakan yaitu emisi karbon, modal manusia, konsumsi energi terbarukan, dan GDP per kapita. Sumbu horizontal atau sumbu X merepresentasikan emisi karbon, sedangkan sumbu vertikal atau sumbu Y merepresentasikan variabel independen utama yaitu modal manusia, energi terbarukan, dan GDP per kapita.



Gambar 9 Tipologi Klassen

Keterangan :

1. Kuadran I : menunjukkan posisi negara yang memiliki nilai X dan Y yang tinggi
2. Kuadran II : menunjukkan posisi negara yang memiliki nilai X tinggi dan Y rendah
3. Kuadran III : menunjukkan posisi negara yang memiliki nilai X rendah dan Y rendah
4. Kuadran IV : menunjukkan posisi negara yang memiliki nilai X rendah dan Y tinggi

3.2.3 Analisis Regresi Data Panel

Metode yang digunakan untuk menganalisis hubungan variabel-variabel dalam penelitian ini adalah analisis regresi data panel. Data panel adalah kombinasi dari data deret waktu dan kerat lintang, yaitu data yang mencakup beberapa individu (unit *cross-sectional*) yang diamati selama beberapa periode waktu. Data panel mengkombinasikan data *time series* dan *cross section*, membuat data panel memiliki beberapa keunggulan dibanding model lain. Jumlah observasi yang lebih besar membuat parameter yang diestimasi akan lebih akurat, mengurangi kolinearitas antar peubah, meningkatkan efisiensi karena derajat kebebasan yang semakin meningkat, serta mampu mengontrol heterogenitas individu. Firdaus (2020) menjelaskan terdapat tiga jenis pendekatan dalam model regresi data panel.

1) *Pooled Least Square* (PLS)

PLS adalah metode estimasi yang menggabungkan keseluruhan data (*pooled*) yang didapatkan, sehingga terdapat $N \times T$ observasi dengan N sebagai jumlah unit *cross section* sementara T sebagai jumlah unit *time series* (Firdaus 2020). Hal ini menjadikan pendekatan model PLS sebagai model yang paling sederhana. Model yang digunakan yaitu:

$$Y_{it} = \alpha_i + X_{it}\beta + u_{it}$$

Pada model PLS, α_i bersifat konstan untuk seluruh observasi. Penggabungan data *cross section* dan *time series* pada model PLS dapat meningkatkan derajat kebebasan sehingga hasil estimasi lebih efisien. Akan tetapi terdapat kelemahan pada pendekatan ini, yaitu dugaan parameter β akan bias karena tidak dapat membedakan observasi yang berbeda pada periode yang sama ataupun sebaliknya.

2) *Fixed Effect Model* (FEM)

FEM merupakan pendekatan yang digunakan ketika antara efek individu dan variabel penjelas memiliki korelasi dengan variabel bebas (X_{it}) atau memiliki pola yang bersifat tidak acak. Hal ini menyebabkan komponen *error* dari efek individu dan waktu menjadi bagian dari intersep (Firdaus 2020). Pendekatan ini mengasumsikan terdapat perbedaan intersep antar individu, namun *slope* pada setiap individu tidak akan berubah walaupun terdapat perubahan waktu. Dengan kata lain, setiap unit individu memiliki intersep yang berbeda tetapi nilainya dianggap tetap sepanjang periode pengamatan (Firdaus 2020). Terdapat

dua asumsi pada model ini, yaitu:

$$\text{One way komponen error: } y_{it} = \alpha_i + \lambda_i + X_{it}\beta + u_{it}$$

$$\text{Two way komponen error: } y_{it} = \alpha_i + \lambda_i + \mu_i + X_{it}\beta + u_{it}$$

3) Random Effect Model

REM digunakan ketika antara efek individu dan variabel bebas (*regressor*) tidak memiliki korelasi. Pada pendekatan ini komponen *error* dari efek individu dan waktu dimasukkan ke dalam error (Firdaus 2020). Asumsi pada model ini yaitu:

$$\text{One way komponen error: } y_{it} = \alpha_i + X_{it}\beta + u_{it} + \lambda_i$$

$$\text{Two way komponen error: } y_{it} = \alpha_i + X_{it}\beta + u_{it} + \lambda_i + \mu_i$$

3.2.4 Pemilihan Model Terbaik

Dalam memilih model terbaik dari ketiga pendekatan *Pooled Least Square* (PLS), *Fixed Effect Model* (FEM), *Random Effect Model* (EEM), perlu dilakukan pengujian sebagai berikut:

1) Uji Chow

Merupakan uji yang digunakan untuk menentukan model yang paling sesuai antara *Pooled Least Square* (PLS) atau *Fixed Effect Model* (FEM) dengan melihat residual pada model. Dalam uji ini dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

$$H_0 : \text{Pooled Least Square (PLS), prob} \geq 0.05$$

$$H_1 : \text{Fixed Effect Model (FEM), prob} < 0.05$$

Penolakan terhadap hipotesis nol didasarkan pada nilai *chi-square cross section*. Jika nilai *chi-square cross section* < 0.05 maka tolak hipotesis nol dan model yang digunakan adalah *Fixed Effect Model* (FEM). Sebaliknya jika nilai *chi-square cross section* ≥ 0.05 maka tidak tolak hipotesis nol dan model yang dipilih adalah *Pooled Least Square* (PLS).

2) Uji Hausman

Merupakan uji yang digunakan untuk menentukan model yang paling sesuai antara *Fixed Effect Model* (FEM) atau *Random Effect Model* (REM) dengan melihat ada atau tidaknya korelasi pada *error term*. Dalam uji ini dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

$$H_0 : \text{Random Effect Model (REM), prob} \geq 0.05$$

$$H_1 : \text{Fixed Effect Model (FEM), prob} < 0.05$$

Dasar penolakan hipotesis nol menggunakan *p-value*. Jika nilai *p-value* $<$ taraf nyata 5 persen maka tolak hipotesis nol sehingga model yang digunakan adalah *Fixed Effect Model* (FEM), dan begitu sebaliknya.

3) Uji Lagrange Multiplier (LM)

Merupakan uji yang digunakan untuk menentukan model yang paling sesuai antara *Pooled Least Square* (PLS) atau *Random Effect Model* (REM) dengan menguji signifikansi varian dari efek individu

dalam model *Random Effect Model* (REM). Dalam uji ini dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

H_0 : *Pooled Least Square* (PLS), $\text{prob} \geq 0.05$

H_1 : *Random Effect Model* (REM), $\text{prob} < 0.05$

Terjadi penolakan H_0 ketika nilai LM statistik lebih besar dari nilai *chi-square*, maka model yang digunakan adalah *Random Effect Model* (REM), begitupun sebaliknya.

3.2.5 Uji Asumsi Klasik

Dalam memastikan bahwa model regresi yang digunakan telah memenuhi asumsi Gauss-Markov, yaitu model memiliki sifat BLUE (*Best Linier Unbiased Estimation*), perlu dilakukan beberapa pengujian terhadap asumsi klasik yang mencakup:

1) Uji Normalitas

Uji normalitas digunakan untuk mengetahui apakah distribusi residual atau *error* dalam suatu model regresi mengikuti pola distribusi normal. Pemenuhan asumsi ini penting karena ketidaknormalan distribusi *error* dapat menyebabkan hasil estimasi menjadi tidak valid, serta meningkatkan risiko kesalahan dalam interpretasi statistik. Oleh sebab itu, pengujian normalitas residual menjadi salah satu langkah penting dalam memastikan keandalan dan validitas model yang digunakan dalam penelitian. Salah satu metode yang umum digunakan untuk menguji normalitas adalah dengan menggunakan statistik Jarque-Bera (JB). Hipotesis yang digunakan sebagai berikut:

H_0 : Residual terdistribusi secara normal

H_1 : Residual terdistribusi tidak normal

2) Uji Heteroskedastisitas

Heteroskedastisitas terjadi ketika nilai variansi dari residual tidak memiliki nilai yang sama. Hal ini melanggar asumsi dasar dari regresi linear klasik yang seharusnya nilai variansi dari residual bersifat konstan atau yang disebut dengan homoskedastisitas. Sehingga masalah heteroskedastisitas dapat berdampak pada dugaan dari parameter koefisien hasil regresi dengan metode OLS tetap tidak bias dan masih konsisten tetapi memiliki *standard error* yang bias ke bawah. Uji White dan uji Breusch-Pagan bisa digunakan untuk mendeteksi apakah terjadi heteroskedastisitas pada hasil estimasi. Adapun hipotesis yang digunakan sebagai berikut:

H_0 : Variansi galat bersifat homoskedastisitas

H_1 : Variansi galat bersifat heteroskedastisitas

Jika nilai probabilitas lebih besar dari taraf nyata 5 persen, maka hipotesis nul tidak dapat ditolak atau tidak ada gejala heteroskedastisitas, begitupun sebaliknya. Akan tetapi, apabila model memiliki masalah heteroskedastisitas, penanganan dapat dilakukan dengan *robust standard error*.

3) Uji Autokorelasi

Autokorelasi terjadi ketika adanya korelasi antara residual dalam observasi. Autokorelasi dapat mengakibatkan pendugaan parameter tidak bias dan konsisten tetapi memiliki *standard error* yang bias ke bawah sehingga nilai uji-t tinggi dan estimasi menjadi tidak efisien. Terdapat beberapa uji untuk mendeteksi ada atau tidaknya autokorelasi dalam model, antara lain uji Breusch-Godfrey, uji Q Box-Pierce dan Durbin Watson. Adapun hipotesis yang digunakan sebagai berikut:

H_0 : Tidak terdapat autokorelasi

H_1 : Terdapat autokorelasi

Apabila hasil dari uji menunjukkan bahwa model memiliki masalah autokorelasi, maka penanganannya dapat dilakukan dengan *robust standard error*.

3.2.6 Uji Kriteria Statistik

Uji kriteria statistik dilakukan untuk memastikan baik atau tidaknya model dan pengaruh signifikan dari setiap variabel observasi. Adapun pengujian yang dilakukan diantaranya mencakup:

1) Uji Koefisien Determinasi (R^2)

Indikator ini menunjukkan seberapa baik model yang diperoleh bersesuaian dengan data aktual (*goodness of fit*). R^2 mengukur berapa persentase variasi dalam variabel dependen mampu dijelaskan oleh variasi dalam variabel independen. Nilai R^2 berkisar antara 0 dan 1, bila R^2 mendekati 1 artinya model semakin baik (*fit*).

2) Uji F-statistik

Uji ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana variabel independen secara simultan memengaruhi variabel dependen. Hipotesis yang digunakan dalam uji ini yaitu:

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ (tidak ada variabel independen yang memengaruhi variabel dependen)

$H_1 : \text{minimal } \forall \beta_i \neq 0$ (sekurang-kurangnya satu variabel independen ke- i memengaruhi variabel dependen)

Jika $F\text{-hitung} < F\text{-tabel}$, maka H_0 tidak dapat ditolak artinya variabel-variabel independen secara simultan tidak berpengaruh terhadap variabel dependen. Jika $F\text{-hitung} > F\text{-tabel}$, maka H_0 ditolak artinya variabel-variabel independen secara simultan berpengaruh terhadap variabel dependen.

3) Uji t-statistik

Uji t digunakan untuk mengetahui signifikansi variabel independen terhadap variabel dependen secara parsial. Adapun hipotesis yang digunakan dalam uji ini yaitu:

$H_0 : \beta_1 = 0$ (variabel independen ke- i tidak berpengaruh terhadap variabel dependen)

$H_1 : \beta_1 \neq 0$ (variabel independen ke- i berpengaruh terhadap variabel dependen)

Dalam uji ini, H_0 tidak dapat ditolak jika $T\text{-hitung} < T\text{-tabel}$ serta nilai signifikansi > 0.05 artinya variabel independen tidak berpengaruh

terhadap variabel dependen. Sementara H_0 ditolak jika $T\text{-hitung} > T\text{-tabel}$ serta nilai signifikansi < 0.05 , artinya variabel independen berpengaruh terhadap variabel dependen.

3.3 Model Penelitian

Dalam menganalisa dampak modal manusia terhadap emisi karbon, model yang digunakan dalam penelitian ini dikembangkan berdasarkan kerangka *Environmental Kuznets Curve* (EKC) yang secara spesifik untuk menguji adanya hubungan *non-linear* antara modal manusia dengan emisi karbon. Model yang digunakan dalam penelitian ini mengadopsi dari persamaan yang digunakan dalam penelitian Gnangoin *et al.* (2022). Adapun model persamaan regresi data panel dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Model 1:

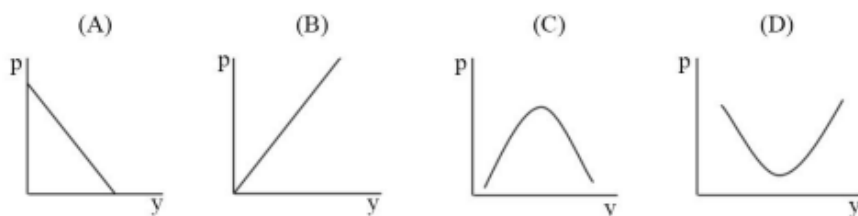
$$\ln(CO2)_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(HCI)_{it} + \beta_2 \ln(HCI)_{it}^2 + \beta_3 REN_{it} + \beta_4 \ln(GDP)_{it} + \beta_5 MHT_{it} + \beta_6 TRADE_{it} + \varepsilon_{it} \dots \dots \dots (1)$$

Model 2

$$\ln(CO2)_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(HSL)_{it} + \beta_2 \ln(HSL)_{it}^2 + \beta_3 REN_{it} + \beta_4 \ln(GDP)_{it} + \beta_5 MHT_{it} + \beta_6 TRADE_{it} + \varepsilon_{it} \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

$\ln(CO2)_{it}$	: Logaritma natural emisi karbon negara i pada tahun ke-t
REN_{it}	: Konsumsi energi terbarukan negara i pada tahun ke-t
$\ln(HCI)_{it}$	: Logaritma natural <i>human capital index based on years of schooling and returns to education</i> negara i pada tahun ke-t
$\ln(HSL)_{it}$	: Logaritma natural proporsi jumlah <i>high skill labour</i> terhadap populasi negara i pada tahun ke-t
$\ln(GDP)_{it}$	: Logaritma natural GDP per kapita negara i pada tahun ke-t
MHT_{it}	: Persentase <i>medium high tech manufacturing value added</i> negara i pada tahun ke-t
$TRADE_{it}$	: Tingkat keterbukaan perdagangan negara i pada tahun ke-t
$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_6$	: Koefisien intersep
i	: 14 negara-negara Asia
t	: Tahun (2010-2021)
ε_{it}	: <i>Error term</i>



Gambar 10 Kurva hasil regresi (Ginting *et al.* 2023)

Kurva A menunjukkan pola hubungan jika $\beta_1 < 0$ dan $\beta_2 = 0$, akan muncul hubungan yang menurun antara tingkat emisi karbon dengan pendapatan perkapita. Kurva B menunjukkan pola hubungan jika $\beta_1 > 0$ dan $\beta_2 = 0$, akan muncul hubungan yang bersifat meningkat antara tingkat emisi karbon dengan pendapatan perkapita. Kurva C menunjukkan pola hubungan jika $\beta_1 > 0$ dan $\beta_2 < 0$, menunjukkan pola antara emisi karbon dan pendapatan perkapita yang berbentuk *inverted U-shaped* atau EKC. Kurva D apabila $\beta_1 < 0$ dan $\beta_2 > 0$, menunjukkan pola yang berbentuk U antara emisi karbon dan pendapatan perkapita.

Dalam penelitian ini, digunakan dua pendekatan model regresi data panel untuk menganalisis pengaruh energi terbarukan dan modal manusia serta faktor lainnya terhadap emisi karbon di negara-negara Asia. Model 1 merupakan model regresi yang dalam mengukur kapasitas modal manusia menggunakan *Human Capital Index* (HCI) *based on years of schooling and returns to education*. Sementara dalam model 2, untuk mengukur kapasitas modal manusia menggunakan jumlah *high skill labour* (HSL) yang secara umum diisi oleh tiga kelompok utama yang mencakup pekerjaan dengan tingkat keterampilan tertinggi (*skill level* 3-4) seperti kelompok profesional, teknisi, hingga manajer. Pengelompokan tersebut mengacu pada standar pengelompokan ISCO-08 (*International Standard Classification of Occupations 2008*) oleh ILO (2008). Penggunaan HCI dan HRST merupakan dua pendekatan yang digunakan untuk mengukur kapasitas modal manusia, akan tetapi HCI lebih berfokus pada kualitas pendidikan secara umum, sedangkan HSL mencerminkan kapasitas tenaga kerja yang secara langsung terlibat dalam bidang sains dan teknologi. Dengan membandingkan hasil estimasi dari kedua model, hasil dari penelitian ini dapat mengetahui karakteristik modal manusia seperti apa yang mampu menekan emisi karbon sekaligus untuk menguji konsistensi arah dan signifikansi pengaruh modal manusia terhadap emisi karbon.

3.4 Definisi Operasional

1. Emisi karbon dioksida (CO₂) merupakan variabel yang mengukur total emisi gas karbon dioksida dari aktivitas manusia di berbagai sektor.
2. *Human Capital Index* (HCI) mengukur kualitas modal manusia suatu negara berdasarkan rata-rata lama sekolah (*average years of schooling*) dan tingkat pengembalian pendidikan (*returns to education*). Indeks ini mencerminkan seberapa besar akumulasi pendidikan berkontribusi terhadap produktivitas tenaga kerja, semakin tinggi nilai HCI mengindikasikan mengindikasikan kualitas modal manusia yang lebih baik.
3. *Human Skill Labour* (HSL) merupakan variabel yang mengukur proporsi jumlah tenaga kerja yang memiliki pendidikan tinggi sekaligus bekerja di bidang sains dan teknologi terhadap populasi suatu negara. Indikator ini mencerminkan kapasitas sumber daya manusia suatu negara dalam mendukung aktivitas inovasi, riset, dan pengembangan teknologi rendah karbon.
4. Konsumsi energi terbarukan (REN) merupakan variabel yang merepresentasikan jumlah penggunaan energi yang bersumber dari sumber-sumber terbarukan terhadap total konsumsi energi final suatu negara. Sumber energi terbarukan yang dimaksud mencakup energi air (*hydropower*), energi surya, energi angin, energi panas bumi, serta biomassa dan limbah.

5. GDP per kapita (GDP) merupakan total penghasilan suatu negara dibagi dengan jumlah seluruh penduduk yang menggambarkan ukuran kesejahteraan.
6. *Medium-high tech manufacturing* (MHT), merupakan variabel yang digunakan untuk mengukur tingkat industrialisasi suatu negara.
7. Keterbukaan perdagangan (TRADE) merupakan variabel yang mencerminkan tingkat integrasi ekonomi dalam sistem perdagangan global yang diukur melalui rasio jumlah total ekspor dan impor barang serta jasa yang diukur sebagai persentase dari GDP.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Deskriptif

Analisis deskriptif menampilkan hasil statistik deskriptif dari seluruh variabel observasi di 14 negara Asia pada periode 2010-2021. Analisis ini bertujuan untuk memahami karakteristik distribusi data selama periode observasi. Dikarenakan keterbatasan ketersediaan data pada variabel tertentu di tahun dan negara tertentu, menyebabkan jumlah observasi antar variabel dalam penelitian ini tidak seragam. Meskipun adanya *missing values* pada beberapa variabel, penelitian ini tidak melakukan proses imputasi terhadap data yang kosong dengan tujuan untuk menjaga keaslian dan objektivitas data yang digunakan. Keputusan untuk tidak melakukan proses imputasi pada data yang kosong didasarkan pada prinsip transparansi dan keaslian data sekunder yang disarankan oleh Schafer dan Graham (2002) dan Little dan Rubin (2020). Selengkapnya untuk deskriptif statistik dari tiap variabel disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Deskriptif statistik variabel penelitian

Variabel	Obs	Mean	Std. dev	Min	Max
ICO ₂	168	4.815	1.625	1.640	7.188
IHSL	161	8.021	1.271	5.480	9.635
IHCI	168	0.977	0.214	0.510	1.334
IGDP	168	22.62	19.08	0.1	65
REN	168	8.571	1.156	6.869	10.72
MHT	168	30.06	8.664	5.989	46.23
TRADE	163	102.6	92.02	24.70	442.62

Sumber: ILOSTAT, Penn World Table, World Development Indicator (diolah dengan STATA 15)

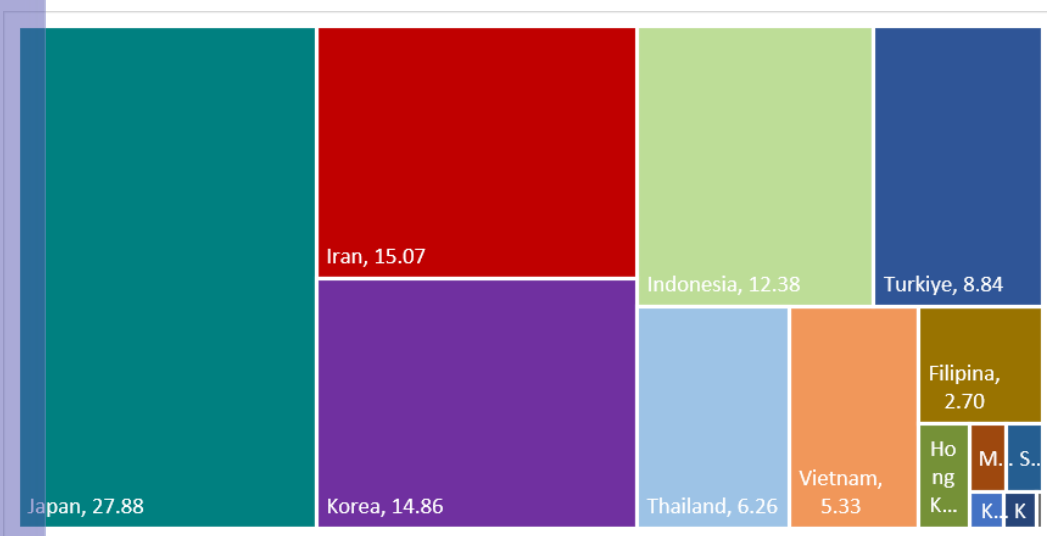
Standar deviasi mengukur seberapa besar tingkat variasi data terhadap rata-ratanya. Standar deviasi yang tinggi menandakan keragaman yang lebih besar dan semakin jauh nilai-nilai tersebut dari rata-rata. Sebaliknya, standar deviasi yang semakin rendah nilainya menunjukkan nilai-nilai data lebih mendekati rata-ratanya.

Berdasarkan Tabel 2, rata-rata tingkat emisi karbon yang dihasilkan di seluruh 14 negara Asia yang diamati dalam penelitian ini sebesar 4,815 Mt dengan standar deviasi sebesar 1,625 Mt, yang mengindikasikan penyebaran data yang tidak terlalu berbeda antar negara. Nilai tersebut mencerminkan bahwa tingkat emisi karbon yang tidak jauh berbeda antar negara di Asia. Di antara 14 negara Asia yang diamati dalam penelitian ini, 27,88 persen emisi karbon di 14 negara tersebut bersasal dari Jepang. Disusul oleh Iran dengan kontribusi sebesar 15,07 persen, Korea 14,86 persen, Indonesia 12,38 persen, lalu Turki 8,84 persen. Jika diakumulasikan, 79,03 persen emisi karbon dari 14 negara Asia yang diamati bersumber dari kelima negara tersebut. Sementara negara lain seperti Mongolia, Pakistan, Sri Lanka, total emisi karbon yang dihasilkan selama periode 2010-2021 di bawah 1 persen.

Perbedaan tersebut didorong karena adanya perbedaan skala aktivitas ekonomi hingga struktur ekonomi tiap negara. Selama periode analisis 2010-2021, Jepang merupakan kontributor emisi karbon tertinggi dibanding 13 negara lainnya.

Tingginya emisi karbon yang dihasilkan oleh Jepang dikarenakan negara tersebut merupakan basis manufaktur terbesar ketiga di dunia setelah China dan Amerika Serikat seperti *automotive*, *steel/metal*, *chemical*, dan *semiconductor/electronics industry* yang seluruh aktivitasnya membutuhkan energi yang intensif. Selain karena perbedaan struktur ekonomi, tingginya emisi karbon di Jepang sebagai imbas langsung dari gempa dan tsunami yang melanda Jepang di tahun 2011 yang merusak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Fukushima Daiichi. Sebagai akibatnya, terjadi penghentian operasional PLTN sehingga menstimulus peningkatan emisi karbon. Peningkatan tersebut dikarenakan sebelum bencana tahun 2011, energi nuklir menyumbang sekitar 25,1 persen dari total pembangkitan listrik di Jepang. Namun, angka ini merosot tajam menjadi hanya 1,5 persen pada tahun 2012. Untuk menggantikan energi nuklir yang hilang, Jepang beralih secara masif dengan mengimpor bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas untuk kebutuhan pembangkit listrik. Penggunaan bahan bakar fosil tersebut pada akhirnya menyebabkan peningkatan emisi karbon hingga tahun 2013 (Cong *et al.* 2025).

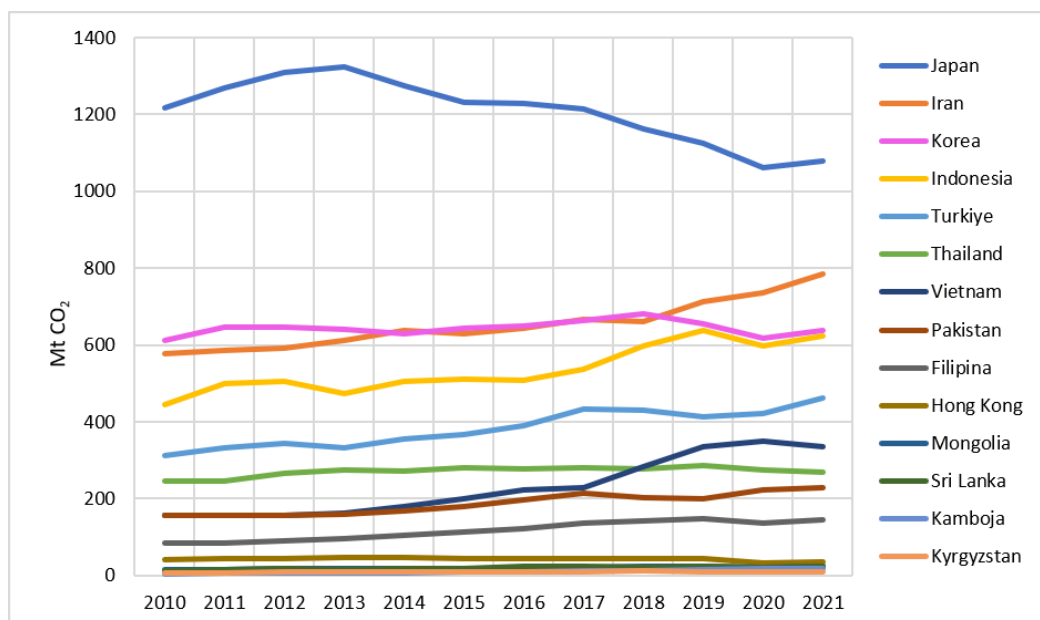
Sementara itu, negara-negara seperti Mongolia, Pakistan, Sri Lanka struktur ekonominya masih didominasi oleh sektor pertanian, tekstil/manufaktur ringan, dan sektor informal yang kebutuhan akan energinya jauh lebih rendah per unit output. Sehingga total volume konsumsi energinya jauh lebih rendah meskipun ketergantungan fosilnya sama-sama tinggi. Selain itu menurut Giannakis dan Zittis (2021) jika negara tidak memiliki industri manufaktur atau pertanian skala besar yang padat emisi, maka total emisi nasionalnya akan jauh lebih rendah dibandingkan negara-negara dengan industri besar.



Gambar 11 Persentase rata-rata kontribusi emisi karbon 14 negara Asia tahun 2010-2021 (diolah dari World Development Indicator, 2026)

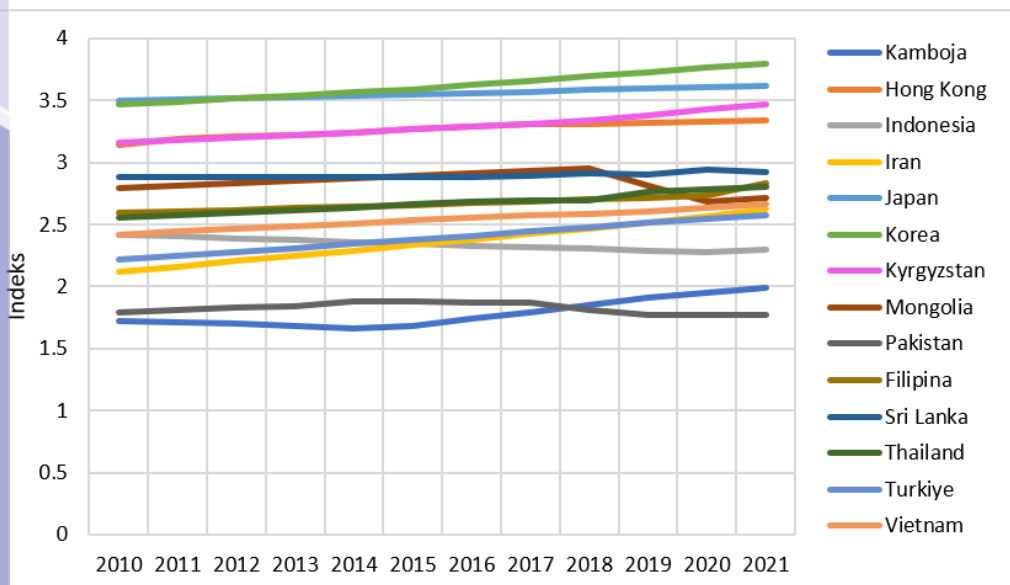
Berdasarkan tren perkembangan emisi karbon di kawasan Asia, secara keseluruhan menunjukkan tren peningkatan emisi karbon di hampir seluruh negara yang diamati. Peningkatan ini terjadi karena efek dari peningkatan jumlah penduduk dan pertumbuhan *gross domestic product* (GDP), kedua hal tersebut merupakan indikator ekonomi dan demografi utama yang secara langsung memengaruhi permintaan energi. Industrialisasi dan urbanisasi yang pesat di wilayah ini juga menjadi faktor yang memperburuk emisi karena keduanya

meningkatkan aktivitas ekonomi yang *energy insentive* (Hamedani dan Talebi 2025). Akan tetapi berbeda dengan negara lain, setelah tahun 2013 emisi karbon di Jepang justru cenderung menurun. Hal tersebut dikarenakan Jepang mulai meningkatkan produksi energi terbarukan dan menurunkan penggunaan energi secara total (Cong *et al.* 2025).



Gambar 12 Perkembangan emisi karbon di 14 negara Asia tahun 2010-2021 (diolah dari World Development Indicator, 2026)

Gambar 13 menunjukkan bahwa *Human Capital Index* (HCI) di 14 negara Asia berkisar antara 1.5-3.8 sepanjang periode analisis 2010-2021. Jika melihat perkembangannya, kapasitas modal manusia yang diukur melalui *Human Capital Index* (HCI) cenderung stabil dan meningkat di 14 negara Asia disepanjang periode analisis. Korea dan Jepang mencatat nilai HCI tertinggi yang mendekati 3,8 pada 2021, sementara Pakistan dan Kamboja berada di posisi terendah sekitar 1.7-2. Negara-negara dengan nilai HCI yang tinggi berimplikasi bahwa negara-negara tersebut telah memiliki pondasi yang kuat sebagai basis dalam membentuk tenaga ahli yang professional di bidang sains dan teknologi.



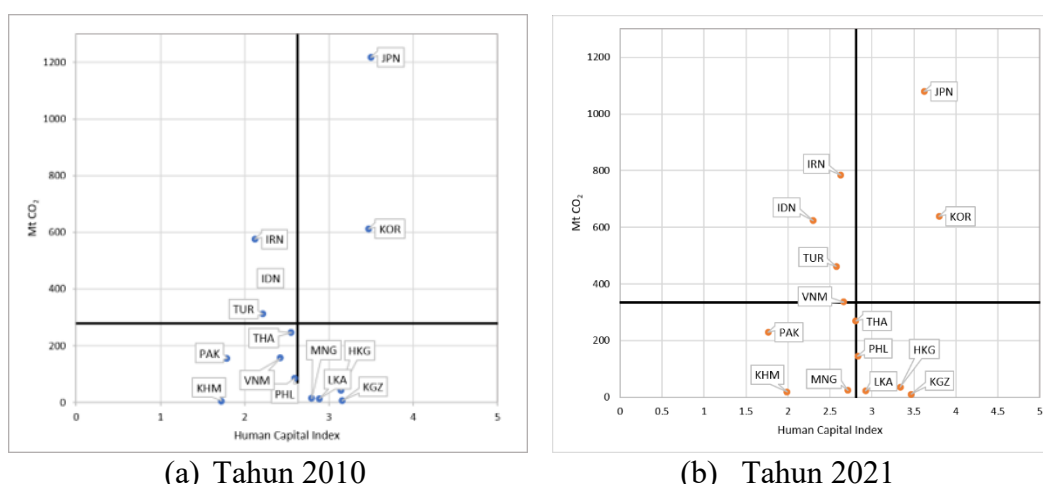
Gambar 13 Perkembangan *human capital index* di 14 negara Asia tahun 2010-2021 (diolah dari Penn World Table, 2026)

Berdasarkan analisis diagram kartesius terkait hubungan antara *human capital index* dengan emisi karbon seperti yang terlihat pada Gambar 14, negara seperti Jepang dan Korea secara konsisten berada di kuadran I dengan emisi tinggi dan HCI yang turut tinggi pula. Artinya meskipun nilai HCI di kedua negara tersebut tinggi, akan tetapi tingkat emisi di kedua negara tersebut juga tinggi karena struktur industri di negara tersebut yang padat energi. Hal tersebut mengindikasikan pola pembangunan yang belum sepenuhnya hijau. Temuan ini pun menjelaskan bahwa kapasitas modal manusia yang tinggi tidak serta merta akan menurunkan emisi karbon jika struktur perekonomiannya masih didominasi oleh industri padat energi. Negara-negara dengan HCI rendah seperti Iran, Indonesia, dan Turki juga tetap berada di kuadran II dengan emisi tinggi dan HCI yang rendah, dengan tren emisi yang cenderung meningkat dari 2010 ke 2021. Kombinasi antara nilai HCI yang rendah dan emisi yang tinggi mencerminkan bahwa skala ekonomi dan aktivitas industri berjalan lebih cepat dibanding peningkatan kapasitas modal manusia. Selain itu, kapasitas modal manusia yang masih rendah di negara-negara tersebut turut mengindikasikan bahwa kesadaran akan lingkungan yang masih rendah.

Negara-negara yang menempati Kuadran III menunjukkan karakteristik kapasitas modal manusia yang rendah sekaligus tingkat emisi karbon yang rendah. Kondisi ini mencerminkan bahwa kapasitas modal manusia di negara-negara tersebut belum mencapai level yang memadai untuk mendorong transformasi struktural menuju aktivitas ekonomi bernilai tambah tinggi. Sebagai akibatnya, aktivitas industri hingga konsumsi energi per unit output di negara-negara ini pun masih berada pada level yang relatif rendah, yang berkorelasi pada rendahnya emisi karbon yang dihasilkan. Pola ini konsisten dengan hipotesis EKC, yang mana negara-negara yang masih berada pada tahap awal pembangunan ekonomi cenderung menghasilkan emisi yang rendah secara absolut, bukan karena efisiensi teknologi melainkan karena skala aktivitas ekonominya yang belum berkembang. Pada tahun 2010 kuadran III ditempati oleh Pakistan, Kamboja, Thailand, Vietnam,

dan Filipina, akan tetapi di 2021 hanya Pakistan dan Kamboja yang konsisten berada di kuadran ini. Sementara Vietnam, Thailand, dan Filipina, ketiganya mengalami peningkatan HCI, tapi hanya Vietnam yang diikuti oleh kenaikan emisi yang signifikan, sementara Thailand dan Filipina berhasil menaikkan HCI tanpa lonjakan emisi yang sebanding.

Sementara itu, pada tahun 2010 negara-negara yang menempati Kuadran IV, yaitu Mongolia, Hong Kong, Kyrgyzstan, dan Sri Lanka, menunjukkan bahwa akumulasi modal manusia yang tinggi beriringan dengan tingkat emisi karbon yang rendah. Rendahnya emisi Hong Kong mencerminkan struktur ekonominya yang didominasi aktivitas rendah karbon. Sehingga akumulasi modal manusia yang berkualitas tidak serta-merta mendorong peningkatan emisi. Sementara itu tingkat emisi yang rendah di Mongolia, Kyrgyzstan, dan Sri Lanka dikarenakan aktivitas ekonomi dan industrinya masih rendah. Akan tetapi di 2021, Mongolia bergeser ke kuadran III, hal tersebut terjadi karena terjadi peningkatan rata-rata Human Capital Index (HCI) di seluruh negara yang dianalisis.

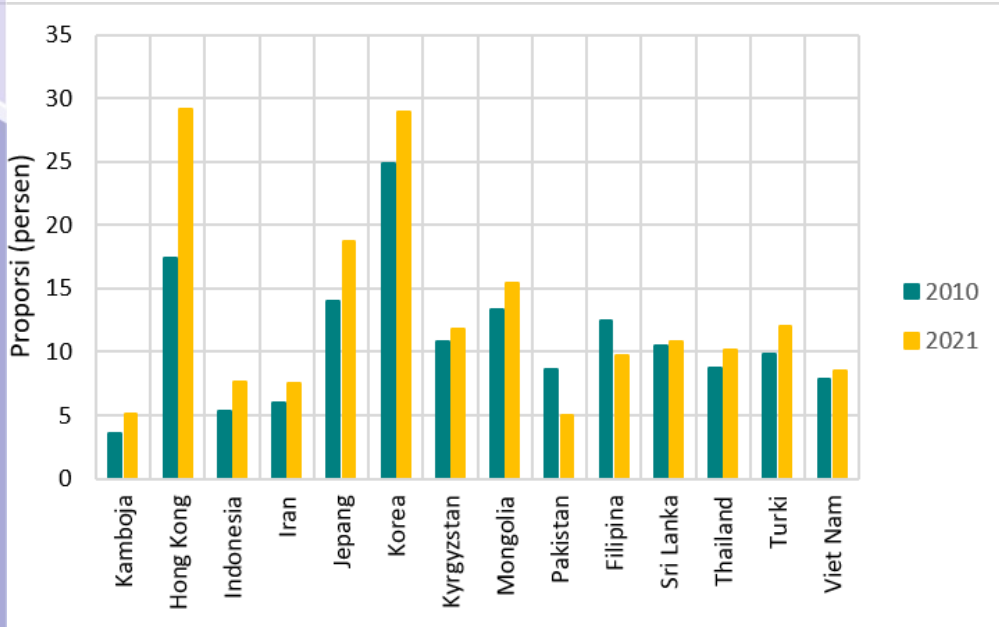


(a) Tahun 2010

(b) Tahun 2021

Gambar 14 Plot hubungan antara *human capital index* dengan emisi karbon pada 14 negara Asia (diolah dari Penn World Table, World Development Indicator, 2026)

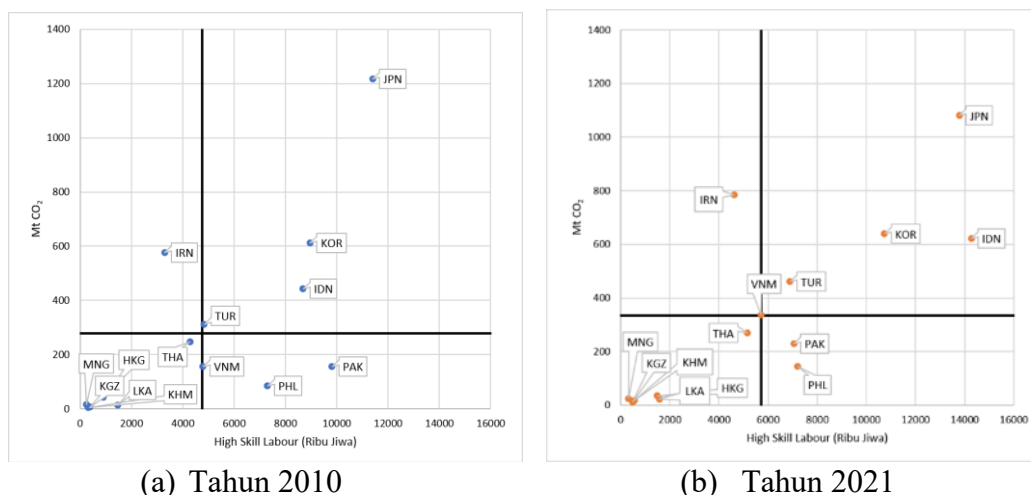
Pada penelitian ini turut digunakan jumlah *high skill labour* atau tenaga kerja dengan keterampilan tertinggi untuk menangkap kapasitas modal manusia. *High skill labour* atau tenaga kerja yang memiliki keterampilan tinggi merupakan modal dasar bagi suatu negara dalam menciptakan pembangunan ekonomi. Berdasarkan pengelompokan oleh *International Labour Organization* (ILO) yang mengacu pada klasifikasi ISCO-08. *High skill labour* mencakup kelompok tenaga kerja dengan *skill level* 3-4, yang mana terdiri dari Manajer, Profesional, hingga Teknisi. Jika mengacu pada gambar 9, terjadi peningkatan jumlah tenaga kerja terampil antara tahun 2010 dengan 2021. Hong Kong, Korea, dan Jepang merupakan 3 negara dengan pertumbuhan jumlah *high skill labour* tertinggi dibanding 11 negara lainnya selama periode analisis 2010-2021.



Gambar 15 Perkembangan proporsi jumlah *high skill labour* terhadap populasi usia produktif tahun 2010-2021 (diolah dari ILOSTAT, 2026)

Sementara di Pakistan justru terjadi hal yang sebaliknya, kondisi tersebut dikenal dengan fenomena *brain drain* yaitu pelarian modal manusia atau migrasi besar-besaran sumber daya manusia berpendidikan tinggi, kaum intelektual, atau tenaga kerja terampil ke negara lain. Fenomena *brain drain* di Pakistan terjadi karena beberapa faktor. Mulai dari faktor ekonomi, seperti kurangnya peluang kerja dan gaji rendah, ketidakstabilan ekonomi akibat masalah devaluasi mata uang, inflasi, sistem perpajakan yang memberatkan. Kedua, ketidakstabilan politik dan keamanan turut mendorong terjadinya *brain drain*. Di Pakistan, bekerja atau tinggal di luar negeri terutama di negara Barat sering dianggap sebagai simbol kesuksesan dan status sosial yang tinggi (Shah *et al.* 2023). Begitu pun dengan Filipina yang turut mengalami brain drain, walaupun porsinya lebih rendah dibanding dengan Pakistan. Studi yang dilakukan oleh Boston Consulting Group pada tahun 2018, di Filipina, hingga 75 persen dari tenaga kerja yang berpartisipasi dalam survei menyatakan kesediaan untuk bekerja di luar negeri. Negara seperti Kanada, Australia, dan Amerika Serikat merupakan tiga negara tujuan utama para kandidat ingin bekerja di luar negeri. Sementara Indonesia merupakan satu-satunya negara Asia Tenggara yang memiliki tenaga kerja dengan kemauan bekerja di luar negeri di bawah rata-rata global, hanya 51 persen pada 2018. Jepang, Amerika Serikat, dan Australia menjadi tiga tujuan utama dalam hal pilihan negara tujuan kerja yang diinginkan.

Hubungan antara *high skill labour* dengan emisi karbon secara lebih lanjut dianalisis pada Gambar 16 di bawah. Yang mana rata-rata jumlah *high skill labour* meningkat dari yang awalnya 4.764 ribu jiwa menjadi 5.705 ribu jiwa di tahun 2021.



(a) Tahun 2010

(b) Tahun 2021

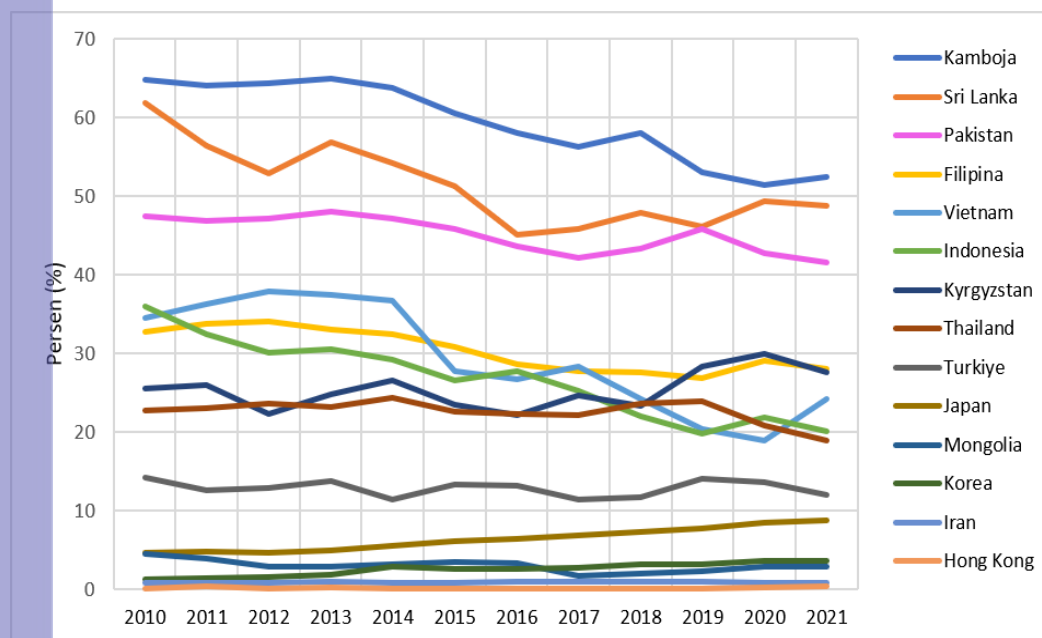
Gambar 16 Plot hubungan antara jumlah *high skill labour* dengan emisi karbon pada 14 negara Asia (diolah dari ILOSTAT, World Development Indicator, 2026)

Secara umum, Jepang, Korea, dan Indonesia tetap berada di kuadran I, yaitu kuadran dengan jumlah *high skill labour* tinggi dan emisi yang tinggi. Akan tetapi sepanjang periode analisis, Jepang menunjukkan pergerakan dengan jumlah *high skill labour* yang meningkat diikuti dengan penurunan emisi. Berbeda dengan Indonesia dan Korea, yang mana peningkatan jumlah *high skill labour* diikuti oleh peningkatan emisi. Begitu pun dengan Turki, di tahun 2021 posisi Turki bergeser semakin jelas ke kuadran I yang mana pada tahun tersebut peningkatan jumlah *high skill labour* diikuti oleh peningkatan emisi karbon.

Sepanjang periode analisis, Iran konsisten menempati kuadran II dengan peningkatan yang terus terjadi baik itu jumlah *high skill labour* maupun jumlah emisinya. Sementara itu, negara dengan jumlah sumber daya yang terbatas seperti Mongolia, Kyrgyzstan, Kamboja, Sri Lanka, Thailand, dan Hong Kong tetap berada di kuadran III sepanjang periode analisis. Berbeda dengan Vietnam yang awalnya di tahun 2010 masih berada di kuadran III, di 2021 posisi Vietnam justru bergeser diantara perbatasan kuadran I, II, III, dan IV, kondisi ini mengindikasikan bahwa langka Vietnam yang akan diambil di tahun-tahun berikutnya dapat menentukan posisi Vietnam, apakah akan bergeser ke kuadran I atau kuadran lainnya. Begitu pun dengan Filipina dan Pakistan yang tetap berada di kuadran IV. Kuadran ini dianggap paling ideal, dikarenakan negara-negara di kuadran IV ini memiliki tenaga kerja terampil yang relatif besar namun emisinya tetap rendah. Akan tetapi, jika melihat pada struktur ekonomi di negara-negara tersebut, secara umum struktur ekonominya belum sepenuhnya bertumpu pada industri padat energi. Meskipun akumulasi jumlah tenaga kerja terampil cukup besar, akan tetapi kedua negara tersebut masih mengandalkan sektor jasa, agribisnis, dan pariwisata sebagai penggerak pertumbuhan ekonominya, sehingga intensitas karbon per unit output ekonominya relatif rendah dibandingkan negara-negara di Kuadran I. Dengan demikian, posisi negara di Kuadran IV mengindikasikan bahwa akumulasi modal manusia berpotensi menjadi instrumen transisi menuju pembangunan ekonomi yang rendah karbon apabila didukung oleh kebijakan energi dan struktur sektoral yang tepat.

Penggunaan energi terbarukan di 14 negara Asia antara tahun 2010 dengan 2021 menunjukkan tren yang beragam dan fluktuatif tiap negara. Berbeda dengan negara lain, penggunaan energi terbarukan di Kamboja saat ini berada di persimpangan jalan, yang mana ambisi pemerintah untuk beralih ke energi bersih menghadapi tantangan besar dari peningkatan ketergantungan pada batu bara dan rencana penggunaan *liquefied natural gas* (LNG) atau gas alam cair. Hal ini terjadi karena sejak tahun 2009 permintaan akan listrik terus meningkat sebesar 16 persen setiap tahunnya akibat perekonomian yang terus berkembang pesat. Sehingga untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Kamboja terus mencari opsi sumber energi yang paling ekonomis. Mulai dari pembangkit listrik berbahan bakar minyak, lalu beralih ke pembangkit listrik tenaga air, dan kini beralih ke pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan menggunakan batu bara sebagai sumber energinya sebagai akibat dari kekeringan pada tahun 2019 yang melumpuhkan pembangkit listrik tenaga air.

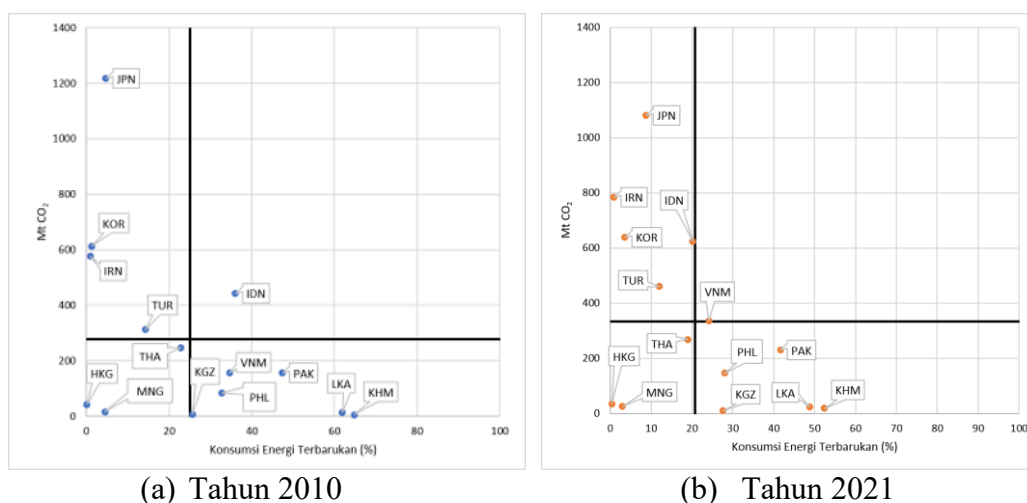
Selain itu, Kamboja kini sangat optimis terhadap proyek *LNG to power*. Kapasitas pembangkit listrik berbahan bakar LNG diperkirakan mencapai 900 MW pada tahun 2030-an, dan dalam skenario tertentu bisa melonjak hingga 8.700 MW pada tahun 2050. Diperkirakan LNG dapat mendominasi 54,9 persen bauran energi Kamboja pada tahun 2050. LNG sering dianggap sebagai bahan bakar transisi (*transition fuel*) dan sering dipromosikan sebagai alternatif yang lebih bersih dibanding batu bara. Meskipun LNG digunakan sebagai bagian dari strategi transisi menuju energi bersih di banyak negara, LNG tetap merupakan sumber energi fosil yang menghasilkan emisi karbon. Sehingga penurunan penggunaan energi terbarukan bukan karena berkurangnya kapasitas absolut, melainkan karena pertumbuhan sangat cepat dari pembangkit energi fosil terutama batu bara yang dilakukan pemerintah untuk memenuhi lonjakan permintaan listrik.



Gambar 17 Perkembangan konsumsi energi terbarukan di 14 negara Asia tahun 2010-2021 (diolah dari World Development Indicator, 2026)

Berdasarkan akumulasi konsumsi energi terbarukan, rata-rata konsumsi energi terbarukan di tahun 2021 mengalami penurunan dibandingkan tahun 2010.

Untuk melihat hubungan antara konsumsi energi terbarukan dan emisi karbon, ditunjukkan pada Gambar 18 berikut.



Gambar 18 Plot hubungan antara konsumsi energi terbarukan dengan emisi karbon pada 14 negara Asia (diolah dari World Development Indicator, 2026)

Secara keseluruhan, Jepang, Korea, Iran, dan Turki konsisten berada di kuadran II dengan tingkat konsumsi energi terbarukan yang rendah dan emisi yang tinggi. Kuadran III juga turut konsisten ditempati oleh Hong Kong, Thailand, dan Mongolia. Begitu pun dengan Filipina, Kyrgyzstan, Pakistan, Sri Lanka, dan Kamboja yang turut konsisten menempati kuadran IV. Temuan menarik justru ditemukan di Indonesia, yang mana terjadi pergeseran posisi dari kuadran I ke kuadran II, artinya terjadi penurunan konsumsi energi terbarukan yang diikuti oleh peningkatan emisi. Begitu pula dengan Vietnam, yang mana terjadi sedikit pergeseran dari kuadran IV menuju perbatasan kuadran I. Hal ini mengindikasikan terjadinya penurunan konsumsi energi terbarukan yang diikuti oleh peningkatan emisi.

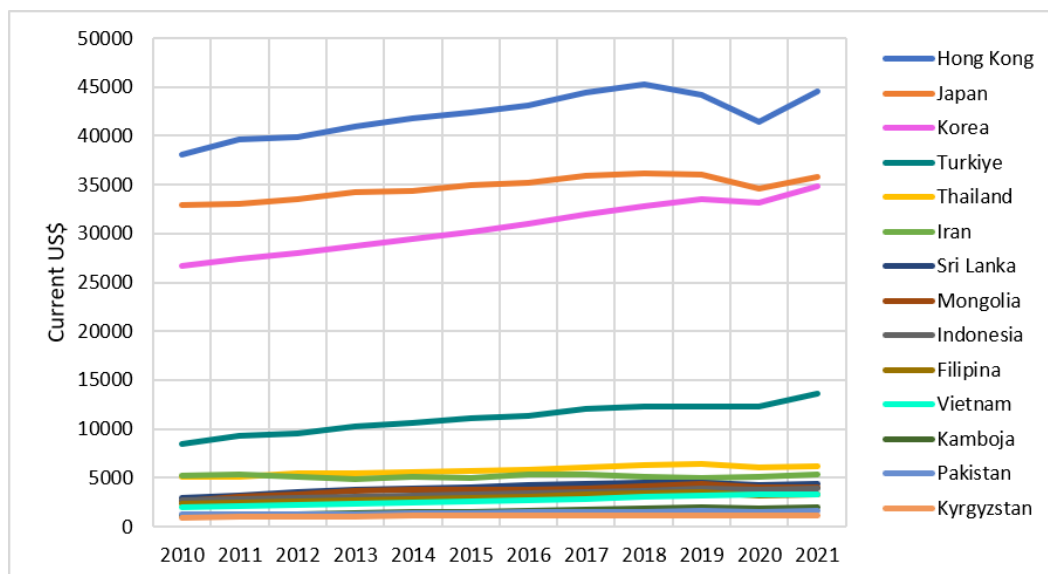
Penurunan konsumsi energi terbarukan diakibatkan karena terjadinya peningkatan penggunaan energi di Indonesia maupun Vietnam yang terus terjadi peningkatan sepanjang periode analisis. Di Indonesia, penggunaan energi didominasi oleh sektor industri, transportasi, dan rumah tangga. Penggunaan energi oleh sektor industri tercatat mengalami peningkatan menjadi 2.289.693 Terajoule pada 2021 dari yang sebelumnya 1.610.082 Terajoule di tahun 2010, yang mana energi tersebut berasal dari gas alam dan batu bara. Lonjakan tersebut tidak terlepas dari efek hilirisasi nikel sejak tahun 2017 silam, yang mana pembangunan smelter nikel dalam skala besar mendorong pertumbuhan permintaan listrik yang sangat signifikan, mengingat proses peleburan bijih nikel menjadi produk bernilai tambah memerlukan energi dalam jumlah besar, terutama pada tahap pemanasan tanur (*furnace*) yang menyumbang lebih dari 60 persen total konsumsi energi dalam proses produksi nikel (Rahmaditio *et al.* 2026). Sehingga, meskipun nikel merupakan komoditas strategis bagi rantai pasok energi bersih, khususnya sebagai bahan baku baterai kendaraan listrik, akan tetapi di sisi lain, proses produksinya justru meningkatkan ketergantungan terhadap energi fosil seperti batu bara. Begitu pula dengan sektor transportasi dan rumah tangga yang keduanya masih bergantung pada minyak bumi dan batu bara untuk kebutuhan energinya.

Tidak terlalu berbeda dengan Indonesia, di Vietnam penggunaan energi paling banyak digunakan oleh sektor industri, lalu di susul oleh sektor transportasi dan rumah tangga. Penggunaan energi di sektor industri di Vietnam pada 2021 meningkat dua kali lipat jika dibandingkan di tahun 2010, dari yang mulanya 729.363 Terajoule menjadi 1.494.489 Terajoule. Sumber energi yang digunakan oleh ketiga sektor tersebut masih didominasi oleh bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Bahkan pada sektor transportasi meskipun penggunaan biofuels mulai digencarkan akan tetapi proporsi penggunaan biofuels di tahun 2021 hanya sebesar 488 Terajoule, berbeda dengan minyak bumi yang penggunaannya mencapai 449.050 Terajoule. Hal ini mengindikasikan bahwa sumber energi di sektor transportasi masih didominasi oleh bahan bakar fosil dikarenakan adanya hambatan teknologi, biaya investasi yang tinggi, hingga kurangnya tenaga kerja terampil untuk memfasilitasi kegiatan penelitian dan pengembangan (Trinh dan Linh Le 2018). Sehingga meskipun penggunaan energi terbarukan meningkat, akan tetapi peningkatan penggunaan energi terbarukan jauh dibawah peningkatan penggunaan bahan bakar fosil. Huang (2024) dalam penelitiannya juga mengungkapkan bahwa penggunaan sumber energi alternatif baru tidak secara otomatis atau serta merta menggantikan sumber energi yang sudah ada. Dalam beberapa kasus, energi terbarukan hanya menambah bauran energi yang sudah ada alih-alih menggantikannya. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa satu unit peningkatan penggunaan energi terbarukan hanya setara dengan pengurangan penggunaan bahan bakar fosil kurang dari seperempat unit.

Di negara-negara berpenghasilan tinggi yang memiliki pembangkit listrik tenaga nuklir, konsumsi energi terbarukan terkadang justru menggantikan energi nuklir yang juga rendah karbon, alih-alih menggantikan bahan bakar fosil. Selain itu pada sektor transportasi darat, jenis energi terbarukan yang umum digunakan adalah biofuel, seperti bioetanol dan biodiesel. Biofuel ini relatif lebih intensif karbon dibandingkan jenis energi terbarukan lainnya. Selain itu, biofuel sering kali dicampur dengan bahan bakar fosil dalam proporsi besar, misalnya E10 yang mengandung 90 persen bensin. Sehingga penggunaan energi terbarukan seperti biofuel tidak benar-benar menggantikan bahan bakar fosil, melainkan justru membuat ketergantungan terhadap bahan bakar fosil tetap ada.

Berdasarkan Gambar 22, secara keseluruhan rata-rata GDP per kapita di 14 negara Asia menunjukkan tren yang stabil dan cenderung meningkat sepanjang periode analisis antara 2010 hingga 2021. Pada tahun 2010, rata-rata GDP per kapita sebesar 9463.41 USD, sementara rata-rata di tahun 2021 sebesar 11700.42 USD. Meskipun demikian, perbedaan tingkat GDP per kapita cukup terasa antar negara. Misalnya saja GDP per kapita Hong Kong, Jepang, dan Korea menunjukkan gap yang cukup jauh dengan kelompok negara lainnya seperti Kamboja, Pakistan, dan Kyrgyzstan. Hal ini dikarenakan negara-negara dengan GDP per kapita yang tinggi pada umumnya telah memiliki pondasi ekonomi yang kuat pada sektor-sektor berteknologi tinggi. Terlebih lagi negara-negara dengan GDP per kapita yang tinggi memiliki akumulasi aset keuangan dan modal manusia yang jauh lebih tinggi. Misalnya saja Hong Kong yang terus berinvestasi pada pendidikan dan pelatihan yang berkualitas serta inovasi dan teknologi untuk mempertahankan daya saingnya (Government of the Hong Kong Special Administrative Region 2022). Sebaliknya, negara dengan GDP per kapita rendah sering kali masih dalam tahap mengejar (*catch-up growth*) melalui peningkatan aktivitas produksi. Akibatnya terdapat

perbedaan hubungan antara tingkat GDP per kapita dengan emisi antar negara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23 dan 24 berikut.



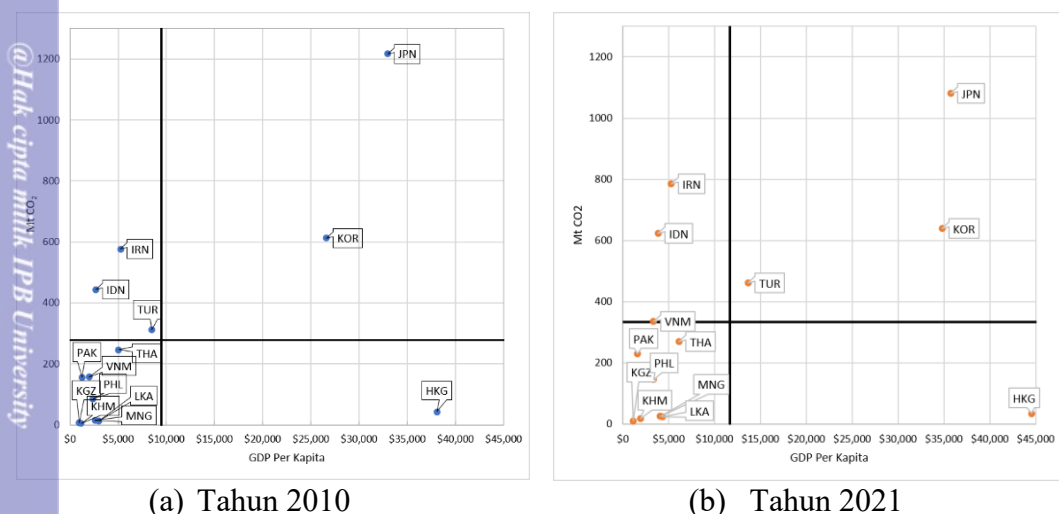
Gambar 19 Perkembangan GDP per kapita 14 negara Asia tahun 2010-2021 (diolah dari World Development Indicator, 2026)

Berdasarkan Gambar 20, Jepang dan Korea konsisten berada di kuadran I. Meskipun demikian, peningkatan GDP per kapita di Jepang diikuti oleh penurunan emisi. Sementara itu Korea masih berada di tahap pre-industrialisasi yaitu ketika peningkatan GDP per kapita masih diiringi dengan peningkatan emisi karbon. Selain itu, Iran dan Indonesia turut konsisten berada di kuadran II dengan emisi yang terus melonjak. Kondisi tersebut dapat terjadi dikarenakan konsumsi energi yang masih didominasi oleh bahan bakar fosil. Iran sendiri merupakan pemegang cadangan minyak dan gas terbesar di dunia dengan 158,4 miliar barel minyak dan 33,5 triliun meter kubik gas, dan konsumsi energi per kapita Iran di masing-masing sektor mencapai 1,5 hingga 3,3 kali rata-rata global (Ata *et al.* 2023).

Sementara itu di kuadran III yang ditempati oleh Pakistan, Vietnam, Thailand, Filipina, Kyrgyzstan, Kamboja, Mongolia, dan Sri Lanka, menunjukkan kondisi negara dengan tingkat GDP per kapita yang cukup rendah dan tingkat emisi karbon yang rendah pula. Negara-negara tersebut mencerminkan tipikal kondisi negara berkembang berpendapatan rendah hingga menengah bawah yang belum mencapai tahap industrialisasi. Emisinya yang rendah bukan karena efisiensi teknologi, melainkan karena skala aktivitas ekonominya yang masih rendah. Sedangkan di kuadran IV yang dianggap kondisi paling ideal karena kuadran ini mengindikasikan negara dengan tingkat GDP per kapita yang tinggi dan tingkat emisi karbon yang rendah. Kuadran ini hanya ditempati oleh Hong Kong, rendahnya emisi karbon Hong Kong secara langsung mencerminkan struktur ekonominya yang ditopang oleh sektor jasa, sehingga aktivitas ekonominya rendah karbon.

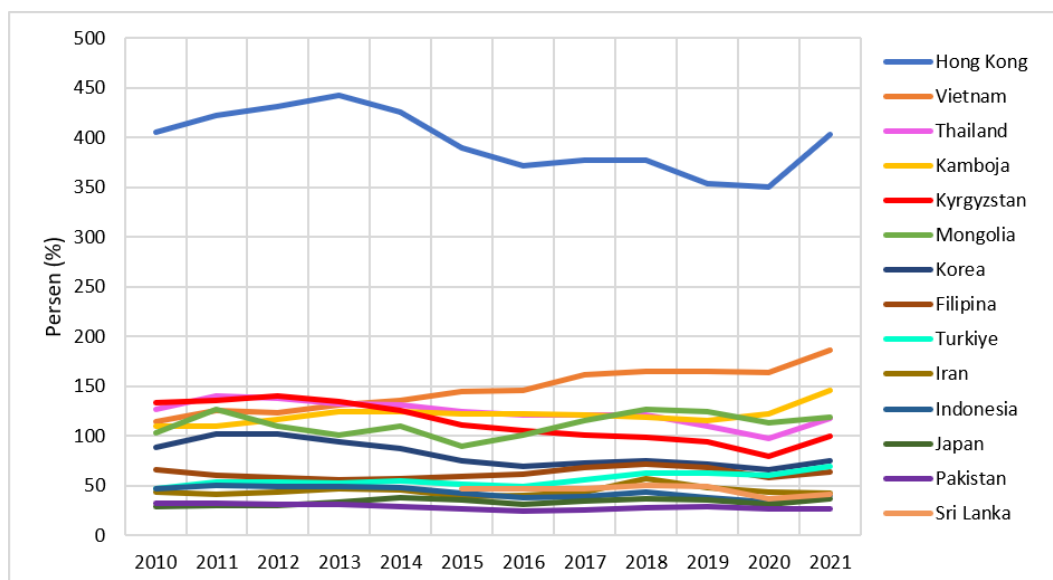
Berbeda dengan Turki dan Vietnam yang justru mengalami pergeseran posisi sepanjang periode analisis. Pada tahun 2010 Turki berada di kuadran II, namun di tahun 2021 Turki bergeser ke kuadran I. Temuan ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan ekonomi Turki selama periode tersebut diiringi oleh

peningkatan emisi karbon yang signifikan. Temuan serupa juga terjadi di Vietnam, yang menunjukkan pergeseran posisi dari yang mulanya di kuadran III pada tahun 2010 kini menuju area perbatasan kuadran II pada tahun 2021.



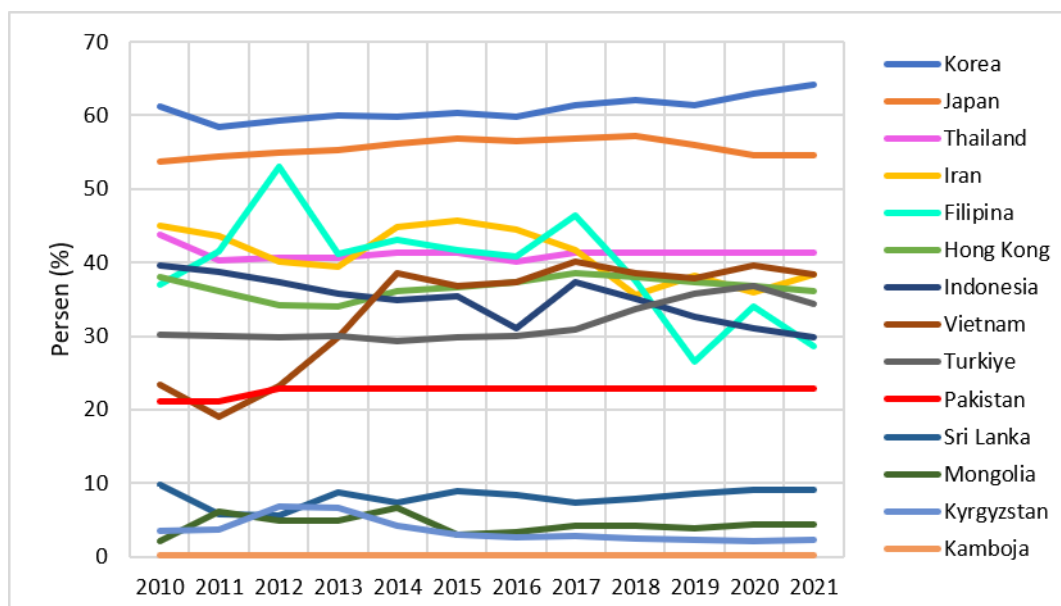
Gambar 20 Plot hubungan antara GDP per kapita dan emisi karbon pada 14 negara Asia (diolah dari World Development Indicator, 2026)

Tingkat keterbukaan antara 14 negara Asia yang diamati menunjukkan perbedaan yang cukup besar antara Hong Kong dengan 13 negara lainnya. Walaupun secara keseluruhan trend perkembangan tingkat perdagangan di seluruh negara cenderung stabil dan meningkat. Berdasarkan gambar 9, tingkat keterbukaan perdagangan di Hong Kong yang sangat tinggi dikarenakan Hong Kong menjalankan sistem perekonomian kapitalistik dengan intervensi pemerintah yang sangat minim. Hong Kong menjamin aliran modal, barang, manusia, dan informasi yang benar-benar bebas masuk dan keluar dari wilayahnya tanpa restriksi yang berarti. Hong Kong tidak memberlakukan tarif pada sebagian besar barang impor, yang secara signifikan mengurangi biaya operasional dan mempercepat proses masuknya barang (Government of the Hong Kong Special Administrative Region 2022). Terlebih lagi Hong Kong tidak memberikan batasan bagi investor asing untuk menanamkan modal di sana atau bagi penduduk lokal untuk berinvestasi di luar negeri. Selain itu, tidak ada pembatasan kewarganegaraan dalam hal kepemilikan perusahaan atau sektor bisnis tertentu (SCCC 2022). Karena keterbukaan perdagangan yang sangat tinggi tersebut, pada tahun 2021, ekspor barang Hong Kong melonjak sebesar 19,9 persen secara riil, yang menjadi faktor kunci di balik pemulihan ekonomi Hong Kong setelah mengalami resesi yang dalam selama dua tahun sebelumnya.



Gambar 21 Perkembangan tingkat keterbukaan perdagangan di 14 negara Asia tahun 2010-2021 (diolah dari World Development Indicator, 2026)

Sementara itu perkembangan *medium-high tech manufacturing* di beberapa negara Asia cenderung berfluktuatif. Korea dan Jepang merupakan negara dengan basis industri raksasa seperti Samsung, LG, Hyundai yang berlokasi di Korea dan Toyota, Sony, Panasonic dengan basis industri di Jepang. dibanding dengan 12 negara lainnya. Berbeda dengan Kamboja yang mana negara ini industrinya masih didominasi oleh *low manufacturing* berupa industri padat karya seperti tekstil, garmen, alas kaki, furnitur dan pengolahan makanan yang memerlukan teknologi sederhana dan tenaga kerja yang besar.



Gambar 22 Perkembangan *medium-high tech manufacturing* di 14 negara Asia tahun 2010-2021 (diolah dari World Development Indicator, 2026)

4.2 Hasil Analisis Regresi

Pada bagian ini dilakukan analisis regresi data panel untuk menjawab tujuan penelitian terkait pengaruh modal manusia, energi terbarukan, dan pertumbuhan ekonomi terhadap emisi karbon di 14 negara Asia. Tabel 3 menunjukkan model terbaik untuk model 1 yaitu ketika kapasitas modal manusia diukur dengan indikator *human capital index based on years of schooling and returns to education* dan model 2 yaitu ketika kapasitas modal manusia diukur dengan jumlah tenaga kerja dengan keterampilan tertinggi (*skill level 3-4* berdasarkan klasifikasi ISCO-08), seperti kelompok profesional, teknisi, hingga manajer.

Tabel 3 Hasil pengujian model terbaik

Uji Model Terbaik	Probabilitas masing-masing model	
	Model 1	Model 2
Uji Chow	0.0000	0.0000
Uji Hausman	0.0004	0.0000
Keputusan	FEM	FEM

Sumber: Penn World Table, World Development Indicator (diolah dengan STATA 15)

Untuk memilih model terbaik, dilakukan Uji Chow dan Uji Hausman. Berdasarkan Tabel 3, pada model 1 nilai probabilitas yang diperoleh pada kedua uji tersebut secara berurutan adalah 0.0000 dan 0.0004 yang mana nilai keduanya berada di bawah taraf nyata 5 persen, artinya FEM adalah model terbaik. Selanjutnya uji asumsi klasik digunakan untuk memastikan bahwa model terbebas dari masalah heteroskedastisitas, autokorelasi, dan multikolinearitas. Akan tetapi pada model ditemukan pelanggaran asumsi klasik berupa masalah heteroskedastisitas dan autokorelasi. Permasalahan heteroskedastisitas ditemukan ketika dilakukan uji White, yang mana nilai probabilitas yang didapatkan sebesar 0.000. Lalu saat dilakukan uji autokorelasi menggunakan uji Wooldridge didapatkan nilai probabilitas sebesar 0.000 yang berarti terdapat masalah autokorelasi Sehingga estimasi dilakukan dengan *robust standard error* untuk mengatasi masalah tersebut.

Begitu pun hasil estimasi di model 2, hasilnya diputuskan bahwa FEM adalah model terbaik. Selanjutnya dilakukan uji asumsi klasik untuk mengetahui apakah ada pelanggaran asumsi klasik berupa heteroskedastisitas dengan uji White, hasilnya menunjukkan bahwa terdapat masalah heteroskedastisitas dengan nilai probabilitas yang didapatkan sebesar 0.0000. Saat dilakukan uji autokorelasi dengan uji Wooldridge turut didapatkan nilai probabilitas sebesar 0.0000 yang berarti terdapat masalah autokorelasi. Sehingga permasalahan heteroskedastisitas dan autokorelasi diatasi dengan dilakukan estimasi menggunakan *robust standard error*.

Tabel 4 Rangkuman hasil estimasi regresi data panel

Variabel	Model 1	Model 2
lnHCI	6.097699***	-
lnHCI ²	-2.940369**	-
lnHSL	-	1.528908***
lnHSL ²	-	-0.0939173***
REN	-0.0183209***	-0.0261108***
lnGDP	0.9207889***	0.8535901***
MHT	-0.0021263	-0.0029221
TRADE	0.0012833*	0.0020013***
cons	-5.709436***	-8.116346 ***
<i>Number of obs</i>	163	157
<i>Number of groups</i>	14	14
<i>R-Squared</i>	0.8601	0.8394
Prob (F-Statistic)	0.0000	0.0000

Keterangan: ***, **), *) signifikan pada taraf nyata 1 persen, 5 persen, 10 persen
 Sumber: ILOSTAT, Penn World Table, World Development Indicator (diolah dengan STATA 15)

Tabel 4 merupakan rangkuman hasil analisis regresi data panel yang telah dilakukan pada seluruh model untuk dianalisis lebih lanjut secara parsial terkait pengaruh masing-masing variabel independen terhadap variabel dependennya. Pada model 1 hasil estimasi menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.8601 yang mana sekitar 86.01 persen variasi dalam emisi karbon dijelaskan oleh variabel-variabel independen yang digunakan dalam model, yaitu HCI, REN, IGDP, MHT, dan TRADE. Hal tersebut mengindikasikan bahwa model dapat menjelaskan variasi emisi karbon di kawasan Asia. Sementara itu, sisanya sebesar 13.99 persen dijelaskan oleh faktor-faktor lain yang tidak dimasukkan ke dalam model. Selanjutnya pada hasil uji F-statistik, diperoleh nilai probabilitas sebesar 0.0000, jauh lebih kecil dari tingkat signifikansi 5 persen. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi faktor-faktor yang dianalisis secara bersama-sama memiliki kontribusi yang signifikan dalam menjelaskan variasi volume emisi karbon yang dihasilkan akibat aktivitas ekonomi di kawasan Asia.

Sementara itu pada model 2 hasil estimasi menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.8394 yang mana sekitar 83.94 persen variasi dalam emisi karbon dijelaskan oleh variabel-variabel independen yang digunakan dalam model, yaitu IHSL, REN, IGDP, MHT, dan TRADE. Sementara itu, sisanya sebesar 16.06 persen dijelaskan oleh faktor-faktor lain yang tidak dimasukkan ke dalam model. Hasil uji F-statistik diperoleh nilai probabilitas sebesar 0.0000, jauh lebih kecil dari tingkat signifikansi 5 persen. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi faktor-faktor yang dianalisis secara bersama-sama dapat menjelaskan variasi emisi karbon di kawasan Asia.

4.2.1 Pengaruh Modal Manusia terhadap Emisi Karbon

Hasil estimasi regresi data panel pada Model 1 menunjukkan bahwa variabel modal manusia yang diukur melalui *human capital index based on years of schooling and returns to education* (HCI) memiliki arah pengaruh yang positif dan signifikan secara statistik dengan nilai koefisien sebesar 6.0976. Semetara itu, HCI² menunjukkan penurunan emisi karbon sebesar -2.9403 yang signifikan pada tahap lanjutan, berarti hipotesis *Enviromental Kuznets Curve* (EKC) terbukti pada hubungan antara HCI dan emisi karbon dengan kurva yang berbentuk U terbalik dengan titik balik atau *turning point* sebesar

Sementara pada Model 2, modal manusia yang diukur melalui jumlah tenaga kerja dengan tingkat keterampilan tertinggi (*high skill labour*) memiliki arah pengaruh yang positif dan signifikan secara statistik dengan nilai koefisien sebesar 1.5289. Koefisien linear HSL sebesar 1.5289 menunjukkan bahwa pada tahap awal peningkatan jumlah *high skill labour* sebesar 1 persen akan meningkatkan emisi karbon sebesar 1.5289 persen. Sementara itu koefisien kuadrat HSL² yang bernilai -0.0939 menunjukkan bahwa pada tahap lanjutan, peningkatan jumlah *high skill labour* justru akan menurunkan tingkat emisi karbon. Hubungan ini membentuk pola kurva U terbalik.

Sehingga hasil dari model 1 dan model 2 menunjukkan bahwa pola hubungan antara modal manusia dengan emisi karbon berbentuk U terbalik, temuan ini mengindikasikan bahwa hipotesis *Enviromental Kuznets Curve* (EKC) terbukti. Hasil temuan ini mendukung temuan dari penelitian yang dilakukan oleh Gnangoin *et al.* (2022), Gnangoin *et al.* (2023) dan Kocoglu *et al.* (2023) bahwa pada tahap awal peningkatan kapasitas modal manusia akan diikuti oleh peningkatan emisi karbon, namun setelah tahap tertentu, peningkatan kapasitas modal manusia akan diikuti oleh penurunan emisi karbon. Dalam penelitian Yao *et al.* (2020) kapasitas modal manusia diukur menggunakan beberapa tingkatan pendidikan, mulai dari tingkat pendidikan dasar, menengah, hingga tinggi. Pada tahap awal atau pada tingkat pendidikan dasar, hubungan antara modal manusia dan emisi karbon ditemukan positif. Berbeda dengan tingkat pendidikan menengah dan tinggi yang ditemukan berhubungan negatif dengan emisi karbon. Walaupun keduanya berhubungan negatif, akan tetapi dampak negatif atau kemampuan dalam memitigasi emisi karbon dari kelompok pendidikan tingkat tinggi ditemukan hampir lebih kuat dua kali lipat lebih kuat dibandingkan pendidikan menengah.

Dengan demikian, inovasi dan produksi untuk teknologi bersih lebih banyak melekat pada individu dengan pendidikan tinggi. Sehingga secara keseluruhan, semakin tinggi kapasitas modal manusia memungkinkan industri dan masyarakat untuk mengadopsi teknologi yang lebih inovatif dan teknik produksi yang minim polusi yang mampu meningkatkan kualitas lingkungan secara jangka panjang. Semakin tingginya kualitas sumber daya manusia suatu negara, semakin kuat pula efek kebijakan iklim dalam mendorong inovasi teknologi hijau, karena tenaga ahli sains dan teknologi merupakan aktor utama dalam pengembangan dan adopsi teknologi rendah karbon. Huang *et al.* (2020) dalam studinya menekankan bahwa tenaga kerja yang berpendidikan dan terampil mampu meningkatkan kapasitas penyerapan teknologi bersih dan inovasi energi hijau. Sumber daya manusia yang terampil berperan sebagai jaminan bagi kapasitas penyerapan (*absorptive capacity*) untuk pengenalan,

penyerapan, dan inovasi teknologi. Sementara itu, peningkatan jumlah *high skill labour* atau proporsi tenaga kerja terampil terhadap populasi pola hubungannya cenderung akan terus menurunkan emisi karbon. Semakin banyaknya jumlah tenaga kerja terampil akan mendorong akumulasi adopsi teknologi di dalam perusahaan, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan mengoptimalkan alokasi sumber daya energi melalui mekanisme pasar.

4.2.2 Pengaruh Energi Terbarukan terhadap Emisi Karbon

Hasil estimasi regresi data panel pada Model 1 dan Model 2 menunjukkan bahwa variabel energi terbarukan berpengaruh negatif signifikan terhadap emisi karbon, dengan koefisien masing-masing sebesar -0.0183 (Model 1) dan -0.0261 (Model 2). Dengan kata lain, ketika penggunaan energi terbarukan meningkat, emisi karbon cenderung menurun, sesuai dengan koefisien negatif yang ditunjukkan oleh kedua model.

Menurut Mukhtarov *et al.* (2023) mekanisme utama yang menjelaskan mengapa peningkatan penggunaan energi terbarukan dapat menurunkan emisi karbon secara signifikan dapat dijelaskan melalui efek substitusi (*substitution effect*). Efek ini terjadi ketika industri mulai menggunakan energi bersih sebagai pengganti energi fosil yang selama ini menjadi penyebab utama emisi karbon. Dengan beralih ke energi terbarukan, kebutuhan akan energi fosil yang polutif akan berkurang, sehingga emisi karbon pun menurun. Oleh karena itu, transisi ke energi terbarukan dianggap sebagai salah satu cara terbaik dalam mengurangi tingkat emisi karbon tanpa harus menghambat pertumbuhan ekonomi. Hasil dari temuan ini mendukung penelitian (Justice *et al.* 2024; Dimian *et al.* 2025) bahwa konsumsi energi terbarukan memiliki efek negatif signifikan terhadap emisi karbon. Energi terbarukan mampu menghasilkan lebih sedikit emisi dan bahkan tidak menghasilkan emisi sehingga penggunaannya yang masif diharapkan mampu mendorong pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan. Penggunaan energi terbarukan turut dipandang sebagai jalur yang tepat untuk mencapai target tersebut serta menjaga kenaikan suhu global di bawah 2°C.

4.2.3 Pengaruh GDP per Kapita terhadap Emisi Karbon

Pada hasil estimasi regresi data panel baik Model 1 maupun Model 2 menunjukkan bahwa GDP per kapita terbukti secara statistik memiliki arah pengaruh yang positif terhadap emisi karbon dengan nilai koefisien masing-masing sebesar 0.9207 (Model 1) dan 1.0210 (Model 2). Artinya, ketika GDP per kapita meningkat 1 persen maka akan diiringi oleh peningkatan emisi karbon sebesar 0.9 persen sampai 1.02 persen. Besarnya peningkatan emisi karbon yang terlihat pada nilai koefisien GDP per kapita dalam penelitian ini cenderung lebih besar jika dibandingkan oleh penelitian Gnangoin *et al.* (2022). Perbedaan tersebut diduga disebabkan oleh perbedaan karakteristik sampel. Misalnya saja penelitian yang dilakukan oleh Sun *et al.* (2019) yang meneliti hubungan GDP per kapita dengan emisi karbon antar kelompok negara. Hasilnya menunjukkan bahwa besarnya peningkatan emisi karbon akibat peningkatan GDP per kapita paling tinggi dirasakan oleh kelompok negara Asia Selatan (0.22 persen), Asia Timur (0.37 persen), dan Asia Tenggara (0.13 persen). Berbeda dengan kelompok negara Eropa (0.06 persen) dan Asia Tengah (0.05 persen). Selain itu, dalam studi oleh Mose *et al.* (2024) yang sampel penelitiannya berupa kelompok

negara Afrika Selatan menunjukkan peningkatan emisi yang cukup tinggi ketika terjadi peningkatan GDP per kapita, yaitu sebesar 1.25 persen. Hal ini menunjukkan bahwa elastisitas emisi terhadap GDP per kapita sangat dipengaruhi oleh karakteristik sampel seperti struktur ekonomi. Oleh karena itu, koefisien GDP sebesar 0.92-1.02 persen pada penelitian ini mencerminkan karakteristik negara-negara Asia dalam sampel yang masih memiliki ketergantungan cukup tinggi pada aktivitas ekonomi yang insentif energi.

Dengan demikian, peningkatan GDP per kapita menstimulus pertumbuhan ekonomi yang tercermin dari meningkatnya kemampuan suatu negara untuk memproduksi lebih banyak barang dan jasa, yang pada prosesnya memicu lonjakan permintaan terhadap energi dan sumber daya lainnya. Semakin besar output yang dihasilkan, semakin tinggi pula konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan terutama jika struktur produksi masih bergantung pada bahan bakar fosil, kondisi ini lah yang disebut dengan *scale effect* (Añón Higón *et al.* 2017). Begitu pula menurut Siregar dan Hasbi (2023), yang mana peningkatan aktivitas ekonomi yang tinggi akan memicu peningkatan produktivitas sehingga akan meningkatkan jumlah penggunaan sumber daya yang pada akhirnya menghasilkan emisi karbon yang lebih tinggi. Studi oleh Shabani (2024) turut menjelaskan bahwa negara yang sedang mengejar pertumbuhan ekonomi sering kali mengabaikan aspek lingkungan, sehingga negara dengan GDP yang sedang tumbuh pesat memungkinkan aktivitas ekonomi berjalan dengan regulasi lingkungan yang rendah.

4.2.4 Pengaruh *Medium-High Tech Manufacturing* terhadap Emisi Karbon

Hasil estimasi regresi data panel pada Model 1 dan Model 2 menunjukkan bahwa *medium-high tech manufacturing* tidak memiliki pengaruh secara statistik terhadap emisi karbon. Ketidaksignifikanan ini dapat terjadi karena skala industri *medium-high tech manufacturing* masih terlalu kecil di suatu negara yang masih didominasi oleh industri ringan, sehingga kontribusi *medium-high tech manufacturing* terhadap total emisi karbon belum cukup substansial mempengaruhi emisi karbon secara statistik. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Sohag *et al.* (2017) yang menganalisis kelompok negara *middle income* yaitu *upper middle income* dan *lower middle income*, yang mana hubungan yang tidak signifikan secara statistik antara emisi karbon dengan sektor industri terjadi di kelompok negara *lower middle income*. Ketidaksignifikanan tersebut bisa terjadi karena aktivitas ekonomi suatu negara yang masih berada dalam masa transisi dari ekonomi berbasis pertanian ke ekonomi industri berbasis energi. Karena masih dalam tahap awal transformasi, dampak polusi dari industrialisasi di kelompok negara ini mungkin belum sebesar di negara-negara yang sudah lebih maju industrinya.

4.2.5 Pengaruh Keterbukaan Perdagangan terhadap Emisi Karbon

Hasil estimasi regresi data panel pada Model 1 dan Model 2 menunjukkan bahwa variabel keterbukaan perdagangan berpengaruh positif signifikan terhadap emisi karbon, dengan koefisien masing masing sebesar 0.0012 (Model 1) dan 0.0020 (Model 2). Dengan kata lain, ketika semakin tinggi tingkat keterbukaan perdagangan suatu negara, maka emisi karbon cenderung akan meningkat, sesuai dengan koefisien positif yang ditunjukkan oleh kedua model.

Temuan pada penelitian ini terkait pengaruh keterbukaan perdagangan terhadap emisi karbon sejalan dengan temuan Sun *et al.* (2019) yang mana keterbukaan ekonomi yang lebih besar mendorong pertumbuhan ekonomi dan industrialisasi, sehingga meningkatkan konsumsi energi terutama dari bahan bakar fosil. Keterbukaan perdagangan ini mendorong negara untuk memproduksi barang dalam jumlah besar, sehingga peningkatan emisi terjadi karena meningkatnya volume produksi. Peningkatan emisi akibat perluasan aktivitas ekonomi ini lah yang disebut dengan *scale effect*, yaitu efek yang terjadi akibat keterbukaan perdagangan (Añón Higón *et al.* 2017).

Pada penelitian Sun *et al.* (2019) turut menyoroti efek komposisi (*composition effect*, yaitu ketika permintaan dunia terhadap barang-barang yang cenderung kotor (*polluting goods*) tinggi, negara yang memiliki keunggulan komparatif di sektor tersebut akan meningkatkan produksinya. Biasanya terjadi di negara-negara berkembang, yang berakibat pada perpindahan industri-industri polutan dari negara maju ke negara berkembang sebagai dampak dari perdagangan yang tanpa disertai regulasi lingkungan yang memadai.



V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan pembahasan yang dipaparkan sebelumnya, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Perkembangan emisi karbon di 14 negara Asia selama periode 2010–2021 secara umum menunjukkan tren yang terus meningkat. Hal tersebut terjadi karena didorong oleh ekspansi aktivitas ekonomi yang pesat di kawasan ini. Sehingga perbedaan tingkat emisi antarnegara mencerminkan perbedaan skala dan struktur ekonomi masing-masing negara. Sementara itu, kapasitas modal manusia yang diukur melalui Human Capital Index (HCI) cenderung stabil dan meningkat di seluruh negara sampel, dengan Korea dan Jepang mencatat nilai HCI tertinggi. Jumlah *high skill labour* juga mengalami peningkatan, dengan Hong Kong, Korea, dan Jepang mencatat pertumbuhan tertinggi. Akan tetapi Pakistan dan Filipina justru mencatatkan penurunan jumlah *high skill labour*, faktor yang menyebabkan penurunan tersebut dikarenakan terjadinya *brain drain*, yaitu ketika orang-orang dengan pendidikan tinggi, ilmuwan, atau tenaga kerja ahli di suatu negara pindah ke negara lain. Hal tersebut diperparah lagi oleh krisis politik dan ekonomi yang berlangsung sejak akhir 2021. Berdasarkan hasil regresi data panel pada Model 1, terbukti membentuk pola *inverted U-shaped* terhadap emisi karbon. Sehingga pola hubungan *non-linear* antara HCI dan emisi karbon terkonfirmasi secara statistik. Pada Model 2, modal manusia yang diprosikan dengan jumlah *high skill labour* (HSL) tidak terbukti membentuk pola *inverted U-shaped* terhadap emisi karbon, yang mengindikasikan bahwa peningkatan proporsi tenaga kerja terampil cenderung memberikan efek penurunan emisi secara langsung melalui peningkatan efisiensi dan adopsi teknologi.
2. Penggunaan energi terbarukan menunjukkan tren yang beragam dan fluktuatif, yang mana di beberapa negara seperti Kamboja justru mengalami penurunan porsi konsumsi energi terbarukan akibat ekspansi pembangkit listrik berbahan bakar fosil untuk memenuhi lonjakan permintaan listrik. Berdasarkan hasil regresi data panel, konsumsi energi terbarukan berpengaruh negatif signifikan terhadap emisi karbon. Sehingga mengkonfirmasi bahwa peningkatan penggunaan energi terbarukan secara konsisten berkontribusi pada penurunan emisi karbon melalui mekanisme substitusi energi fosil.
3. Adapun GDP per kapita menunjukkan tren yang stabil dan meningkat, dengan kesenjangan yang cukup besar antara negara seperti Hong Kong, Jepang, dan Korea dibandingkan negara lainnya. Hasil analisis regresi terbukti menunjukkan bahwa peningkatan GDP per kapita akan diiringi oleh peningkatan emisi karbon. Hubungan tersebut diduga berkaitan dengan perubahan pola konsumsi masyarakat yang meningkatkan permintaan terhadap barang dan jasa, sehingga mendorong penggunaan energi dan emisi karbon.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan kesimpulan penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagi pemerintah negara-negara Asia, pemerintah dapat memperkuat kapasitas modal manusia melalui investasi pada pendidikan vokasi, sains, dan teknologi yang berorientasi pada inovasi energi dan teknologi hijau. Hal ini dikarenakan peningkatan kualitas dan kuantitas tenaga kerja terampil di bidang tersebut menjadi kunci dalam mendorong transisi menuju perekonomian yang lebih berkelanjutan.
2. Selain itu pemerintah juga harus melakukan percepatan transisi energi melalui kebijakan yang mendorong peningkatan penggunaan energi terbarukan dalam bauran energi nasional dengan memerhatikan karakteristik struktural masing-masing negara. Misalnya negara-negara importir bahan bakar fosil seperti Kamboja, percepatan investasi pada infrastruktur energi bersih menjadi prioritas utama dalam mengurangi ketergantungan terhadap impor energi fosil serta memperkuat ketahanan energi nasional. Sementara bagi negara-negara yang kaya akan bahan bakar fosil seperti Iran, diperlukan diversifikasi bauran energi domestik untuk mengurangi emisi karbon. Selain itu, tingginya subsidi bahan bakar fosil yang selama ini diberlakukan di Iran turut mendorong pola konsumsi energi domestik yang kurang efisien, sehingga reformasi kebijakan subsidi energi turut menjadi elemen penting yang perlu diintegrasikan ke dalam kebijakan transisi energi di negara tersebut.
3. Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan GDP per kapita terbukti diikuti oleh peningkatan emisi karbon. Oleh karena itu, pemerintah perlu merancang strategi pertumbuhan ekonomi yang berorientasi pada pembangunan rendah karbon. Selain itu, perubahan pola konsumsi masyarakat perlu didorong melalui edukasi lingkungan, insentif bagi konsumsi produk ramah lingkungan, dan penerapan ekonomi sirkular. Negara dengan kapasitas ekonomi dan teknologi yang lebih rendah juga memerlukan dukungan berupa transfer teknologi, peningkatan kualitas modal manusia, dan pembiayaan energi bersih agar pertumbuhan GDP per kapita tidak terus meningkatkan emisi karbon.
4. Pada penelitian ini, tidak dilakukan pembobotan pada variabel *high skill labour* serta ditemukan indikasi adanya pelanggaran asumsi klasik berupa heteroskedastisitas dan autokorelasi. Meskipun sudah diatasi dengan *robust standard error*, tidak menutup kemungkinan terjadinya *misspecification* pada model. Sehingga kemungkinan masih terdapat faktor-faktor lain di luar model yang memengaruhi emisi karbon belum dimasukkan ke dalam model. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya diharapkan dapat mempertimbangkan penambahan variabel baru maupun pendekatan estimasi lain untuk memperoleh model yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Adedoyin FF, Zakari A. 2020. Energy consumption, economic expansion, and CO2 emission in the UK: The role of economic policy uncertainty. *Sci Total Environ.*, siap terbit.
- Adikari AP, Liu H, Dissanayake DMSLB, Ranagalage M. 2023. Human Capital and Carbon Emissions: The Way forward Reducing Environmental Degradation. *Sustain.* 15(4). doi:10.3390/su15042926.
- Añón Higón D, Gholami R, Shirazi F. 2017. ICT and environmental sustainability: A global perspective. *Telemat Informatics.* 34(4):85–95. doi:10.1016/j.tele.2017.01.001.
- Ata B, Pakrooh P, Péntzes J. 2023. Driving factors of energy related CO2 emissions at a regional level in the residential sector of Iran. *Sci Rep.* 13(1):1–23. doi:10.1038/s41598-023-44975-x.
- Avenyo E, Tregenna F. 2021. The Effects of Technology Intensity in Manufacturing on CO2 Emissions: Evidence from Developing Countries.
- Avenyo EK, Tregenna F. 2022. Greening manufacturing : Technology intensity and carbon dioxide emissions in developing countries. *Appl Energy.* 324 June:119726. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119726.
- Bakara S, Simamora E, Sarah K, Siahaan A, Alawiyah K. 2024. Teori Heckscher-Ohlin : Model Perdagangan Internasional. 1(2):612–616.
- Bakri MA, Chia YE, Chia RCJ. 2025. Trade openness and carbon emissions using threshold approach: evidence from selected Asian countries. *Carbon Res.* 4(1). doi:10.1007/s44246-025-00211-x.
- Bandiyah AN, Imama OS, Khusnia Z, Irawan S, Firmansyah AH. 2025. ANALISIS POLA PERDAGANGAN INTERNASIONAL ANTARA NEGARA BERKEMBANG DAN NEGARA MAJU: PENDEKATAN HECKSCHER-OHLIN TERHADAP MODAL DAN TENAGA KERJA. 17(12).
- Bano S, Zhao Y, Ahmad A, Wang S, Liu Y. 2018. Identifying the impacts of human capital on carbon emissions in Pakistan. *J Clean Prod.* 183:1082–1092. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.008.
- Bayar Y, Smirnov V, Danilina M, Kabanova N. 2022. Impact of Institutions and Human Capital on CO2 Emissions in EU Transition Economies. *Sustainability.* 14(1):1–12. doi:10.3390/su14010353.
- Bilgili F, Koçak E, Bulut Ü. 2016. The dynamic impact of renewable energy consumption on CO2 emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renew Sustain Energy Rev.* 54:838–845. doi:10.1016/j.rser.2015.10.080.
- Cong R, Gomi K, Togawa T, Hirano Y, Oba M. 2025. How and why did fossil fuel use change in Fukushima Prefecture before and after the Great East Japan Earthquake? *Energy Reports.* 8:1159–1173. doi:10.1016/j.egyr.2021.12.046.
- Desha C, Robinson D, Sproul A. 2014. Working in partnership to develop engineering capability in energy efficiency. *J Clean Prod.* 106:283–291. doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.099.
- Dimian GC, Maftai M, Jablonský J, Marin E, Olaru SM. 2025. The Influence of

- Digitalization on Greenhouse Gas Emissions in European Union. The Analysis of Mediating Effect of Renewable Energy Consumption. *J Knowl Econ*. 17(1):1888–1928. doi:10.1007/s13132-025-02657-1.
- Edziah BK, Sun H, Anyigbah E, Li L. 2021. Human Capital and Energy Efficiency: Evidence from Developing Countries. *Am J Ind Bus Manag*. 11(06):599–610. doi:10.4236/ajibm.2021.116038.
- Ehrlich I, Pei Y. 2020. Human capital as engine of growth: The role of knowledge transfers in promoting balanced growth within and across countries. *Asian Dev Rev*. 37(2):225–263. doi:10.1162/adev_a_00155.
- Evitasari N, Komarulzaman A. 2023. Pengaruh Pendanaan Iklim terhadap Penurunan Emisi Karbon melalui Energi Terbarukan di Indonesia. *J Ekon dan Pambang Indones*. 23(2):183–194. doi:10.21002/jepi.2023.12.
- Fang J, Gozgor G, Lu Z. 2019. Effects of the export product quality on carbon dioxide emissions : evidence from developing economies. (1995).
- Firdaus. 2020. Aplikasi Ekonometrika dengan E-Views, Stata, dan R.
- Giannakis E, Zittis G. 2021. Assessing the Economic Structure, Climate Change and Decarbonisation in Europe. *Earth Syst Environ*. 5(3):621–633. doi:10.1007/s41748-021-00232-7.
- Ginting RF, Prajanti SDW, Setyadharma A. 2023. Determinan Indeks Kualitas Lingkungan Hidup dengan Pengujian Environmental Kuznet Curve. *Bus Econ Anal J*. 3(1):16–24. doi:10.15294/beaj.v3i1.41646.
- Gnangoin TY, Kassi DF, Edjoukou AJR, Kongrong OY, Yuqing D. 2022. Renewable energy, non-renewable energy, economic growth and CO2 emissions in the newly emerging market economies: The moderating role of human capital. *Front Environ Sci*. 10 September:1–15. doi:10.3389/fenvs.2022.1017721.
- Gnangoin TY, Kassi DF, Kongrong O. 2023. Urbanization and - CO 2 emissions in Belt and Road Initiative economies : analyzing the mitigating effect of human capital in Asian countries.
- Government of the Hong Kong Special Administrative Region. 2022. 2021 Economic Background and 2022 Prospects. https://www.hkeconomy.gov.hk/en/pdf/er_20q4.pdf.
- Gozgor G. 2017. Does trade matter for carbon emissions in OECD countries? Evidence from a new trade openness measure. *Environ Sci Pollut Res*. 24(36):27813–27821. doi:10.1007/s11356-017-0361-z.
- Grossman GM, Krueger AB. 1995. Economic Growth and the Enviroment. *Q J Econ*. 110(2):353–377.
- Hamedani EA, Talebi S. 2025. Modeling and long-term forecasting of CO2 emissions in Asia: An optimized Artificial Neural Network approach with consideration of renewable energy scenarios. *Energy Convers Manag X*. 26. doi:10.1016/j.ecmx.2025.101030.
- Haq W, Ahmad I, Arshad A, Alvi S. 2025. The role of human capital and innovation in reducing carbon emissions in OECD and BRICS countries. *Sustain Futur*. 10:101475. doi:10.1016/j.sftr.2025.101475.
- Huang C, Zhang X, Liu K. 2020. Effects of human capital structural evolution on carbon emissions intensity in China: A dual perspective of spatial

heterogeneity and nonlinear linkages. *Renew Sustain Energy Rev.* 135:1364–0321. doi:10.1016/j.rser.2020.110258.

Huang X. 2024. The multidimensional relationship between renewable energy deployment and carbon dioxide emissions in high-income nations. *npj Clim Action.* 3(1). doi:10.1038/s44168-024-00191-5.

ILO] International Labour Organization. 2008. International Standard Classification of Occupations. *Dep Stat Int Labour Off.* I. <http://www.ilo.org/public/english/bureau/stat/isco/index.htm>.

Ji X, Chen X, Mirza N, Umar M. 2021. Sustainable energy goals and investment premium: Evidence from renewable and conventional equity mutual funds in the Euro zone. *Resour Policy.* 74:102387. doi:10.1016/j.resourpol.2021.102387.

Jiang Q, Rahman ZU, Zhang X, Guo Z, Xie Q. 2022. An assessment of the impact of natural resources, energy, institutional quality, and financial development on CO2 emissions: Evidence from the B&R nations. *Resour Policy.* 76:102716. doi:10.1016/j.resourpol.2022.102716.

Juhro S, Trisnanto B. 2018. Paradigma dan Model Pertumbuhan Ekonomi Endogen Indonesia.

Junsheng H, Mu Y, Masud MM, Akhtar R, Saif ANM, Islam KMA, Hafiz N. 2024. Navigating the nexus: unraveling technological innovation, economic growth, trade openness, ICT, and CO2 emissions through symmetric and asymmetric analysis. *Humanit Soc Sci Commun.* 11(1). doi:10.1057/s41599-024-03092-4.

Justice G, Nyantakyi G, Isaac SH. 2024. The effect of renewable energy on carbon emissions through globalization. *Heliyon.* 10(5):e26894. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e26894.

Kartal MT. 2021. The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. *Renew Energy.* 184:871–880. doi:10.1016/j.renene.2021.12.022.

Khan M. 2020. CO2 emissions and sustainable economic development: New evidence on the role of human capital. *Sustain Dev.* 28(5):1279–1288. doi:10.1002/sd.2083.

Klemm C, Vennemann P. 2021. Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: A review of existing methods and approaches. *Renew Sustain Energy Rev.* 135:110206. doi:10.1016/j.rser.2020.110206.

Kocoglu M, Jahanger A, Awan A, Barak D, Balsalobre D. 2023. Examining the nonlinear impact of human capital on environmental degradation in N - 11 countries: an application of the PSTR approach. *Environ Sci Pollut Res.* 30(29):74265–74279. doi:10.1007/s11356-023-27426-y.

Kuznetsz S. 1995. Economic Growth and Income Inequality. *Am Econ Rev.* 4(2):93–115.

Lee HS, Kuang KS, Tee WS, Liew PX. 2025. Human capital and renewable energy transition towards carbon reduction: The role of Technical and Vocational Education and Training (TVET). *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 1516(1). doi:10.1088/1755-1315/1516/1/012004.

Li R, Wang Q, Li L. 2023. Does renewable energy reduce per capita carbon

- emissions and per capita ecological footprint? New evidence from 130 countries. *Energy Strateg Rev.* 49:101121. doi:10.1016/j.esr.2023.101121.
- Lin X, Zhao Y, Ahmad M, Ahmed Z, Rjoub H, Adebayo TS. 2021. Linking innovative human capital, economic growth, and Co2 emissions: An empirical study based on Chinese provincial panel data. *Int J Environ Res Public Health.* 18(16). doi:10.3390/ijerph18168503.
- Little RJA, Rubin DB. 2020. *Statistical Analysis with Missing Data.*
- Maftoon AS, Razzaq A, Arfeen MI, Khan K. 2025. The interplay of renewable energy and human capital: Unveiling the moderating pathways to carbon emission mitigation in a global panel study. *Sustain Futur.* 10:2666–1888. doi:10.1016/j.sftr.2025.101108.
- Mahmood H, Maalel N, Zarrad O. 2019. Trade Openness and CO 2 Emissions : Evidence from Tunisia.
- Mehmood UMA. 2021. RESEARCH ARTICLE CO 2 emissions and the role of urbanization in East Asian and Pacific countries. 2026(2016).
- Mella P. 2022. Thinking Approach. Im.
- Mor S. 2025. Climate Management and Paris Agreement : A Predictive Evaluation. 43(1):1–18.
- Mose N, Ige-Gbadeyan O, Tanchev S. 2024. Economic Growth and Carbon Emissions: a Comparative Study Between Kenya and South Africa. *Ikon Izsled.* 33(8):27–50. doi:10.2139/ssrn.4997788.
- Mukhtarov S, Aliyev F, Aliyev J. 2023. Renewable Energy Consumption and Carbon Emissions : Evidence from an Oil-Rich Economy.
- Muta'ali L. 2024. *Teori, Konsep, dan Model Regional Economic Development.*
- Nihal G, Mounia C, Hussain M, Humayun S, Perveen, Yousaf NR, Akhtar S. 2023. IMPACT OF INNOVATION ON ECONOMIC GROWTH OF G8 COUNTRIES- ANALYSIS OVER 1996-2020. *J Proffesional Bus Rev.* 8(5):1–18. doi:https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i5.1403.
- [OWID] Our World in Data. 2026. CO₂ emissions per capita. [internet]. [diakses pada Februari 2026]. Tersedia pada: https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita?country=OWID_WRL~USA~GBR~OWID_EU27
- Ozcan B, Ozturk I. 2019. Environmental Kuznets Curve (EKC): A Manual. Netherlands: Academic Press.
- Ozturk I, Acaravci A. 2010. CO 2 emissions , energy consumption and economic growth in Turkey. *Renew Sustain Energy Rev.* 14(9):3220–3225. doi:10.1016/j.rser.2010.07.005.
- Padhan H, Chandra P, Kumar A, Ahmed R, Hammoudeh S. 2020. Renewable energy consumption and robust globalization (s) in OECD countries : Do oil , carbon emissions and economic activity matter? *Energy Strateg Rev.* 32 February:100535. doi:10.1016/j.esr.2020.100535.
- Payab AH, Kautish P, Sharma R, Siddiqui A, Mehta A, Siddiqui M. 2023. Does human capital complement sustainable development goals? Evidence from leading carbon emitter countries. *Util Policy.* 81:101509. doi:10.1016/j.jup.2023.101509.
- Poncet S, Hering L, Sousa J De. 2015. Has trade openness reduced pollution in China. Volume ke-132.

- Raihan A, Rahman SM, Ridwan M, Dhar BK, Martinho D, Sarker T. 2026. Environmental sustainability indicators in India: Evidence from ecological footprint, load capacity factor, nuclear energy, and human capital. *Environ Sustain Indic.* 30:101197. doi:10.1016/j.indic.2026.101197.
- Robinson M, Shine T. 2018. Achieving a climate justice pathway to 1.5 °c. *Nat Clim Chang.* 8(7):564–569. doi:10.1038/s41558-018-0189-7.
- Roy S. 2026. Do Human Capital and Renewable Energy Consumption Matter for the EKC Hypothesis in the Case of SAARC Countries? *Energy Res Lett.* 7 Early View:1–5. doi:10.46557/001c.138286.
- Sakilu OB, Chen H. 2025. Exploring the influence of trade openness, energy consumption, natural resource rents, and human capital in achieving carbon neutrality. *Reg Sustain.* 6(4):100247. doi:10.1016/j.regsus.2025.100247.
- [SCCC] Swiss-Chinese Chamber of Commerce. 2022. Economic Report 2021 - Hong Kong.
- Schafer JL, Graham JW. 2002. Missing Data : Our View of the State of the Art. 7(2):147–177. doi:10.1037//1082-989X.7.2.147.
- Setyowati EP, Atmanti HD. 2025. Dampak Keterbukaan Perdagangan terhadap Indeks Kinerja Lingkungan OECD. *J Rumpun Manaj Dan Ekon.* 2(1):385–391. doi:10.61722/jrme.v2i1.3777.
- Shabani ZD. 2024. Renewable energy and CO2 emissions: Does human capital matter? *Energy Reports.* 11 March:3474–3491. doi:10.1016/j.egyr.2024.03.021.
- Shah MA, Rana JI, Ayoub M. 2023. Brain Drain from Pakistan: Causes and Factors. *Qlantic J Soc Sci.* 4(3):344–351. doi:10.55737/qjss.691034354.
- Shahzad SJH, Ronald Ravinesh Kumar, Muhammad Zakaria MH. 2017. crossmark. *Renew Sustain Energy Rev.* 70 November 2016:185–192. doi:10.1016/j.rser.2016.11.042.
- Shinozaki K, Nishijima J, Wakeyama T. 2025. A game theoretic analysis of geothermal development consensus building in Japan. *Energy Reports.* 13:278–285. doi:10.1016/j.egyr.2024.12.004.
- Siregar SW, Hasbi. 2023. Analisis Pengaruh Keterbukaan Perdagangan, Konsumsi Energi, dan Pertumbuhan Ekonomi terhadap Emisi Karbon di Negara D-8. *J Magister Ekon Syariah.* 2 1 Juni:61–77. doi:10.14421/jmes.2023.021-05.
- Sohag K, Al Mamun M, Uddin GS, Ahmed AM. 2017. Sectoral output, energy use, and CO2 emission in middle-income countries. *Environ Sci Pollut Res.* 24(10):9754–9764. doi:10.1007/s11356-017-8599-z.
- Sun H, Clottery SA, Geng Y, Fang K, Amisshah JCK. 2019. Trade openness and carbon emissions: Evidence from belt and road countries. *Sustain.* 11(9):1–20. doi:10.3390/su11092682.
- Trinh TA, Linh Le TP. 2018. Biofuels Potential for Transportation Fuels in Vietnam: A Status Quo and SWOT Analysis. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 143(1). doi:10.1088/1755-1315/143/1/012065.
- Udemba EN. 2020. A sustainable study of economic growth and development amidst ecological footprint: New insight from Nigerian Perspective. *Sci Total Environ.* 732 May:139270. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139270.
- Umar M, Ji X, Mirza N, Rahat B. 2021. The impact of resource curse on banking

efficiency : Evidence from twelve oil producing countries. *Resour Policy*. 72 January:102080. doi:10.1016/j.resourpol.2021.102080.

[UNDP] United Nations Development Programme. 2022. Asia in Focus: Corporate Accountability and Climate Change.

[UNDP] United Nations Development Programme. 2025. UNDP's Clean Energy Efforts in Iran. [internet]. [diakses pada Juni 2026]. Tersedia pada: <https://www.undp.org/iran/news/undps-clean-energy-efforts-iran>

[UNFCCC] United Nations Framework Convention on Climate Change. 2015. Paris Agreement. Di dalam: *The Paris Agreement*. hlm 1–16.

Usman M. 2020. Dynamic relationship between technological innovations , financial development , renewable energy , and ecological footprint : fresh insights based on the STIRPAT model for Asia Pacific Economic Cooperation countries. Ganda 2019.

Wang MN. 2017. Investigating the environmental Kuznets curve of consumption for developing and developed countries: a study of Albania and Sweden.

Yao S, Zhang S, Zhang X. 2019. Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective. *J Clean Prod*. 235:1338–1352. doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.069.

Yao Y, Ivanovski K, Inekwe J, Smyth R. 2020. Human capital and CO 2 emissions in the long run. *Energy Econ*. 91:104907. doi:10.1016/j.eneco.2020.104907.

Yasin R, Liaquat DM, Safdar DN. 2024. The Role of Renewable Energy, Human Capital, and Carbon Emissions in Driving Economic Growth among South Asian Countries. *Qlantic J Soc Sci*. 5(3):191–199. doi:10.55737/qjss.530394543.

Zeng Y, Maxwell S, Runting RK, Venter O, Watson JEM, Carrasco LR. 2000. Environmental destruction not avoided with the Sustainable Development Goals. *Nat Sustain.*, siap terbit.

Zhang L, Godil DI, Bibi M, Khan MK, Sarwat S, Anser MK. 2021. Caring for the environment: How human capital, natural resources, and economic growth interact with environmental degradation in Pakistan? A dynamic ARDL approach. *Sci Total Environ*. 774:145553. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2021.145553.

Zhang X, Hu S, Naeem MA, Rauf A. 2026. Climate change vulnerability and the resilience of energy consumption. *World Dev*. 201:107316. doi:10.1016/j.worlddev.2026.107316.

Zheng J, Xiang Y, Tu X. 2023. Digital economy, spatial spillover and carbon intensity: concurrently on the threshold effect of human capital. *Econ Res Istraz*. 36(2). doi:10.1080/1331677X.2023.2178022.

Zhou R, Guan S, He B. 2025. The Impact of Trade Openness on Carbon Emissions: Empirical Evidence from Emerging Countries. *Energies*. 18(3):1–20. doi:10.3390/en18030697.