

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

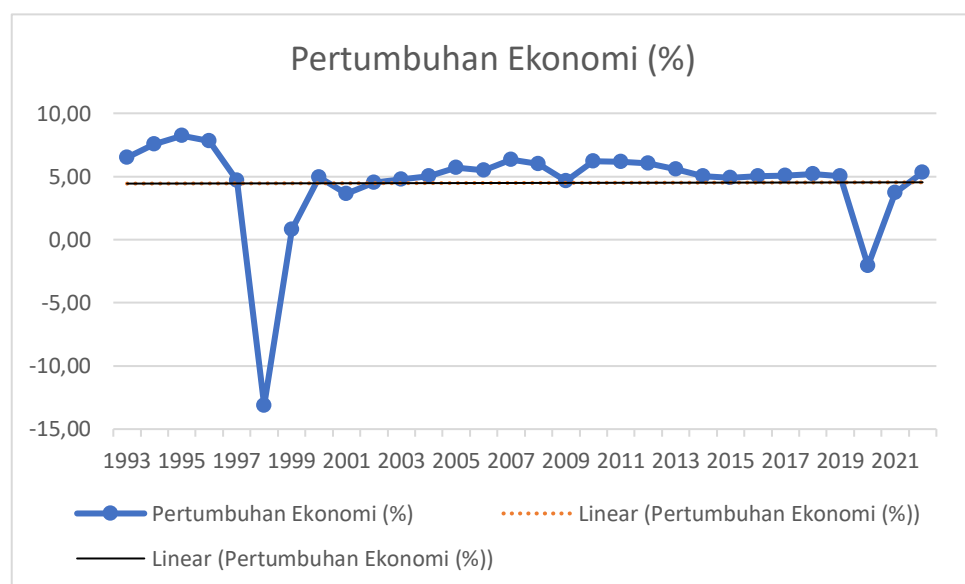
Pertumbuhan ekonomi merupakan salah satu tujuan utama pembangunan di berbagai negara karena diyakini mampu meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan mendorong peningkatan kualitas hidup. Aktivitas ekonomi yang berkembang membawa konsekuensi pada meningkatnya produksi, konsumsi, dan penggunaan energi. Di sisi lain, dinamika pembangunan modern juga menimbulkan tantangan baru terkait keberlanjutan lingkungan. Berbagai laporan internasional menunjukkan bahwa percepatan pembangunan dan industrialisasi sering kali diiringi oleh tekanan terhadap lingkungan, sehingga memunculkan kebutuhan untuk menyeimbangkan antara pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan ekologis (IPCC, 2022; Stern, 2007).

Dalam konteks global, upaya mencapai pembangunan berkelanjutan menjadi semakin penting seiring meningkatkan kekhawatiran mengenai degradasi lingkungan. Banyak negara menghadapi dilema antara melanjutkan ekspansi ekonomi dan menjaga kualitas lingkungan hidup. Ketidakseimbangan antara kedua aspek tersebut menjadi isu yang terus dibahas dalam diskursus pembangunan, terutama bagi negara-negara yang masih berada pada tahap percepatan ekonomi. Oleh karena itu, memahami bagaimana aktivitas ekonomi dapat mempengaruhi kondisi lingkungan menjadi Langkah penting dalam merumuskan arah pembangunan yang lebih berkelanjutan.

Emisi karbon adalah salah satu masalah lingkungan paling mendesak yang dihadapi dunia saat ini. Meningkatnya emisi karbon, terutama dari sektor energi dan industri, menjadi contributor utama terhadap perubahan iklim global. Di negara-negara berkembang, seperti Indonesia, yang sedang berada dalam tahap industrialisasi, peningkatan emisi karbon yang digunakan untuk mendukung sektor industri berasal dari bahan bakar fosil, yang memicu peningkatan emisi. Meskipun ada usaha untuk beralih ke energi terbarukan, transisi ini tidak berjalan mulus, mengingat ketergantungan yang kuat pada energi fosil dan kebutuhan untuk pengembangan teknologi bersih.

Selain dampak terhadap perubahan iklim, emisi karbon yang tinggi juga berkontribusi terhadap kerusakan lingkungan dan kesejahteraan sosial. Peningkatan emisi karbon berhubungan langsung dengan kenaikan suhu global, yang mengarah pada bencana alam, seperti banjir, kekeringan, dan cuaca ekstrem. Hal ini dapat mengancam ketahanan pangan dan memperburuk ketimpangan sosial, terutama di negara berkembang yang memiliki sumber daya terbatas untuk beradaptasi dengan perubahan iklim. Di Indonesia, bencana alam yang semakin sering terjadi telah menunjukkan betapa pentingnya upaya untuk menurunkan emisi karbon guna melindungi masyarakat dan lingkungan.

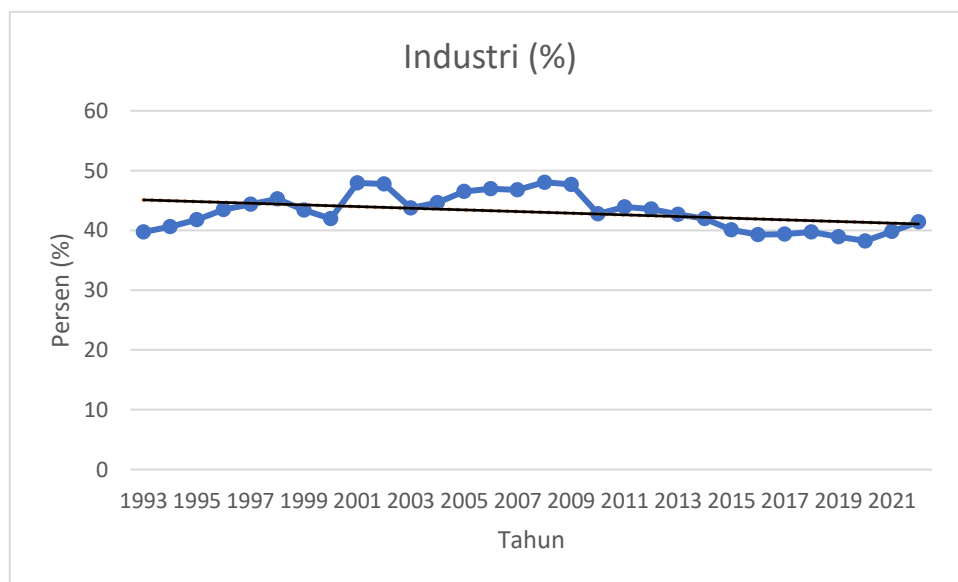
Indonesia, sebagai negara dengan ekonomi terbesar di Asia Tenggara, menghadapi tantangan besar dalam mengurangi emisi karbon. Sebagai negara yang sedang berkembang dengan sektor industri yang terus berkembang, Indonesia mengalami peningkatan konsumsi energi yang besar, dengan sektor energi dan industri menjadi penyumbang utama emisi karbon. Sementara itu, meskipun Indonesia telah mulai beralih ke energi terbarukan, kontribusinya terhadap total energi masih sangat kecil dibandingkan dengan energi fosil.



Sumber: World Bank (2024)

Gambar 1.1 Tren Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Tahun 1993 – 2022

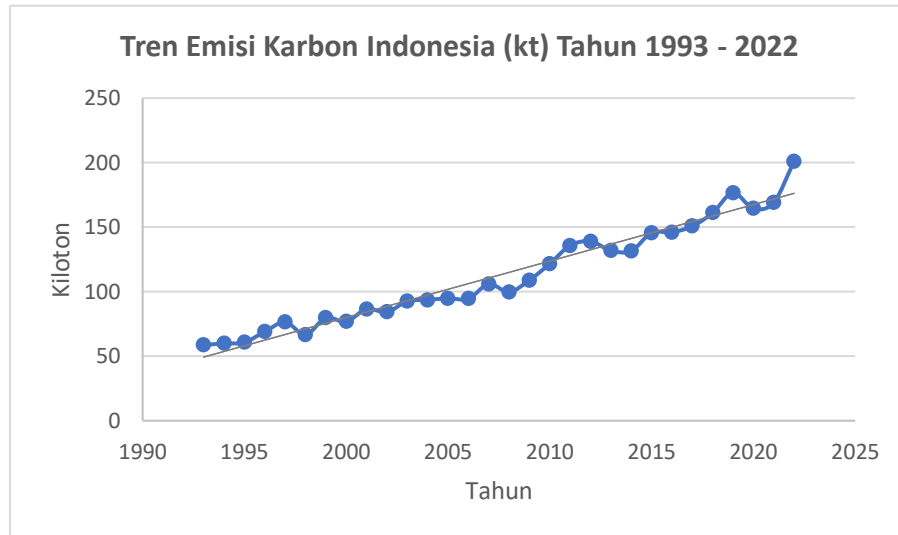
Grafik tersebut menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi Indonesia selama periode 1993–2022 mengalami fluktuasi dengan kontraksi tajam pada akhir dekade 1990-an akibat krisis ekonomi dan perlambatan pada masa pandemi, namun secara umum kembali ke tren pertumbuhan positif pada periode setelahnya. Dalam perspektif ekonomi lingkungan, ekspansi aktivitas ekonomi ini mencerminkan peningkatan skala produksi dan konsumsi yang berpotensi menaikkan emisi melalui mekanisme *scale effect*.



Sumber: World Bank (2024)

Gambar 1.2 Perkembangan Industri di Indonesia Tahun 1993 - 2022

Sektor industri memiliki peran strategis karena berkaitan langsung dengan proses produksi, kebutuhan energi, dan penciptaan nilai tambah. Dalam literatur transformasi struktural, perubahan kontribusi sektor industri terhadap PDB merupakan bagian dari dinamika pembangunan ekonomi, di mana peningkatan pendapatan dan perluasan pasar dapat mendorong perubahan struktur sektor (Chenery & Syrquin, 1975; Herrendorf et al., 2014). Lebih lanjut, perkembangan sektor industri juga dapat dipandang sebagai respon terhadap perluasan permintaan (*demand-led*), sehingga pertumbuhan ekonomi tidak hanya berdampak langsung pada lingkungan melalui peningkatan skala aktivitas, tetapi juga tidak langsung melalui perubahan struktur produksi (*composition effect*) (Comin et al., 2020; Fazzari et al., 2020).



Sumber: World Bank (2024)

Gambar 1.3 Tren Emisi Karbon di Indonesia Tahun 1993 - 2022

Gambar 1.1 menunjukkan tren emisi karbon Indonesia (kt) dari tahun 1993 hingga 2022, dengan data yang menunjukkan kenaikan konsisten sepanjang periode tersebut. Peningkatan emisi ini mencerminkan pertumbuhan ekonomi yang beriringan dengan peningkatan konsumsi energi, terutama energi fosil. Peningkatan yang tajam pada akhir periode, terutama setelah tahun 2020, menunjukkan dampak dari perubahan dalam konsumsi energi, dan ekspansi sektor industri. Grafik ini menyoroti pentingnya manajemen emisi karbon di tengah pertumbuhan ekonomi, serta kebutuhan untuk transisi energi ke sumber yang lebih bersih, guna mengurangi dampak lingkungan.

Untuk menilai apakah emisi Indonesia tergolong rendah, menengah, atau tinggi, indikator yang lebih tepat adalah emisi CO₂ per kapita, karena tidak ada ambang batas universal untuk emisi total (kt) suatu negara, total emisi sangat dipengaruhi jumlah penduduk. Dalam praktik kajian komparatif, emisi per kapita sering dikelompokkan secara sederhana: <2 ton/kapita (rendah), 2–6 ton/kapita (menengah), dan >6 ton/kapita (tinggi). Namun, untuk menilai apakah Indonesia “sesuai batas yang diharapkan” dalam konteks mitigasi iklim, pembandingan yang paling relevan adalah lintasan target kebijakan seperti Enhanced NDC dan kebutuhan penurunan emisi global menurut IPCC, bukan ambang “normal” berbasis total emisi. Jika tren emisi Indonesia 1993–2022 masih meningkat, maka Indonesia dapat dinilai belum on track menuju jalur

penurunan emisi yang ditargetkan, sehingga perlu percepatan transisi energi dan efisiensi rendah karbon.

Berdasarkan tren emisi karbon yang terlihat pada gambar 1, peningkatan emisi ini sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan ekspansi sektor industri di Indonesia, yang menunjukkan bahwa skala produksi dan konsumsi energi yang tinggi menjadi faktor utama meningkatnya emisi karbon. Kondisi ini menegaskan bahwa pertumbuhan ekonomi, meskipun penting untuk pembangunan, berdampak langsung pada peningkatan jejak karbon negara. Selain itu, meskipun produksi energi terbarukan telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir, kontribusinya terhadap total energi masih relative kecil, sehingga pengaruhnya terhadap penurunan emisi karbon belum maksimal.

Faktor-faktor tersebut menjadi variabel penting yang mempengaruhi tingkat emisi karbon. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanpa pemahaman yang jelas mengenai peran sektor industri dan produksi energi terbarukan, upaya pengendalian emisi karbon di Indonesia dapat menghadapi hambatan signifikan.

Secara teoritis, hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon sering dijelaskan melalui Environmental Kuznets Curve (EKC). Dalam kerangka EKC, pada tahap awal pembangunan, peningkatan pendapatan dan ekspansi aktivitas ekonomi cenderung meningkatkan degradasi lingkungan melalui *scale effect*. Pada tahap berikutnya, dinamika struktur sektor (*composition effect*) dan perubahan teknologi/bauran energi (*technique effect*) dapat mengubah arah hubungan tersebut (Panayotou, 1997; Stern, 2004). Dengan demikian, fokus penting penelitian bukan sekadar memastikan “pertumbuhan berpengaruh terhadap emisi”, melainkan menilai dinamika fase pembangunan dan mekanisme yang menyertainya.

Dalam penelitian ini, pertumbuhan ekonomi dipahami sebagai faktor yang memperbesar skala aktivitas ekonomi (*scale effect*) sekaligus memperluas permintaan. Perluasan permintaan tersebut mendorong ekspansi sektor industri sebagai respon pasar, sehingga industri diposisikan sebagai mekanisme transmisi yang menyalurkan pengaruh aktivitas ekonomi terhadap emisi melalui perubahan struktur produksi (*composition effect*) (Herrendorf et

al., 2014; Comin et al., 2020). Selanjutnya, energi terbarukan diposisikan sebagai faktor yang dapat menurunkan intensitas emisi melalui transisi bauran energi dan perbaikan teknologi (*technique effect*) (Brock & Taylor, 2010; IEA, 2020). Sementara itu, ekspor dipahami sebagai proksi permintaan eksternal yang memperluas skala produksi domestik sehingga berpotensi meningkatkan emisi melalui *scale effect*, dan dalam kondisi tertentu dapat memengaruhi komposisi sektor produksi (Antweiler et al., 2001; Copeland & Taylor, 2003).

Meskipun penelitian terkait hubungan pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon telah banyak dilakukan, sebagian besar studi masih menekankan hubungan langsung antara pertumbuhan dan emisi atau sekadar menguji pola EKC secara agregat. Dalam konteks Indonesia, masih terbatas kajian yang menempatkan sektor industri sebagai variabel transmisi (intervening) dalam hubungan pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon sekaligus mempertimbangkan peran energi terbarukan serta ekspor sebagai faktor yang memperkuat atau menahan dinamika emisi dalam satu kerangka analisis yang konsisten (Stern, 2004; Antweiler et al., 2001; Brock & Taylor, 2010). Di sisi lain, meskipun energi terbarukan sering dipandang sebagai solusi penurunan emisi, kajian yang menguji perannya dalam dinamika pertumbuhan–struktur industri–emisi pada horizon jangka panjang Indonesia masih perlu diperkuat, terutama mengingat ketergantungan energi fosil yang masih tinggi (IEA, 2020; IPCC, 2022).

Berdasarkan tren emisi karbon yang cenderung meningkat, dinamika pertumbuhan ekonomi yang kembali ekspansif setelah periode krisis, serta struktur produksi dan energi yang masih relatif intensif karbon, Indonesia diduga masih berada pada fase awal hingga menengah EKC, di mana *scale effect* dan *composition effect* lebih dominan dibandingkan *technique effect*. Artinya, pertumbuhan ekonomi dan ekspansi sektor industri belum sepenuhnya diimbangi oleh transisi energi dan perbaikan teknologi yang memadai untuk menekan emisi karbon secara signifikan. Kondisi ini menjadi dasar penting untuk menguji secara empiris bagaimana pertumbuhan ekonomi, sektor industri, energi terbarukan, dan ekspor memengaruhi emisi karbon Indonesia pada periode 1993–2022, serta bagaimana dinamika tersebut merefleksikan posisi Indonesia dalam fase EKC.

Berangkat dari kondisi tersebut, penting untuk mengkaji pengaruh pertumbuhan ekonomi, produksi energi terbarukan, dan ekspor terhadap emisi karbon di Indonesia, dengan mempertimbangkan peran sektor industri sebagai variabel yang memediasi hubungan tersebut. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika antara aspek ekonomi dan lingkungan dalam kerangka pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis **“Pertumbuhan Ekonomi, Produksi Energi Terbarukan, dan Ekspor terhadap emisi karbon di Indonesia”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah pertumbuhan ekonomi berpengaruh terhadap emisi karbon secara langsung dan tidak langsung melalui sektor industri di Indonesia?
2. Apakah produksi energi terbarukan berpengaruh terhadap emisi karbon secara langsung dan tidak langsung melalui sektor industri di Indonesia?
3. Apakah ekspor berpengaruh terhadap emisi karbon secara langsung dan tidak langsung melalui sektor industri di Indonesia?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh pertumbuhan ekonomi terhadap emisi karbon secara langsung dan tidak langsung melalui sektor industri di Indonesia.
2. Mengetahui dan menganalisis pengaruh produksi energi terbarukan terhadap emisi karbon secara langsung dan tidak langsung melalui sektor industri di Indonesia.
3. Mengetahui dan menganalisis pengaruh ekspor terhadap emisi karbon secara langsung dan tidak langsung melalui sektor industri di Indonesia.

1.4 Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini, maka hasil yang diharapkan untuk diambil manfaatnya, sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan literatur dalam bidang ekonomi lingkungan, khususnya dalam memahami hubungan antara pertumbuhan ekonomi, produksi energi terbarukan, ekspor, dan emisi karbon. Dengan menambahkan variabel intervening berupa sektor industri, penelitian ini juga berkontribusi dalam memperkaya pendekatan model empiris yang menelaah mekanisme tidak langsung (mediasi) dalam studi tentang emisi karbon di negara berkembang. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi akademisi dan peneliti lain yang ingin mengembangkan model serupa dengan pendekatan ekonomi, energi, dan lingkungan yang terintegrasi.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini dapat memberikan masukan bagi pemerintah dan pemangku kebijakan dalam merumuskan strategi pembangunan rendah karbon. Temuan empiris mengenai pengaruh pertumbuhan ekonomi, transisi energi, dan perdagangan internasional terhadap emisi karbon di Indonesia, serta peran sektor industri sebagai mediator, dapat digunakan untuk merancang kebijakan yang lebih terarah dalam mencapai target pengurangan emisi nasional. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi rujukan bagi pelaku industri dan sektor swasta dalam mendorong adopsi energi bersih dan efisiensi produksi yang lebih berkelanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Teori dan Konsep

2.1.1 Teori *Environmental Kuznets Curve* (EKC)

Environmental Kuznets Curve (EKC) merupakan hipotesis yang menjelaskan bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan degradasi lingkungan dapat bersifat *non-linear*. Dalam banyak kajian empiris, EKC digambarkan sebagai pola U-terbalik, yaitu pada tahap awal pembangunan peningkatan pendapatan atau aktivitas produksi cenderung disertai peningkatan tekanan lingkungan (misalnya emisi), namun setelah mencapai tingkat pendapatan tertentu, tekanan lingkungan dapat menurun seiring perubahan struktur ekonomi, kemajuan teknologi, serta penguatan institusi dan kebijakan lingkungan (Grossman & Krueger, 1991). Literatur menempatkan EKC sebagai alat analisis untuk memahami dilema pembangunan, yaitu bagaimana pertumbuhan ekonomi dapat berjalan tanpa mendorong kerusakan lingkungan secara terus-menerus (Stern, 2004).

Secara konseptual, mekanisme EKC umumnya dijelaskan melalui tiga kanal utama: *scale effect*, *composition effect*, dan *technique effect*. Pertama, *scale effect* menjelaskan bahwa ketika skala aktivitas ekonomi meningkat, kebutuhan energi dan penggunaan input produksi cenderung meningkat sehingga emisi dan polusi naik, terutama bila perekonomian masih didominasi sektor intensif energi dan teknologi pengendalian polusi belum berkembang. Kedua, *composition effect* menjelaskan bahwa pertumbuhan ekonomi dapat mengubah struktur perekonomian, misalnya pergeseran dari sektor yang lebih intensif emisi menuju sektor yang lebih efisien atau berorientasi jasa, sehingga intensitas emisi dapat menurun pada tahap pembangunan tertentu. Ketiga, *technique effect* menekankan bahwa peningkatan pendapatan dapat mendorong perbaikan kualitas lingkungan melalui adopsi teknologi produksi yang lebih bersih, efisiensi energi, peningkatan standar lingkungan, serta kebijakan pengendalian emisi yang lebih efektif (Panayotou, 1997).

Walaupun banyak studi menemukan pola EKC pada beberapa indikator lingkungan, EKC bukanlah hubungan yang otomatis berlaku untuk semua negara dan semua jenis polutan. Stern (2004) menekankan bahwa temuan EKC dapat berubah tergantung spesifikasi model, kualitas data, serta pendekatan ekonometrika yang digunakan. Perman dan Stern (2003) juga menunjukkan bahwa pada beberapa kasus, klaim keberadaan EKC menjadi lemah ketika diuji dengan pendekatan panel unit root dan kointegrasi, sehingga hubungan pendapatan-lingkungan tidak selalu menunjukkan pola U-terbalik yang stabil. Khusus untuk polutan global seperti emisi CO₂, bukti empiris EKC sering lebih bervariasi karena emisi CO₂ sangat dipengaruhi oleh bauran energi, struktur industri, keterbukaan perdagangan, serta kemampuan inovasi teknologi rendah karbon (Stern, 2004; Brock & Taylor, 2010).

Dalam penelitian ini, degradasi lingkungan diproksi oleh emisi karbon (CO₂), sehingga EKC digunakan sebagai *grand theory* untuk menjelaskan bagaimana pertumbuhan ekonomi berpotensi meningkatkan emisi pada fase awal (*dominant scale effect*), namun emisi dapat ditekan pada fase berikutnya apabila terjadi perubahan struktur ekonomi dan peningkatan teknologi ramah lingkungan (*composition* dan *technique effect*). Dengan menjadikan EKC sebagai *grand theory*, variabel-variabel lain dalam penelitian seperti energi terbarukan, ekspor, dan sektor industri dipandang sebagai faktor yang dapat memperkuat atau melemahkan mekanisme EKC tersebut. Peningkatan pemanfaatan energi terbarukan, misalnya, secara konseptual dapat menekan emisi melalui peningkatan efisiensi dan peralihan sumber energi (*kanal technique effect*), sementara keterbukaan perdagangan dapat meningkatkan emisi melalui peningkatan skala produksi atau menggeser aktivitas intensif-polusi antarwilayah sehingga hasil hubungan pertumbuhan dan emisi dapat berbeda antarnegara dan antarperiode. Oleh karena itu, pemahaman EKC dalam penelitian ini tidak diperlakukan sebagai teori yang absolut, melainkan sebagai kerangka yang perlu dibaca bersama konteks struktur ekonomi, energi, dan perdagangan.

2.1.2 Pertumbuhan Ekonomi Hijau (*Green Economic Growth*)

Pertumbuhan ekonomi hijau (*green economic growth*) merupakan pendekatan pembangunan yang menekankan bahwa peningkatan output dan kesejahteraan ekonomi perlu berjalan seiring dengan penurunan tekanan terhadap lingkungan melalui peningkatan efisiensi sumber daya, perbaikan kualitas lingkungan, dan penguatan inovasi teknologi rendah karbon. Dalam kerangka kebijakan, pertumbuhan ekonomi hijau umumnya dikaitkan dengan strategi untuk mencapai *decoupling*, yaitu pemisahan antara pertumbuhan ekonomi dan peningkatan degradasi lingkungan, terutama melalui pengurangan intensitas emisi serta peningkatan produktivitas energi dan sumber daya (World Bank, 2012).

Secara konseptual, pertumbuhan ekonomi hijau berangkat dari premis bahwa lingkungan bukan sekadar “biaya” pembangunan, melainkan bagian dari modal pembangunan (*natural capital*) yang menopang keberlanjutan pertumbuhan jangka panjang. Karena itu, pertumbuhan ekonomi hijau menekankan pentingnya menjaga kualitas modal alam dan mengurangi risiko lingkungan yang dapat menurunkan kesejahteraan di masa depan. Kerangka ini juga menekankan peran kebijakan publik untuk mengoreksi kegagalan pasar, termasuk eksternalitas lingkungan, melalui instrumen regulasi, insentif, standar lingkungan, dan dukungan inovasi yang mendorong peralihan menuju proses produksi lebih bersih.

Dalam praktiknya, pertumbuhan ekonomi hijau sangat terkait dengan transformasi sistem energi. Peralihan menuju energi terbarukan dan peningkatan efisiensi energi dipandang sebagai jalur kunci untuk menurunkan intensitas emisi tanpa harus menghentikan aktivitas ekonomi, karena energi merupakan input utama produksi dan konsumsi. Oleh karena itu, kebijakan energi dan investasi teknologi rendah karbon menjadi komponen penting dalam agenda pertumbuhan ekonomi hijau. Selain energi, transformasi struktur produksi juga relevan, karena perubahan komposisi sektor dan penerapan teknologi produksi yang lebih efisien dapat menurunkan intensitas emisi pada tingkat output yang sama.

Pertumbuhan ekonomi hijau juga berkaitan dengan keterbukaan ekonomi dan perdagangan. Di satu sisi, perdagangan dan ekspor dapat mendorong peningkatan skala produksi yang berpotensi meningkatkan emisi. Namun di sisi lain, keterbukaan ekonomi dapat mempercepat difusi teknologi, mendorong peningkatan standar produksi karena tuntutan pasar internasional, serta memperkuat inovasi dan efisiensi agar produk tetap kompetitif. Artinya, dampak ekspor terhadap emisi dan kualitas lingkungan dapat bergantung pada struktur komoditas ekspor, standar lingkungan, serta kemampuan inovasi dan tata kelola kebijakan domestik.

Walaupun demikian, literatur juga menekankan bahwa pencapaian pertumbuhan ekonomi hijau bukan proses otomatis. Tantangan utama di negara berkembang meliputi keterbatasan teknologi dan pembiayaan, kapasitas kelembagaan, serta risiko *rebound effect* ketika peningkatan efisiensi justru mendorong kenaikan konsumsi. Selain itu, terdapat perdebatan apakah *decoupling* absolut dapat dicapai secara konsisten di semua konteks. Karena itu, pertumbuhan ekonomi hijau perlu dilihat sebagai strategi kebijakan dan transformasi struktural yang bergantung pada kualitas institusi, rancangan instrumen kebijakan, dan kesiapan teknologi (Stern, 2004).

Berdasarkan kerangka tersebut, pertumbuhan ekonomi hijau dalam penelitian ini digunakan sebagai teori utama kedua yang menjelaskan jalur kebijakan dan mekanisme transformasi (energi, teknologi, struktur produksi, dan standar) yang memungkinkan pertumbuhan ekonomi berjalan seiring dengan upaya penurunan emisi karbon. Dengan demikian, teori ini melengkapi EKC yang berperan sebagai *grand theory* pola hubungan pertumbuhan dan degradasi lingkungan, sementara pertumbuhan ekonomi hijau menjelaskan mekanisme kebijakan dan transformasi yang dapat memperkuat penurunan intensitas emisi.

2.1.3 Teori Industrialisasi

Dalam literatur ekonomi pembangunan, industrialisasi dipandang sebagai bagian dari proses transformasi struktural yang menyertai pertumbuhan ekonomi jangka panjang. Transformasi struktural merujuk pada perubahan komposisi sektor produksi dalam perekonomian, khususnya pergeseran kontribusi relatif sektor pertanian, industri, dan jasa seiring meningkatnya tingkat pendapatan dan kapasitas produksi suatu negara. Chenery dan Syrquin (1975) menunjukkan bahwa perubahan struktur sektor merupakan pola umum pembangunan ekonomi lintas negara, di mana peningkatan pendapatan biasanya diikuti oleh peningkatan peran sektor industri sebelum pada tahap lanjut peran sektor jasa menjadi lebih dominan. Pandangan ini diperkuat oleh Kuznets (1971) yang menegaskan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak hanya meningkatkan output agregat, tetapi juga mengubah struktur produksi dan konsumsi melalui perubahan pola permintaan masyarakat.

Literatur transformasi struktural modern menegaskan bahwa dinamika sektor industri merupakan hasil interaksi antara faktor penawaran dan faktor permintaan. Herrendorf, Rogerson, dan Valentinyi (2014) menunjukkan bahwa perubahan struktur sektor dalam jangka panjang dipengaruhi oleh perbedaan produktivitas antar sektor serta perubahan preferensi konsumsi seiring peningkatan pendapatan. Studi yang lebih mutakhir oleh Comin, Lashkari, dan Mestieri (2020) menekankan bahwa efek pendapatan (*income effects*) dan perubahan komposisi permintaan memainkan peran penting dalam menjelaskan dinamika sektor industri, termasuk pola peningkatan dan penurunan kontribusi manufaktur dalam PDB. Dengan demikian, pertumbuhan ekonomi dapat mendahului perkembangan sektor industri melalui mekanisme perluasan pasar dan perubahan struktur permintaan, bukan semata-mata melalui kemajuan teknologi atau akumulasi modal.

Pendekatan ini sejalan dengan teori industrialisasi berbasis permintaan (*demand-led* atau *demand-pull industrialization*), yang menekankan bahwa ukuran dan keberlanjutan permintaan merupakan prasyarat utama bagi berkembangnya sektor industri. Rosenstein-Rodan (1943) mengemukakan bahwa industrialisasi memerlukan pasar yang cukup

besar untuk menopang produksi berskala besar dan menghindari kegagalan koordinasi antarindustri. Murphy, Shleifer, dan Vishny (1989) kemudian memformalkan gagasan tersebut dalam kerangka *big push*, dengan menunjukkan bahwa peningkatan permintaan agregat dan ukuran pasar dapat mendorong industrialisasi melalui efek eksternalitas permintaan dan skala produksi. Literatur demand-led modern juga menegaskan bahwa permintaan efektif memiliki peran sentral dalam mendorong ekspansi output dan kapasitas produksi, khususnya di negara berkembang yang pertumbuhan ekonominya banyak ditopang oleh konsumsi dan perluasan pasar domestik (Fazzari, Ferri, & Variato, 2020).

Dalam konteks pembangunan ekonomi kontemporer, peran sektor industri tidak selalu diposisikan sebagai faktor awal yang mendorong pertumbuhan ekonomi, tetapi dapat berkembang sebagai respon terhadap pertumbuhan ekonomi yang meningkatkan pendapatan dan memperluas pasar. Peningkatan pendapatan masyarakat mendorong permintaan terhadap barang-barang manufaktur dan produk bernilai tambah lebih tinggi, sehingga menciptakan insentif ekonomi bagi pelaku usaha untuk memperluas kapasitas produksi dan meningkatkan kontribusi sektor industri dalam perekonomian. Literatur transformasi struktural terbaru juga menunjukkan bahwa dinamika kontribusi sektor industri terhadap PDB, baik peningkatan maupun penurunannya merupakan fenomena yang umum terjadi dan sangat dipengaruhi oleh perubahan permintaan, integrasi pasar, serta tahap pembangunan ekonomi.

Dari perspektif ekonomi lingkungan, perkembangan sektor industri memiliki implikasi langsung terhadap emisi karbon karena aktivitas industri umumnya bersifat intensif energi dan melibatkan proses produksi yang menghasilkan emisi. Perubahan kontribusi sektor industri dalam struktur perekonomian dapat memengaruhi intensitas emisi melalui perubahan komposisi sektor produksi dan pola penggunaan energi. Dalam kerangka *Environmental Kuznets Curve (EKC)*, dinamika sektor industri merepresentasikan *composition effect*, yaitu mekanisme di mana perubahan struktur ekonomi dapat memperkuat atau melemahkan dampak pertumbuhan ekonomi terhadap degradasi lingkungan (Stern, 2004). Apabila pertumbuhan ekonomi mendorong peningkatan peran sektor industri yang intensif energi,

maka emisi karbon cenderung meningkat. Sebaliknya, apabila transformasi struktural mengarah pada sektor yang lebih efisien dan kurang intensif karbon, maka tekanan terhadap lingkungan dapat berkurang.

2.1.4 Teori Eksternalitas Negatif

Teori eksternalitas negatif menjelaskan kondisi ketika aktivitas ekonomi suatu pihak (produsen atau konsumen) menimbulkan dampak merugikan bagi pihak lain yang tidak tercermin dalam harga pasar. Dampak tersebut disebut sebagai biaya eksternal (*external cost*), karena pelaku ekonomi tidak menanggung seluruh biaya sosial dari kegiatannya. Dalam konteks lingkungan, eksternalitas negatif umumnya muncul ketika proses produksi dan konsumsi menghasilkan pencemaran atau emisi (misalnya emisi CO₂) yang menurunkan kualitas lingkungan, kesehatan, atau produktivitas masyarakat, namun biaya kerusakan tersebut tidak dibayar oleh pelaku yang menghasilkan emisi (Tietenberg & Lewis, 2018).

Eksternalitas negatif merupakan salah satu bentuk kegagalan pasar (*market failure*). Ketika biaya eksternal tidak diinternalisasi, maka keputusan produksi dan konsumsi cenderung menghasilkan tingkat output dan pencemaran yang lebih tinggi dibandingkan tingkat yang optimal secara sosial. Kondisi ini terjadi karena pelaku ekonomi hanya mempertimbangkan biaya privat (misalnya biaya input dan tenaga kerja), bukan biaya sosial yang lebih luas termasuk kerusakan lingkungan. Dengan demikian, eksternalitas negatif memberikan dasar teoretis mengapa pertumbuhan ekonomi dan ekspansi aktivitas produksi dapat diikuti oleh peningkatan emisi, khususnya ketika struktur energi masih bergantung pada bahan bakar fosil dan teknologi produksi belum efisien (Perman et al., 2011).

Dalam ekonomi lingkungan, konsep eksternalitas negatif juga menjadi landasan bagi intervensi kebijakan untuk memperbaiki alokasi sumber daya. Pigou (1920) menjelaskan bahwa ketika aktivitas ekonomi menimbulkan biaya eksternal, pemerintah dapat melakukan koreksi melalui instrumen kebijakan seperti pajak, regulasi, atau standar emisi agar pelaku ekonomi menghadapi biaya sosial yang sebenarnya. Kebijakan tersebut bertujuan mendorong perubahan perilaku produsen dan konsumen menuju tingkat pencemaran

yang lebih rendah dan penggunaan teknologi yang lebih bersih. Selain itu, pendekatan berbasis pasar seperti perdagangan izin emisi (*cap-and-trade*) juga dibahas dalam literatur sebagai mekanisme untuk membatasi emisi total dan menciptakan insentif efisiensi.

Berkaitan dengan penelitian ini, eksternalitas negatif digunakan untuk menjelaskan bahwa peningkatan aktivitas ekonomi (pertumbuhan output), peningkatan produksi energi, ekspansi sektor industri, serta dinamika perdagangan (misalnya ekspor) dapat meningkatkan emisi karbon apabila biaya lingkungan dari emisi tidak diperhitungkan dalam keputusan ekonomi. Dalam kondisi tersebut, emisi karbon menjadi konsekuensi yang “rasional” dari sudut pandang pelaku pasar, namun tidak optimal bagi masyarakat karena menimbulkan biaya sosial berupa degradasi lingkungan. Oleh karena itu, teori eksternalitas negatif memperkuat argumen bahwa hubungan antara variabel-variabel ekonomi dan emisi karbon tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencerminkan kegagalan mekanisme pasar dalam mengelola sumber daya lingkungan secara efisien.

2.1.5 Teori Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development*)

Pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*) merupakan konsep pembangunan yang menekankan bahwa peningkatan kesejahteraan generasi saat ini harus dilakukan tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhannya. Definisi ini menjadi rujukan paling umum dalam literatur setelah diperkenalkan oleh World Commission on Environment and Development (WCED) melalui laporan *Our Common Future*. Dalam kerangka ini, tujuan pembangunan tidak semata mengejar pertumbuhan ekonomi, tetapi juga menjaga keberlanjutan sistem lingkungan dan meningkatkan kesejahteraan sosial secara adil.

Konsep pembangunan berkelanjutan sering dipahami melalui tiga pilar utama, yaitu ekonomi, sosial, dan lingkungan. Pilar ekonomi berkaitan dengan penciptaan nilai tambah dan peningkatan pendapatan; pilar sosial menekankan keadilan, inklusi, serta peningkatan kualitas hidup; sedangkan pilar lingkungan menekankan pelestarian sumber daya alam dan pengendalian pencemaran agar daya dukung dan daya tampung lingkungan

tetap terjaga (Perman et al., 2011). Ketiga pilar tersebut saling terkait, sehingga keberhasilan pembangunan tidak dapat dinilai hanya dari indikator ekonomi seperti PDB, melainkan perlu mempertimbangkan biaya lingkungan dan dampak sosial yang menyertainya.

Dalam ekonomi lingkungan, pembangunan berkelanjutan juga berkaitan dengan gagasan bahwa lingkungan dan sumber daya alam merupakan bentuk modal yang menopang aktivitas ekonomi. Kerusakan lingkungan dan penurunan kualitas sumber daya alam dapat menurunkan produktivitas dan kesejahteraan pada jangka panjang, sehingga strategi pembangunan perlu memperhitungkan keterbatasan ekologis serta risiko kerusakan yang bersifat kumulatif. Perspektif ini menegaskan bahwa pertumbuhan ekonomi yang mengabaikan biaya lingkungan berpotensi menciptakan pertumbuhan yang tidak berkelanjutan karena menghasilkan beban eksternal bagi masyarakat dan generasi berikutnya.

Selain itu, pembangunan berkelanjutan menekankan pentingnya perbaikan tata kelola dan kebijakan publik untuk menyeimbangkan tujuan ekonomi dengan perlindungan lingkungan. Agenda global seperti *Sustainable Development Goals (SDGs)* menempatkan aksi iklim, energi bersih, produksi dan konsumsi berkelanjutan, serta pertumbuhan ekonomi inklusif sebagai sasaran yang harus dicapai secara simultan. Dengan demikian, pembangunan berkelanjutan menjadi kerangka normatif sekaligus kebijakan yang mendukung transisi menuju ekonomi rendah karbon, termasuk melalui peningkatan efisiensi energi, pengembangan energi terbarukan, serta penguatan inovasi teknologi ramah lingkungan.

Dalam penelitian ini, teori pembangunan berkelanjutan digunakan untuk memperkuat landasan konseptual bahwa hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon perlu dianalisis dalam kerangka keberlanjutan. Pertumbuhan ekonomi yang tinggi dapat meningkatkan emisi jika didorong oleh ekspansi produksi dan konsumsi berbasis energi fosil. Namun, dalam perspektif pembangunan berkelanjutan, pertumbuhan ekonomi idealnya diarahkan untuk menjaga kualitas lingkungan melalui perubahan struktur ekonomi, efisiensi sumber daya, serta transisi energi yang lebih bersih. Oleh karena itu, teori ini relevan dalam menjelaskan mengapa

variabel seperti produksi energi terbarukan, keterbukaan perdagangan (ekspor), dan dinamika sektor produksi perlu dipahami tidak hanya sebagai pendorong pertumbuhan, tetapi juga sebagai faktor yang menentukan keberlanjutan lingkungan dalam jangka panjang (Perman et al., 2011).

2.1.6 Ekspor

Dalam ekonomi makro dan ekonomi internasional, ekspor dipandang sebagai salah satu komponen utama permintaan agregat yang merefleksikan permintaan eksternal terhadap output domestik. Peningkatan ekspor mencerminkan meningkatnya permintaan pasar internasional atas barang dan jasa yang diproduksi di dalam negeri, sehingga mendorong peningkatan skala produksi dan kapasitas output domestik. Dalam kerangka ini, ekspor tidak dipahami semata-mata sebagai aktivitas perdagangan lintas batas, melainkan sebagai faktor yang memperluas pasar dan memengaruhi keputusan produksi sektor-sektor domestik.

Literatur ekonomi menekankan bahwa peningkatan ekspor dapat mendorong ekspansi produksi melalui mekanisme *scale effect*. Ketika permintaan eksternal meningkat, perusahaan merespons dengan meningkatkan volume produksi untuk memenuhi pasar domestik dan internasional. Peningkatan produksi tersebut umumnya diikuti oleh peningkatan penggunaan input produksi, termasuk energi, sehingga berpotensi meningkatkan tekanan terhadap lingkungan apabila struktur energi dan teknologi produksi masih didominasi oleh sumber energi fosil (Copeland & Taylor, 2003). Dengan demikian, hubungan antara ekspor dan emisi karbon bekerja terutama melalui peningkatan skala aktivitas ekonomi, bukan melalui aktivitas perdagangan itu sendiri.

Dalam konteks pembangunan ekonomi, peran ekspor sebagai pendorong skala produksi juga berkaitan dengan struktur produksi dan sektor yang berkembang. Keterbukaan perdagangan dan ekspansi ekspor dapat memperkuat peran sektor-sektor tertentu dalam perekonomian, termasuk sektor industri yang bersifat intensif energi. Hal ini menunjukkan bahwa ekspor tidak hanya memengaruhi emisi melalui *scale effect*, tetapi juga berpotensi memengaruhi *composition effect* melalui perubahan struktur produksi dan

spesialisasi sektor (Antweiler, Copeland, & Taylor, 2001). Oleh karena itu, dampak ekspor terhadap emisi karbon sangat bergantung pada karakteristik sektor produksi yang menopang ekspor serta intensitas energi yang digunakan.

Literatur empiris yang lebih mutakhir juga menunjukkan bahwa hubungan antara ekspor dan emisi tidak bersifat tunggal dan otomatis. Di satu sisi, ekspor dapat meningkatkan emisi melalui peningkatan skala produksi; di sisi lain, keterbukaan perdagangan dapat mendorong difusi teknologi, peningkatan efisiensi, dan penerapan standar produksi yang lebih ketat akibat tuntutan pasar internasional. Namun, pada banyak negara berkembang, efek peningkatan skala produksi sering kali lebih dominan dibandingkan efek teknologi dalam jangka pendek, terutama ketika kapasitas inovasi dan transisi energi masih terbatas (Stern, 2004; Cole, 2004). Oleh karena itu, secara konseptual ekspor dalam penelitian ini diperlakukan sebagai proksi permintaan eksternal yang terutama bekerja melalui *scale effect* produksi domestik, dengan implikasi terhadap emisi karbon yang bergantung pada struktur industri dan bauran energi yang berlaku.

2.1.7 *Pollution Haven Hypothesis* (PHH)

Pollution Haven Hypothesis (PHH) menjelaskan bahwa keterbukaan ekonomi, khususnya melalui perdagangan internasional dan arus investasi, dapat mendorong perpindahan atau ekspansi aktivitas produksi yang intensif polusi menuju negara atau wilayah yang memiliki standar dan penegakan regulasi lingkungan lebih lemah. Dalam kerangka ini, perbedaan keketatan kebijakan lingkungan antarnegara menciptakan insentif biaya bagi perusahaan untuk menempatkan produksi yang “kotor” di lokasi dengan biaya kepatuhan lingkungan yang lebih rendah (Copeland & Taylor, 2003). Akibatnya, negara dengan regulasi lingkungan relatif longgar berpotensi menjadi “surga polusi” (*pollution haven*), sehingga emisi dan tekanan lingkungan dapat meningkat seiring meningkatnya aktivitas produksi untuk pasar domestik maupun ekspor.

Secara teoritis, PHH berangkat dari gagasan bahwa kebijakan lingkungan dapat memengaruhi keunggulan komparatif. Jika biaya pengendalian polusi merupakan bagian dari biaya produksi, maka negara dengan kebijakan lingkungan lebih ketat akan menghadapi biaya produksi yang lebih tinggi untuk industri tertentu, sehingga produksi industri tersebut cenderung bergeser ke negara dengan regulasi lebih longgar. Dalam konteks perdagangan, mekanisme ini dapat memengaruhi struktur ekspor: negara dengan standar lingkungan lebih lemah cenderung mengekspor lebih banyak produk dari industri yang intensif polusi (*pollution-intensive goods*) (Cole, 2004). Konsekuensinya, keterbukaan perdagangan bukan hanya memperbesar skala produksi (yang meningkatkan emisi), tetapi juga dapat mengubah komposisi sektor yang berkembang ke arah sektor yang lebih polutif.

Dalam literatur empiris, PHH sering dihubungkan dengan dua mekanisme yang memperkuat tekanan lingkungan. Pertama, melalui *scale effect*, keterbukaan perdagangan dapat meningkatkan produksi total untuk memenuhi pasar internasional, sehingga emisi meningkat apabila teknologi dan bauran energi tidak berubah. Kedua, melalui *composition effect*, keterbukaan dapat mendorong spesialisasi pada sektor tertentu, termasuk sektor yang lebih intensif emisi, apabila faktor biaya (termasuk biaya kepatuhan lingkungan) mendukung arah tersebut. Sejumlah studi menunjukkan bukti bahwa relokasi atau perubahan pola industri dapat terjadi, meskipun hasilnya sering bergantung pada jenis polutan, sektor, dan spesifikasi data yang digunakan (Levinson & Taylor, 2008).

Namun, literatur juga menekankan bahwa PHH tidak selalu berlaku secara universal. Beberapa studi mengemukakan bahwa keterbukaan ekonomi dapat meningkatkan difusi teknologi dan praktik produksi yang lebih bersih, sehingga dampak perdagangan tidak selalu meningkatkan polusi. Dalam konteks ini muncul pandangan alternatif seperti *pollution*, yaitu keterbukaan dan investasi dapat membawa teknologi lebih maju dan standar produksi lebih bersih. Selain itu, pengujian empiris PHH menghadapi tantangan karena perbedaan pengukuran keketatan regulasi lingkungan, heterogenitas sektor, serta pengaruh faktor institusional lain seperti kualitas tata kelola dan struktur energi (Cole, 2004; Levinson & Taylor, 2008).

Berkaitan dengan penelitian ini, PHH relevan untuk menjelaskan potensi hubungan antara ekspor dan emisi karbon (CO_2). Peningkatan ekspor dapat mendorong peningkatan skala produksi domestik, yang pada kondisi bauran energi berbasis fosil berpotensi meningkatkan emisi. Selain itu, apabila komposisi ekspor didominasi oleh sektor yang intensif energi dan polusi, maka keterbukaan perdagangan dapat memperkuat peningkatan emisi melalui perubahan struktur produksi. Dengan demikian, PHH memberikan dasar konseptual bahwa keterbukaan perdagangan (yang diproksi melalui ekspor) dapat berkorelasi positif dengan emisi karbon, khususnya ketika regulasi lingkungan, inovasi teknologi rendah karbon, dan efisiensi energi belum cukup kuat untuk menekan intensitas emisi (Cole, 2004).

2.1.8 Energi Terbarukan dan Transisi Energi

Dalam ekonomi lingkungan, sistem energi memiliki peran sentral dalam menentukan tingkat emisi karbon karena energi merupakan input utama dalam hampir seluruh aktivitas produksi dan konsumsi. Ketergantungan yang tinggi pada energi fosil, seperti batu bara, minyak, dan gas menjadi salah satu sumber utama peningkatan emisi karbon dioksida (CO_2). Oleh karena itu, peralihan sistem energi menuju sumber energi yang lebih bersih dipandang sebagai strategi kunci dalam upaya pengendalian emisi dan mitigasi perubahan iklim (Stern, 2007).

Energi terbarukan merujuk pada sumber energi yang berasal dari proses alam yang dapat diperbarui secara berkelanjutan, seperti tenaga air, angin, surya, biomassa, dan panas bumi. Dalam literatur ekonomi lingkungan, peningkatan pemanfaatan energi terbarukan dipahami sebagai bagian dari transisi energi, yaitu proses pergeseran struktural dari sistem energi berbasis fosil menuju sistem energi rendah karbon. Transisi energi tidak hanya berkaitan dengan perubahan jenis sumber energi, tetapi juga mencakup perubahan teknologi, infrastruktur, dan pola produksi serta konsumsi energi dalam perekonomian (IEA, 2020).

Secara teoretis, peningkatan pemanfaatan energi terbarukan dapat menurunkan emisi karbon melalui mekanisme penurunan intensitas emisi per unit output. Ketika energi terbarukan menggantikan energi fosil dalam proses produksi dan konsumsi, jumlah emisi CO_2 yang dihasilkan untuk tingkat

aktivitas ekonomi yang sama dapat berkurang. Dalam kerangka *Environmental Kuznets Curve (EKC)*, mekanisme ini merepresentasikan *technique effect*, yaitu perbaikan teknologi dan proses produksi yang memungkinkan pertumbuhan ekonomi berlangsung dengan tekanan lingkungan yang lebih rendah.

Literatur empiris menunjukkan bahwa transisi energi memiliki peran penting dalam menjelaskan variasi emisi karbon antarnegara dan antarperiode. Negara yang berhasil meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran energinya cenderung mengalami penurunan intensitas emisi, meskipun tingkat aktivitas ekonominya terus meningkat. Namun demikian, dampak energi terbarukan terhadap emisi tidak selalu bersifat instan dan dapat bergantung pada skala adopsi, struktur energi awal, serta integrasi energi terbarukan dalam sistem produksi nasional (Brock & Taylor, 2010).

Dalam konteks negara berkembang, proses transisi energi sering menghadapi berbagai tantangan, antara lain keterbatasan teknologi, kebutuhan investasi yang besar, serta ketergantungan struktural pada energi fosil yang relatif murah. Meskipun demikian, literatur menekankan bahwa peningkatan pemanfaatan energi terbarukan tetap menjadi instrumen penting untuk menekan pertumbuhan emisi karbon dalam jangka menengah dan panjang, terutama ketika dikombinasikan dengan kebijakan efisiensi energi dan penguatan institusi.

2.2 Hubungan Antar Variabel

2.2.1 Hubungan Pertumbuhan Ekonomi Terhadap Emisi karbon

Pertumbuhan ekonomi adalah peningkatan kapasitas suatu negara dalam memproduksi barang dan jasa selama periode tertentu, yang biasa diukur dengan pertumbuhan Produk Domestik Bruto (PDB) riil. Secara teoritis, hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon dijelaskan oleh hipotesis *Environmental Kuznets Curve (EKC)*, yang menyatakan bahwa pada tahap awal pembangunan ekonomi, peningkatan aktivitas ekonomi cenderung diikuti oleh peningkatan emisi karbon akibat tingginya ketergantungan pada energi fosil dan proses industri yang belum efisien (Grossman & Krueger, 1995).

Seiring dengan pertumbuhan ekonomi, penggunaan energi fosil dan intensitas produksi meningkat, sehingga emisi karbon yang merupakan salah satu indikator degradasi lingkungan ikut bertambah. Hal ini sangat terlihat pada negara berkembang seperti Indonesia, dimana industrialisasi dan ekspansi sektor ekonomi masih banyak mengandalkan bahan bakar fosil (Lim & Lee, 2023). Oleh karena itu, dalam tahap awal, pertumbuhan ekonomi dapat memperburuk tekanan terhadap lingkungan melalui peningkatan emisi karbon.

Namun, EKC juga memprediksi bahwa setelah mencapai titik pendapatan tertentu, masyarakat dan pemerintah mulai mengadopsi teknologi bersih, kebijakan lingkungan yang lebih ketat, serta efisiensi energi yang lebih baik sehingga emisi karbon mulai menurun meskipun pertumbuhan ekonomi berlanjut (Sari et al., 2023). Kemajuan teknologi dan transformasi struktur ekonomi ke sektor yang lebih ramah lingkungan menjadi kunci dalam mengubah hubungan ini (Solow, 1956).

Solow Growth Model memperkuat pemahaman ini dengan menekankan pentingnya kemajuan teknologi dalam mendukung pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Lim & Lee, 2023). Kemajuan teknologi hijau memungkinkan peningkatan produktivitas tanpa peningkatan proporsional pada penggunaan energi fosil sehingga emisi karbon dapat ditekan.

Dalam konteks Indonesia, data empiris menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi berkontribusi pada peningkatan emisi karbon, terutama melalui ekspansi sektor industri yang intensif energi (Khosyi & Mudhoffar, 2022). Namun, intervensi kebijakan yang mendorong adopsi energi terbarukan dan teknologi hijau mulai menunjukkan pengaruh positif dalam menurunkan emisi, menandai adanya transisi menuju pembangunan rendah karbon.

Dengan demikian, hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan emisi karbon bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kemajuan teknologi, struktur industri, dan kebijakan energi. Dalam model penelitian kuantitatif, hubungan ini biasanya dianalisis melalui variabel pertumbuhan ekonomi sebagai variabel independen yang berpengaruh terhadap emisi karbon sebagai variabel dependen, dengan mempertimbangkan faktor mediasi seperti sektor industri dan konsumsi energi terbarukan.

2.2.2 Hubungan Produksi Energi Terbarukan Terhadap Emisi Karbon

Produksi energi terbarukan merupakan elemen kunci dalam transisi menuju system energi rendah karbon. Secara teoritis, peningkatan proporsi energi terbarukan dalam bauran energi nasional akan menurunkan tingkat emisi karbon karena sumber energi ini tidak menghasilkan CO₂ selama proses konversinya (Sari et al., 2023). Dengan demikian, semakin tinggi kapasitas produksi energi terbarukan suatu negara, semakin rendah intensitas karbon yang dihasilkan dari aktivitas ekonomi, khususnya sektor industri dan energi yang selama ini bergantung pada bahan bakar fosil.

Penelitian empiris menunjukkan bahwa peningkatan energi terbarukan memiliki hubungan negatif dengan emisi karbon. Lim dan Lee (2023) menemukan bahwa negara-negara Asia Tenggara yang meningkatkan penggunaan energi terbarukan mengalami penurunan emisi CO₂, terutama Ketika produksi energi bersih tersebut diintegrasikan ke dalam aktivitas industri. Studi Saudi et al. (2024) juga memperkuat temuan ini dengan menunjukkan bahwa adopsi energi terbarukan secara signifikan menekan emisi karbon pada kuantil dengan tangkai emisi tinggi, sehingga menunjukkan efektivitas energi terbarukan sebagai instrumen mitigasi.

Namun, penurunan emisi melalui energi terbarukan sangat dipengaruhi oleh kapasitas produksi, kesiapan teknologi, dan infrastruktur yang mendukung. Negara berkembang, seperti Indonesia masih menghadapi tantangan berupa biaya investasi awal yang tinggi, ketidakmerataan infrastruktur energi, serta ketergantungan terhadap teknologi impor, sehingga pemanfaatan energi terbarukan belum sepenuhnya optimal (Haq & Aziz,

2022). Kondisi ini menyebabkan kontribusi energi terbarukan terhadap penurunan emisi karbon belum maksimal meskipun produksinya meningkat.

Dalam konteks model penelitian, produksi energi terbarukan dipandang sebagai variabel yang dapat secara langsung menurunkan emisi karbon, sekaligus secara tidak langsung memengaruhi emisi melalui sektor industri. Ketika sektor industri mengadopsi energi bersih, efisiensi energi meningkat dan intensitas emisi berkurang, sehingga memperkuat hubungan negatif antara energi terbarukan dan emisi karbon (Khosyi & Mudhoffar, 2022).

Dengan demikian, secara teoritis maupun empiris, produksi energi terbarukan memiliki hubungan negatif dengan emisi karbon. Namun, efektivitasnya bergantung pada kesiapan struktural, kapasitas produksi, dan integrasi energi bersih dalam sistem industri serta kebijakan energi nasional.

2.2.3 Hubungan Ekspor Terhadap Emisi Karbon

Ekspor merupakan salah satu pendorong utama aktivitas produksi dalam perekonomian terbuka. Dalam teori perdagangan internasional, khususnya kerangka Heckscher-Ohlin dan model perdagangan modern (Helpman & Krugman, 1985). Ekspor mendorong negara untuk meningkatkan produksi pada sektor yang memiliki keunggulan komparatif. Pada negara berkembang seperti Indonesia, perluasan ekspor sering kali terjadi di sektor manufaktur dan industri pengolahan yang padat energi. Aktivitas produksi yang meningkat tersebut dapat memicu penggunaan energi fosil dalam jumlah besar, sehingga berpotensi meningkatkan emisi karbon.

Secara mekanisme, peningkatan ekspor dapat memperluas kapasitas produksi industri, meningkatkan konsumsi energi, dan memperkuat penggunaan input beremisi tinggi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa intensifikasi ekspor pada sektor industri yang belum mengadopsi teknologi bersih cenderung meningkatkan emisi karbon (Ng & Choy Peng, 2019). Efek ini dikenal sebagai *scale effect*, yaitu kenaikan output akibat perluasan internasional yang secara langsung meningkatkan aktivitas ekonomi beremisi tinggi.

Namun, ekspor juga memiliki potensi menghasilkan efficiency effect melalui transfer teknologi, modernisasi proses produksi, dan peningkatan standar kualitas industri. Studi Frankel dan Rose (2005) menyatakan bahwa perdagangan dapat mengurangi emisi apabila negara mengadopsi teknologi yang lebih efisien dan standar lingkungan yang lebih tinggi dari mitra dagangnya. Artinya, arah dampak ekspor terhadap emisi karbon sangat dipengaruhi oleh struktur industri suatu negara dan jenis barang yang diekspor.

Dalam konteks negara-negara Asia Tenggara, penelitian Lim dan Lee (2023) menemukan bahwa peningkatan ekspor di kawasan ini cenderung meningkatkan emisi karbon, terutama ketika ekspor didominasi oleh sektor manufaktur intensif energi. Temuan serupa juga dikemukakan oleh Barik et al. (2023) yang menunjukkan bahwa ekspor dapat memperbesar jejak karbon apabila ekspansi industri tidak diimbangi dengan efisiensi energi atau pemanfaatan energi bersih.

Di Indonesia, ekspor masih didominasi oleh komoditas primer dan produk manufaktur yang intensif energi, seperti logam dasar, minyak kelapa sawit, tekstil, dan produk kimia. Struktur ini menjadikan hubungan antara ekspor dan emisi karbon cenderung positif melalui peningkatan aktivitas industri dan konsumsi energi fosil. Studi Khosyi dan Mudhoffar (2022) menegaskan bahwa peningkatan aktivitas industri domestik berhubungan erat dengan kenaikan emisi karbon, dan ekspor menjadi salah satu faktor yang memperkuat ekspansi industri tersebut.

Dengan demikian, hubungan ekspor terhadap emisi karbon dapat bersifat positif atau negatif tergantung pada struktur industri dan tingkat teknologi yang digunakan. Pada negara berkembang seperti Indonesia, hubungan tersebut umumnya positif karena ekspansi ekspor memperkuat produksi industri yang padat energi dan intensif emisi. Dalam model penelitian ini, ekspor dipandang sebagai variabel yang secara langsung memengaruhi emisi karbon, sekaligus memiliki pengaruh tidak langsung melalui sektor industri sebagai variabel mediasi.

2.2.4 Hubungan Pertumbuhan Ekonomi Terhadap Sektor Industri

Pertumbuhan ekonomi adalah indikator utama yang mencerminkan peningkatan kapasitas produksi barang dan jasa dalam suatu negara. Dalam konteks negara berkembang seperti Indonesia, pertumbuhan ekonomi sering kali diikuti oleh ekspansi sektor industri karena adanya peningkatan permintaan domestik dan global terhadap produk manufaktur, konstruksi, serta sektor pengolahan. Teori transformasi struktural menjelaskan bahwa seiring dengan bertumbuhnya ekonomi, terjadi pergeseran struktur perekonomian di mana sektor industri menjadi lebih dominan. Peningkatan pendapatan nasional yang dihasilkan dari pertumbuhan ekonomi ini mengubah pola permintaan masyarakat, yang awalnya lebih banyak berfokus pada barang kebutuhan dasar, menjadi permintaan untuk barang-barang manufaktur dan barang tahan lama seperti perumahan, kendaraan, dan elektronik. Hal ini mendorong sektor industri untuk berkembang untuk memenuhi permintaan yang semakin besar.

Secara teoritis, pertumbuhan ekonomi berfungsi sebagai pendorong ekspansi sektor industri melalui peningkatan konsumsi rumah tangga dan investasi swasta. Ketika pendapatan nasional meningkat, daya beli masyarakat juga meningkat, yang pada gilirannya meningkatkan permintaan terhadap barang-barang yang diproduksi oleh sektor industri. Permintaan yang lebih tinggi ini tidak hanya memperbesar skala produksi, tetapi juga mengarah pada peningkatan investasi dalam kapasitas produksi dan teknologi baru, yang berfungsi memperkuat sektor industri dalam jangka panjang. Peningkatan permintaan yang dipicu oleh pertumbuhan ekonomi memberi insentif bagi sektor industri untuk berkembang melalui efisiensi skala, di mana semakin besar skala produksi, semakin rendah biaya rata-rata yang dikeluarkan oleh industri, sehingga meningkatkan daya saing dan profitabilitas sektor tersebut.

Lebih lanjut, pertumbuhan ekonomi juga membuka jalan bagi peningkatan inovasi dan pengembangan teknologi. Ketika pendapatan masyarakat dan sektor industri meningkat, terdapat lebih banyak ruang bagi investasi dalam riset dan pengembangan (R&D), serta adopsi teknologi yang lebih efisien. Inovasi teknologi ini penting karena dapat meningkatkan

produktivitas industri tanpa harus meningkatkan konsumsi energi atau menambah dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, selain mendorong permintaan barang industri, pertumbuhan ekonomi juga menciptakan dasar yang kuat bagi transformasi industri menjadi lebih efisien dan ramah lingkungan.

Secara keseluruhan, mekanisme ini menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak hanya berkontribusi pada ekspansi sektor industri melalui peningkatan permintaan, tetapi juga mendorong transformasi struktural dalam perekonomian yang memperkuat sektor industri sebagai pilar utama pembangunan ekonomi. Dengan demikian, pertumbuhan ekonomi yang sehat dan berkelanjutan dapat memperbesar pasar, meningkatkan efisiensi industri, serta membuka peluang bagi perkembangan teknologi yang lebih bersih dan inovatif.

2.2.5 Hubungan Produksi Energi Terbarukan Terhadap Sektor Industri

Produksi energi terbarukan merupakan faktor strategis dalam mendukung transformasi sektor industri menuju proses produksi yang lebih efisien dan berkelanjutan. Secara teoritis, meningkatnya kapasitas produksi energi terbarukan menciptakan suplai energi yang lebih bersih, stabil, dan terdiversifikasi, sehingga dapat menurunkan biaya eksternalitas lingkungan dan meningkatkan efisiensi operasional sektor industri. Dalam kerangka teori pertumbuhan hijau, ketersediaan energi bersih berfungsi sebagai input penting bagi modernisasi dan inovasi teknologi industri (Sari et al., 2023).

Produksi energi terbarukan juga memungkinkan sektor industri mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang harganya volatil dan beremisi tinggi. Dengan adanya suplai energi rendah karbon, industri dapat beralih pada proses produksi berteknologi bersih yang meningkatkan produktivitas jangka panjang. Studi Haq dan Aziz (2022) menegaskan bahwa kapasitas energi terbarukan yang memadai dapat memperkuat kinerja sektor industri melalui peningkatan efisiensi energi dan penurunan intensitas emisi dalam proses produksi.

Di tingkat kawasan, penelitian Lim dan Lee (2023) serta Sari et al. (2023) menemukan bahwa negara-negara yang meningkatkan kapasitas energi terbarukannya cenderung mengalami peningkatan efisiensi industri, baik melalui modernisasi mesin maupun optimasi proses produksi. Kapasitas energi terbarukan yang lebih besar memberikan insentif bagi industri untuk mengadopsi teknologi rendah karbon dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil.

Dalam konteks Indonesia, produksi energi terbarukan terus berkembang, terutama pada sektor panas bumi, air, dan biomassa. Namun, kontribusinya terhadap pemenuhan kebutuhan energi industri masih relatif terbatas akibat tantangan infrastruktur dan biaya investasi (Putra, 2024). Meski demikian, perluasan kapasitas produksi energi terbarukan secara bertahap telah mulai mendorong adaptasi teknologi yang lebih efisien di beberapa sektor industri, sekaligus membuka peluang investasi untuk industri ramah lingkungan.

Secara empiris, penelitian Ahmad dan Farooq (2020) menunjukkan bahwa ketersediaan energi terbarukan dapat meningkatkan produktivitas industri, meskipun dampaknya lebih kuat pada negara yang memiliki infrastruktur pendukung dan kebijakan energi yang solid. Temuan Saudi et al. (2024) di Indonesia juga menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas energi terbarukan memperkuat ekosistem industri hijau melalui dukungan energi bersih dan transfer teknologi ramah lingkungan.

Dengan demikian, produksi energi terbarukan memiliki hubungan positif terhadap perkembangan sektor industri, khususnya melalui tiga mekanisme utama: (1) peningkatan efisiensi dan stabilitas suplai energi, (2) penurunan biaya eksternal lingkungan, dan (3) percepatan adopsi teknologi bersih. Dalam model penelitian ini, produksi energi terbarukan berperan sebagai variabel yang dapat memperkuat sektor industri, yang pada akhirnya memengaruhi tingkat emisi karbon secara tidak langsung.

2.2.6 Hubungan Ekspor Terhadap Sektor Industri

Ekspor merupakan pendorong utama ekspansi sektor industri karena memberikan akses pasar yang lebih luas, meningkatkan permintaan terhadap produk domestik, dan mendorong peningkatan kapasitas produksi. Dalam teori perdagangan internasional modern, ekspor memungkinkan industri suatu negara untuk memanfaatkan skala ekonomi, meningkatkan efisiensi, dan memperkuat daya saing melalui persaingan global (Helpman & Krugman, 1985). Dengan meningkatnya permintaan dari pasar internasional, perusahaan industri terdorong untuk memperluas kapasitas produksi, meningkatkan kualitas, dan mengadopsi teknologi yang lebih efisien.

Dari perspektif struktur industri, ekspor berperan sebagai katalis transformasi industri. Ekspansi pasar ekspor sering memacu investasi baru, baik dalam bentuk permesinan, inovasi produk, maupun peningkatan keterampilan tenaga kerja. Ng dan Choy Peng (2019) menemukan bahwa peningkatan aktivitas ekspor berkontribusi terhadap pertumbuhan sektor industri di banyak negara berkembang melalui peningkatan produktivitas dan investasi. Hal ini menunjukkan bahwa ekspor berfungsi sebagai motor modernisasi industri.

Di kawasan Asia Tenggara, penelitian Lim dan Lee (2023) menunjukkan bahwa ekspor turut memperkuat sektor industri melalui peningkatan kapasitas produksi, integrasi rantai pasok global, serta adopsi teknologi yang lebih maju. Namun, dampak ekspor terhadap sektor industri juga bergantung pada jenis komoditas yang diekspor. Negara yang mengandalkan ekspor barang manufaktur cenderung mengalami pertumbuhan industri yang lebih kuat dibanding negara yang hanya mengekspor komoditas primer.

Dalam konteks Indonesia, ekspor memainkan peran penting bagi sektor industri, terutama di subsektor manufaktur seperti tekstil, makanan dan minuman, logam dasar, dan kimia. Ekspor memperluas pasar bagi industri dalam negeri dan membuka peluang investasi asing yang dapat memperkuat basis industri domestik. Studi Khosyi dan Mudhoffar (2022) menegaskan bahwa peningkatan output industri Indonesia tidak lepas dari dinamika ekspor yang memperluas skala produksi. Selain itu, ekspor mendorong perusahaan

untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produk agar mampu bersaing di pasar global.

Namun demikian, pengaruh ekspor terhadap sektor industri juga dapat bersifat asimetris. Sebagian industri mungkin mengalami peningkatan kapasitas dan produktivitas, tetapi industri yang tidak kompetitif dapat tertinggal jika tidak mampu memenuhi standar pasar internasional. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan dampak ekspor terhadap sektor industri sangat dipengaruhi oleh kesiapan teknologi, kualitas sumber daya manusia, dan struktur industri domestik.

Dengan demikian, secara umum ekspor memiliki hubungan positif terhadap perkembangan sektor industri melalui peningkatan kapasitas produksi, investasi, dan efisiensi. Dalam model penelitian ini, ekspor berfungsi sebagai variabel yang mendorong ekspansi industri, yang selanjutnya dapat memengaruhi dinamika emisi karbon melalui intensitas energi dan proses produksi yang digunakan oleh sektor industri tersebut.

2.3 Tinjauan Empiris

Ng, Choy Peng (2019) dalam penelitiannya yang menganalisis kontribusi pembangunan infrastruktur, faktor sosial-ekonomi, pertumbuhan ekonomi, aktivitas perdagangan internasional, dan sektor industri terhadap emisi karbon di 60 negara selama periode 1980 hingga 2010 menemukan bahwa pertumbuhan ekonomi memiliki hubungan positif dengan peningkatan emisi karbon. Melalui estimasi regresi panel efek tetap, penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan Produk Domestik Bruto (PDB) mendorong ekspansi aktivitas industri dan konsumsi energi fosil, sehingga berkontribusi langsung pada kenaikan emisi karbon. Selain itu, penelitian ini juga menemukan bahwa peningkatan aktivitas perdagangan termasuk ekspor memperkuat sektor industri melalui perluasan pasar internasional, peningkatan investasi, dan transfer teknologi, yang pada akhirnya mendorong peningkatan kapasitas produksi industri. Ekspansi industri yang semakin intensif energi ini kemudian menyebabkan peningkatan emisi karbon. Temuan ini menegaskan bahwa sektor industri berperan sebagai jalur penting yang menghubungkan pertumbuhan ekonomi dan perdagangan internasional

terhadap emisi karbon, sekaligus mendukung pola hubungan yang dijelaskan dalam Environmental Kuznets Curve (EKC).

Studi oleh Hasan et al. (2023) yang menganalisis negara-negara Asia Tenggara selama periode 2000–2018 menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak memiliki pengaruh langsung yang signifikan terhadap emisi karbon. Temuan ini dikaitkan dengan meningkatnya efisiensi energi dan adopsi teknologi hijau di kawasan tersebut, sehingga pertumbuhan ekonomi tidak selalu meningkatkan intensitas karbon. Penelitian ini juga menemukan bahwa perdagangan internasional, termasuk ekspor sebagai salah satu komponennya, tidak selalu memberikan dampak signifikan terhadap sektor industri tanpa adanya dukungan kebijakan domestik dan kesiapan teknologi. Dalam beberapa kasus, peningkatan aktivitas perdagangan dapat melemahkan daya saing industri lokal apabila tidak diimbangi dengan modernisasi teknologi dan peningkatan efisiensi energi. Oleh karena itu, meskipun ekspor berpotensi mendorong perkembangan sektor industri, dampaknya terhadap emisi karbon melalui jalur industri menjadi tidak signifikan apabila industri belum mengoptimalkan efisiensi energi. Temuan ini menegaskan bahwa sektor industri menjadi titik kunci yang menentukan apakah ekspor akan memperburuk atau justru menahan peningkatan emisi karbon.

Sari et al. (2023) dalam penelitiannya mengenai energi terbarukan di negara-negara ASEAN periode 2000–2018 menemukan bahwa peningkatan pemanfaatan energi terbarukan memiliki pengaruh negatif dan signifikan terhadap emisi karbon. Meskipun penelitian tersebut menggunakan indikator konsumsi, temuan ini relevan dalam konteks produksi energi terbarukan karena peningkatan konsumsi umumnya mencerminkan kapasitas produksi energi bersih yang semakin besar di suatu negara. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kontribusi energi terbarukan dalam sistem energi nasional, semakin rendah intensitas emisi yang dihasilkan. Selain itu, peningkatan suplai energi terbarukan juga berpotensi memperkuat sektor industri melalui peningkatan efisiensi energi dan modernisasi teknologi produksi yang lebih bersih. Dengan demikian, kapasitas produksi energi terbarukan tidak hanya berperan langsung dalam menurunkan emisi karbon,

tetapi juga secara tidak langsung mendukung transformasi sektor industri menuju proses produksi yang lebih ramah lingkungan.

Tran dan Hoang (2021) mengkaji hubungan antara produksi energi terbarukan dan emisi karbon di negara-negara Asia Tenggara menggunakan data panel tahun 2005–2017. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa meskipun produksi energi terbarukan meningkat, dampaknya terhadap penurunan emisi karbon dalam jangka pendek tidak signifikan. Hal ini disebabkan oleh tingginya ketergantungan sektor industri terhadap energi fosil dan rendahnya adopsi teknologi bersih. Studi ini menunjukkan bahwa produksi energi terbarukan yang lebih tinggi akan berdampak positif terhadap sektor industri dan pengurangan emisi karbon apabila didukung oleh infrastruktur yang memadai, kebijakan pemerintah yang kuat, dan investasi yang memadai. Secara keseluruhan, transisi energi bersih dalam sektor industri dapat tercapai dengan adanya sinergi antara peningkatan produksi energi terbarukan, kebijakan yang mendukung, dan peningkatan efisiensi industri.

Lim dan Lee (2023) menunjukkan bahwa ekspor berpengaruh signifikan terhadap peningkatan emisi karbon, terutama melalui ekspansi sektor industri yang bergantung pada energi fosil. Mereka menemukan bahwa peningkatan ekspor dapat mendorong pertumbuhan sektor industri yang intensif energi, yang pada gilirannya memperburuk tekanan terhadap lingkungan dan meningkatkan emisi karbon. Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa sektor industri yang berkembang pesat akibat ekspor sering kali meningkatkan konsumsi energi fosil, yang berpotensi memperburuk jejak karbon. Namun, mereka juga menekankan bahwa sektor industri dapat mengurangi dampak lingkungan dari ekspansi ekspor melalui adopsi teknologi efisiensi energi dan kebijakan lingkungan yang mendukung penggunaan energi bersih. Oleh karena itu, temuan ini menegaskan pentingnya pengelolaan sektor industri yang berkelanjutan agar ekspansi ekspor tidak memperburuk emisi karbon.

Nguyen dan Tran (2020) melakukan studi mengenai pengaruh sektor industri terhadap emisi karbon di beberapa negara Asia Tenggara dengan data panel periode 2000 hingga 2018. Mereka menemukan bahwa peningkatan aktivitas industri secara signifikan meningkatkan emisi karbon, yang menunjukkan bahwa ekspansi industri yang masih bergantung pada energi

fosil merupakan penyumbang utama emisi karbon. Sementara itu, Nguyen dan Le (2021) meneliti dampak produksi energi terbarukan terhadap sektor industri dan emisi karbon di negara-negara ASEAN selama 2005–2018, dan menemukan bahwa peningkatan produksi energi terbarukan secara signifikan meningkatkan efisiensi sektor industri sekaligus menurunkan emisi karbon melalui mekanisme mediasi.

Chen et al. (2021) dalam penelitiannya di China menemukan bahwa pertumbuhan sektor industri tidak selalu disertai dengan peningkatan emisi karbon. Penerapan teknologi hijau dan efisiensi energi dalam proses produksi memungkinkan sektor industri tumbuh secara ekonomi tanpa memperburuk kualitas lingkungan. Temuan ini menegaskan pentingnya modernisasi industri dalam konteks keterbukaan perdagangan dan pertumbuhan ekonomi.

Penelitian oleh Suryadi et al. (2020) mengkaji negara-negara ASEAN dan menemukan bahwa pertumbuhan ekonomi tidak selalu berdampak langsung pada peningkatan aktivitas sektor industri. Dalam beberapa kasus, pertumbuhan ekonomi lebih didorong oleh sektor jasa atau ekstraktif, sehingga ekspansi sektor industri tidak signifikan. Temuan ini mengindikasikan bahwa struktur ekonomi nasional turut menentukan seberapa kuat hubungan antara pertumbuhan ekonomi dan sektor industri.

Ahmad dan Farooq (2020) dalam studinya di Pakistan menyatakan bahwa produksi energi terbarukan belum menunjukkan dampak signifikan terhadap kinerja sektor industri maupun terhadap emisi karbon melalui jalur tersebut dalam jangka pendek. Hambatan struktural seperti keterbatasan teknologi, infrastruktur, dan biaya investasi menjadi faktor penghambat utama efektivitas energi terbarukan dalam mendukung transformasi industri yang lebih bersih.

Penelitian oleh Barik et al. (2023) yang menganalisis hubungan antara ekspor dan emisi karbon di Asia Tenggara menemukan bahwa peningkatan ekspor sering kali berhubungan langsung dengan peningkatan aktivitas industri yang padat energi. Ekspansi sektor industri sebagai respons terhadap permintaan global yang lebih besar dapat meningkatkan konsumsi energi fosil dan berpotensi memperburuk emisi karbon. Temuan ini menggarisbawahi bahwa meskipun ekspor dapat meningkatkan efisiensi ekonomi, ekspansi

industri yang bergantung pada energi fosil dapat memperburuk jejak karbon negara berkembang. Oleh karena itu, meskipun ekspor berperan penting dalam perekonomian, ia dapat membawa risiko peningkatan emisi karbon jika tidak diimbangi dengan kebijakan mitigasi dan teknologi bersih.

Grether dan Mathys (2013) dalam studi mereka mengenai dampak ekspor terhadap sektor industri dan emisi karbon di negara-negara berkembang menunjukkan bahwa ekspansi sektor industri yang dipicu oleh ekspor dapat meningkatkan konsumsi energi dan emisi karbon. Mereka menemukan bahwa ekspor mendorong pertumbuhan sektor industri, yang dalam banyak kasus masih bergantung pada energi fosil dan teknologi yang tidak ramah lingkungan. Oleh karena itu, meskipun ekspor berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi, dampaknya terhadap emisi karbon sangat bergantung pada seberapa efisien sektor industri dalam mengadopsi energi bersih. Penelitian ini menekankan bahwa sektor industri berperan sebagai variabel mediasi yang menghubungkan ekspor dengan peningkatan emisi karbon, terutama Ketika teknologi efisien energi belum diterapkan secara luas.