



Pengembangan Sektor Transportasi yang Ramah Lingkungan di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta

Development of an Environmentally Friendly Transportation Sector in the Yogyakarta Special Region Province

NUGRAHANI SETIASTUTI^{1*}, HERI APRIYANTO¹, UGAY SUGARMANSYAH^{1,2}, NOORISH HELDINI¹,
TAUFIQ DWI TAMTOMO¹, DHITA AYU PRADNYAPASA¹, APHANG SUHENDRA¹, AGUNG WIRATMOKO¹,
BINUKO DANI SOEWARGONO¹, CITRA ARDIANA¹, IRFAN PRATAMA PUTERA³, AKIRA LUSIA⁴

¹Pusat Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN),
KST BJ Habibie, Kota Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

²Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Institut Teknologi Indonesia,
Jl. Raya Puspiptek, Kota Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

³Pusat Riset Teknologi Industri Proses dan Manufaktur, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN),
KST BJ Habibie, Kota Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

⁴Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN),
KST BJ Habibie, Kota Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

*nugr004@brin.go.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 September 2023

Accepted 29 April 2024

Published 31 July 2024

Keywords:

Environmental transportation sector
Environmentally extended input-output
analysis

Gross added value

Carbon emissions

ABSTRACT

The development of an environmentally friendly transportation sector is a sustainable development effort that has a significant role in regional economic growth and reducing greenhouse gas (GHG) emissions. This research aims to identify the transportation subsector that has the strongest backward and forward linkages as a key regional economic subsector and analyze the economic and environmental impacts, mainly the increase in carbon emissions in the transportation sector due to an increase in final demand. This research uses an environmentally extended input-output (EEIO) analysis approach, with a case study of this research in the Yogyakarta Special Region Province (D.I. Yogyakarta). The primary data used is the Input-Output (I-O) table for D.I. Yogyakarta Province, which includes 52 sectors in 2016, and inventory data for D.I. Yogyakarta Province's greenhouse gas (GHG) emissions. Results of the simulation carried out show an increase in final demand by 25%, which will provide three impacts, namely direct impacts, indirect impacts, and induced effects on the transportation sector by creating a gross added value (NTB) of IDR 4,528,778.968 million, but at the same time, greenhouse gas emissions of 618.091 GgCO_{2e} were also produced. The air transportation subsector is a subsector that has relatively strong direct and indirect backward and forward linkages, with a contribution to NTB of IDR 3,000,696.019 million and GHG emissions released by this subsector of 461.669 GgCO_{2e}. Efforts to mitigate these emissions need to be made in stages by diffusing clean technology, and an effective, efficient, and sustainable transportation system.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 22 September 2023

Disetujui 29 April 2024

Diterbitkan 31 Juli 2024

Kata kunci:

Transportasi ramah lingkungan
Analisis environmentally extended
input-output (EEIO)

Nilai tambah bruto

Emisi GRK

ABSTRAK

Pengembangan sektor transportasi yang ramah lingkungan merupakan upaya pembangunan berkelanjutan yang memiliki peran signifikan dalam pertumbuhan ekonomi wilayah dan penurunan emisi gas rumah kaca (GRK). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi subsektor transportasi yang memiliki keterkaitan ke belakang dan ke depan yang paling kuat sebagai subsektor ekonomi kunci wilayah, dan menganalisis dampak ekonomi dan lingkungan khususnya kenaikan emisi GRK terhadap sektor transportasi yang disebabkan adanya peningkatan permintaan akhir (*final demand*). Kajian ini menggunakan pendekatan analisis *environmentally extended input-output* (EEIO), dengan studi kasus penelitian ini di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (D.I. Yogyakarta). Data utama yang digunakan adalah Tabel *Input-Output* (I-O) Provinsi D.I. Yogyakarta yang meliputi 52 sektor tahun 2016 dan data inventarisasi emisi gas rumah kaca (GRK) Provinsi D.I. Yogyakarta. Hasil simulasi yang dilakukan adanya peningkatan permintaan akhir sebesar 25%, yang akan memberikan tiga dampak, yaitu dampak langsung, dampak tidak langsung, dan dampak imbasan (*induced effects*) terhadap sektor transportasi dengan menciptakan nilai tambah bruto (NTB) sebesar Rp4.528.778,968 juta, namun pada saat bersamaan dihasilkan pula emisi gas rumah kaca sebesar 618,091 GgCO_{2e}. Subsektor transportasi udara merupakan subsektor yang memiliki keterkaitan langsung dan tidak langsung ke belakang dan ke depan yang relatif kuat dengan kontribusi terhadap NTB sebesar Rp3.000.696,019 juta dan emisi GRK yang dikeluarkan oleh subsektor ini sebesar 461,669 GgCO_{2e}. Upaya memitigasi emisi ini perlu dilakukan secara bertahap dengan mendifusikan teknologi bersih dan sistem transportasi yang efektif, efisien dan berkelanjutan.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu sektor yang sangat penting dalam mendukung pembangunan ekonomi wilayah dan nasional adalah sektor transportasi. Sektor transportasi berperan pada mobilitas barang dan jasa untuk pengembangan bisnis dan mobilitas masyarakat (Vukić *et al.*, 2021). Studi di China menunjukkan bahwa investasi infrastruktur transportasi berdampak signifikan terhadap pembangunan ekonomi regional; khususnya, dampaknya berbeda-beda tergantung pada tingkat aksesibilitas, misalnya antara wilayah yang memiliki koneksi *high-speed railway* (HSR) dan wilayah yang tidak memiliki koneksi HSR (Bosker *et al.*, 2018; Yao *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2015). Peluang dan manfaat ekonomi dan sosial dapat berdampak sebagai efek ganda (*multiplier effects*) yang positif jika sektor transportasi berjalan efisien. Pembangunan infrastruktur transportasi mempengaruhi tingkat investasi asing dan lokal serta tingkat pembangunan ekonomi dari sebuah wilayah dan negara (Popova, 2017). Pertumbuhan perekonomian wilayah dan peningkatan daya saing merupakan dampak positif dari pembangunan infrastruktur transportasi yang berkualitas. Dengan adanya peningkatan investasi pada pembangunan infrastruktur transportasi, maka dapat merangsang pertumbuhan ekonomi (Nidziy, 2017). Infrastruktur transportasi yang baik dapat mendukung pembangunan sektor transportasi, ekonomi dan masyarakat. Sektor transportasi dapat berdampak terhadap perubahan pada produk domestik bruto suatu negara (Ševčenko-Kozlovska & Čižiūnienė, 2022).

Sektor transportasi baik moda transportasi rel, darat, laut, sungai, danau dan penyeberangan, dan udara yang mempunyai peran yang signifikan dalam pembangunan ekonomi, ternyata dalam waktu yang bersamaan sektor ini juga mengancam terjadinya kerusakan lingkungan karena menghasilkan gas rumah kaca (GRK) dalam bentuk emisi CO₂ dan N₂O. Peningkatan PDB sektor transportasi per kapita merupakan salah satu faktor pendorong utama yang memberikan tekanan terhadap lingkungan (Ladi *et al.*, 2022). Perkembangan ekonomi dan optimalisasi struktur sektor transportasi mempengaruhi variasi emisi CO₂ (Lian *et al.*, 2020). Laporan Penilaian Kelima IPCC mengemukakan bahwa sektor dengan konsumsi energi tertinggi, peningkatan emisi CO₂ yang paling cepat, dan pembakaran bahan bakar fosil menghasilkan emisi adalah sektor transportasi (Stocker *et al.*, 2014). Peningkatan emisi CO₂ dari sektor transportasi yang makin meningkat menimbulkan dampak terhadap lingkungan dan ini akan mengancam pembangunan berkelanjutan sebagai *platform* pembangunan nasional, karena pembangunan yang berkelanjutan menjadi pertimbangan serius bagi pembuat kebijakan pada bidang ekonomi, transportasi, dan perubahan iklim (Saboori *et al.*, 2014). Di sisi lain, para ekonom kurang berhasil dalam mendorong kebijakan transportasi dan eksternalitas lingkungan yang efisien secara ekonomi (Lindsey & Santos, 2020). Salah satu upaya yang dapat dilakukan dalam mengendalikan degradasi lingkungan menuju transportasi ramah lingkungan yaitu peralihan ke kendaraan tidak bermotor dan sistem transportasi umum yang mendorong efisiensi transportasi (Awan *et al.*, 2022).

Pemerintah Indonesia telah menetapkan *Enhanced-Nationally Determined Contribution* (E-NDC) dengan target penurunan emisi GRK hingga tahun 2030 sebesar 32% atau 912 juta ton CO₂ dalam mengatasi perubahan iklim. Penanganan perubahan iklim ini tidak hanya meliputi sektor lingkungan hidup, tetapi juga berbagai sektor lainnya, di antaranya energi, lahan, transportasi, penanganan sampah, pertanian, industri, serta pendidikan. Penyediaan akses sistem transportasi yang aman, terjangkau, mudah diakses dan berkelanjutan merupakan salah satu target Pemerintah Indonesia dalam pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs) Tujuan 11 (Kota dan Permukiman yang Berkelanjutan) di tahun 2030. Tantangan yang dihadapi dalam sektor transportasi saat ini adalah diperlukan adanya perencanaan pengembangan sektor transportasi berwawasan lingkungan dalam upaya berkontribusi dalam mewujudkan target penurunan emisi GRK di Indonesia.

Perencanaan pembangunan sektor transportasi nasional atau wilayah memerlukan metode analisis secara sistemik, yang mempertimbangkan hubungan atau keterkaitan antar sektor ekonomi, termasuk aspek lingkungan. Ketergantungan dan kompleksitas perekonomian dapat digambarkan melalui hubungan antar sektor di mana *output* suatu sektor/industri akan menjadi *input* sektor/industri lainnya. Hubungan *input output* tersebut dapat ditelaah melalui analisis *input-output* (I-O). Permodelan transportasi dan keterkaitan ekonomi dengan menggunakan analisis I-O, baik pada satu wilayah maupun multi-wilayah telah dibuat dan dipublikasikan oleh Yu pada tahun 2000-2016 (Yu, 2018). Penggunaan analisis I-O saat ini terus berkembang salah satunya diterapkan pada aspek lingkungan yang dikenal dengan istilah analisis *environmentally extended input-output* (EEIO). Untuk mengidentifikasi penggerak ekonomi dari setiap dampak lingkungan, termasuk emisi polutan, degradasi atau sumber daya alam dan hilangnya keanekaragaman hayati dapat menggunakan analisis EEIO (Kitzes, 2013). Dengan demikian EEIO dapat diterapkan dalam perencanaan pengembangan sektor transportasi untuk memprediksi dampak ekonomi dan lingkungan (emisi) secara terintegrasi. Selain itu, dalam perencanaan juga perlu diketahui *positioning* sektor transportasi dalam kerangka sektor ekonomi kunci (*key economic sectors*).

Provinsi D.I. Yogyakarta saat ini dikenal sebagai kota pendidikan, pariwisata, dan budaya, sehingga wilayah ini menjadi magnet bagi para pendatang. Wilayah ini makin padat aktivitas ekonominya yang salah satunya akan diiringi oleh adanya peningkatan penggunaan sarana transportasi. Sektor transportasi dan pergudangan merupakan salah satu sektor unggulan di Provinsi D.I. Yogyakarta berdasarkan analisis EEIO (Sugarmansyah *et al.*, 2022), namun pada riset tersebut belum diketahui pada subsektor transportasi mana yang menjadi sektor ekonomi kunci wilayah. Selain itu, belum diprediksi dampak ekonomi dan kenaikan emisi GRK terhadap subsektor transportasi yang lebih rinci. Hasil analisis terhadap sektor transportasi ini juga dapat dipergunakan sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan kebijakan terkait transportasi yang berkelanjutan.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi subsektor transportasi yang memiliki keterkaitan ke belakang dan ke depan yang paling kuat sebagai subsektor ekonomi kunci wilayah, dan menganalisis dampak ekonomi dan lingkungan khususnya kenaikan emisi GRK terhadap sektor transportasi yang disebabkan adanya peningkatan permintaan akhir, khususnya di Provinsi D.I. Yogyakarta.

2. METODE

Metode analisis *environmentally extended input-output* (EEIO) merupakan pengembangan dari analisis *input-output* (I-O) yang dikembangkan oleh Leontief. Model ini merupakan model kuantitatif yang menunjukkan potret keseimbangan ekonomi suatu wilayah pada periode tertentu (Önder, 2021; Sugarmansyah et al., 2022; West, 1993; Williams, 2016). Tahapan yang dilakukan dalam analisis *environmentally extended input-output* (EEIO) adalah:

1. Pengumpulan data

Data yang digunakan adalah Tabel *Input-Output* (I-O) nasional / provinsi / kota / kabupaten, yang dipublikasikan oleh Badan Pusat Statistik (BPS). Selain itu, data yang dikumpulkan berupa data emisi GRK yang diperoleh dari hasil ekstrapolasi data inventarisasi emisi GRK yang tersedia. Metode pendugaan emisi dan serapan GRK pada laporan inventarisasi GRK diperoleh dari persamaan:

$$\text{Emisi GRK} = \text{AD} \times \text{EF} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- AD = Kegiatan manusia yang menghasilkan emisi
- EF = Faktor emisi yang merupakan besarnya emisi atau serapan per satuan unit kegiatan yang dilakukan

Pendugaan emisi GRK sektor transportasi dilakukan pada tier 2 dengan data aktivitas lokal berupa jumlah kendaraan, rata-rata perjalanan dan efisiensi kendaraan.

2. Perhitungan total *output*, indeks daya penyebaran dan indeks derajat kepekaan

Format Tabel I-O disajikan pada Tabel 1. Seperti terlihat pada Tabel 1, misalnya dalam kegiatan ekonomi suatu wilayah terdapat n sektor (pertanian, industri, dan jasa). Setiap angka, jika dilihat secara horizontal, menunjukkan distribusi *output*. X_i menunjukkan total *output* sektor i, Y_i menunjukkan permintaan akhir sektor i, dan x_{ij} menunjukkan *output* sektor i yang dibeli oleh sektor j. Angka-angka yang terdapat pada baris menunjukkan *output* dari suatu sektor yang diperuntukkan pada permintaan antara. Hal ini menunjukkan banyaknya permintaan produksi (barang dan jasa), sedangkan permintaan produksi (barang dan jasa) untuk konsumsi ditunjukkan sebagai permintaan akhir.

Jika dibaca secara vertikal angka-angka menunjukkan *input* suatu sektor diperoleh dari sektor lain. V_j adalah *input* primer atau nilai tambah bruto, yaitu imbalan atas faktor-faktor produksi yang digunakan, yang terdiri dari modal, tanah dan tenaga kerja, serta X_j merupakan *input* total sektor j. Oleh karena itu, Tabel I-O menunjukkan keseimbangan ekonomi secara umum di suatu wilayah yang menggambarkan pengganda ekonomi atau kekuatan struktural industri melalui keterkaitan antar sektor (Mohan et al., 2021; Önder, 2021; Song et al., 2022; Sugarmansyah et al., 2022; West, 1993; Williams, 2016).

Tabel 1. Kerangka Tabel I-O

Sektor		Permintaan Antara					Permintaan Akhir	Total Output
		Sektor Produksi						
		1	2	...	n			
Input Antara	Sektor	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	Y_1	X_1
	Produksi	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	Y_2	X_2

		n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nn}	Y_n	X_n
Input Primer			V_1	V_2	...	V_n		
Total Input			X_1	X_2	...	X_n		

Berdasarkan Tabel 1 tersebut dapat disusun suatu sistem persamaan sebagai dasar analisis I-O yang berkontribusi dalam analisis ekonomi di suatu wilayah. Persamaan matematis dari kerangka Tabel 1 dapat dituliskan sebagai berikut: (Williams, 2016);

$$x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} + Y_1 = X_1$$

$$x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2n} + Y_2 = X_2$$

...

$$x_{n1} + x_{n2} + \dots + x_{nn} + Y_n = X_n \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- x_{ij} = Output sektor i yang dibeli sebagai input oleh sektor j
- Y_i = Permintaan akhir total sektor i
- X_i = Total output sektor i
- X_j = Total input sektor j

Selanjutnya koefisien *input* didefinisikan sebagai $a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j}$, sehingga $x_{ij} = a_{ij}X_j$, jika x_{ij} ini disubstitusikan ke persamaan (2), maka akan diperoleh persamaan:

$$\begin{aligned}
 a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n + Y_1 &= X_1 \\
 a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n + Y_2 &= X_2 \\
 \dots & \\
 a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \dots + a_{nn}X_n + Y_n &= X_n \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

Persamaan simultan ini dapat ditulis dalam format matriks (Mohan *et al.*, 2021; Önder, 2021; Sugarmansyah *et al.*, 2022; Williams, 2016)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 A X + Y &= X \\
 X &= (I - A)^{-1} Y \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

Keterangan:

- X = Vektor dari total *output* sektoral
- A = Matriks koefisien *input*
- Y = Vektor kolom permintaan akhir
- I = Matriks identitas
- (I - A)⁻¹ = Matriks invers Leontief yang menunjukkan dampak langsung dan dampak tidak langsung akibat perubahan satuan permintaan akhir

Dampak keterkaitan ke belakang (*backward linkages*) dan dampak keterkaitan ke depan (*forward linkages*) merupakan dasar angka indeks daya penyebaran dan derajat kepekaan. Dampak keterkaitan tersebut dapat digunakan untuk menentukan sektor ekonomi kunci atau sektor-sektor unggulan yang akan memiliki pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi wilayah. Sektor ini memiliki kekuatan untuk menarik sektor-sektor lain yang memiliki keterkaitan ke belakang langsung dan tidak langsung dan mendorong sektor-sektor yang memiliki keterkaitan langsung dan tidak langsung ke depan dalam mendorong pertumbuhan ekonomi wilayah. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut: (Anwar *et al.*, 2021; Önder, 2021; Sugarmansyah *et al.*, 2022; Williams, 2016)

$$\alpha_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n C_{ij}} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

- C_{ij} = Matriks invers Leontief
- α_j = Indeks daya penyebaran yang mencerminkan kekuatan keterkaitan ke belakang total (*total backward linkages*) juga menunjukkan kemampuan menarik sektor ekonomi yang ada di belakangnya baik langsung maupun tidak langsung

Jika α_j > 1, maka indeks daya penyebaran sektor j lebih besar dari rata-rata, sektor tersebut relatif kuat

untuk menarik sektor ekonomi yang ada di belakangnya untuk tumbuh. Jika α_j < 1, maka indeks daya penyebaran sektor j lebih rendah dari rata-rata, atau sektor tersebut relatif lemah dalam menarik sektor ekonomi yang ada di belakangnya baik secara langsung maupun tidak langsung. Jika α_j = 1, maka indeks daya penyebaran sektor j sama dengan rata-rata.

Selanjutnya, tingkat sensitivitasnya adalah keterkaitan ke depan langsung dan tidak langsung yang telah dinormalisasi. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_{ij}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

- β_i = Indeks derajat kepekaan

Jika β_i > 1, maka indeks derajat kepekaan sektor i lebih besar dari rata-rata atau keterkaitan ke depan baik langsung maupun tidak langsung relatif kuat artinya sektor tersebut relatif mampu mendorong sektor ekonomi yang ada di depannya menstimulasi pertumbuhan ekonomi wilayah. Jika β_i < 1, maka indeks derajat kepekaan sektor i lebih rendah dari rata-rata atau sektor tersebut relatif belum cukup kuat untuk mendorong sektor ekonomi di depannya untuk tumbuh. Dan jika β_i = 1, maka indeks derajat kepekaan sama dengan rata-ratanya. Menurut Rasmussen, jika suatu sektor memiliki nilai indeks sebesar β_i > 1 dan nilai indeks α_j > 1, maka sektor ini adalah sektor ekonomi kunci atau sektor unggulan.

3. Perhitungan Nilai Tambah Bruto Tipe I

Persamaan (4) dapat dikembangkan dengan mengalikannya terhadap koefisien nilai tambah bruto (*NTB'*) yang didefinisikan nilai tambah bruto dibagi *input* totalnya, sehingga nilai tambah bruto sektoral dapat diprediksi. Persamaan untuk memprediksi nilai tambah bruto sektoral tipe I adalah sebagai berikut:

$$NTB = NTB'(I - A)^{-1} Y \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- NTB = Vektor nilai tambah bruto Tipe I
- NTB' = Matriks diagonal koefisien nilai tambah bruto

4. Perhitungan Emisi GRK Tipe I

Persamaan untuk estimasi emisi gas rumah kaca (GRK) dari pengembangan dari persamaan (4) untuk memperkirakan dampak lingkungan khususnya emisi GRK yang disebabkan adanya peningkatan satuan permintaan akhir adalah sebagai berikut:

$$GRK = GRK'(I - A)^{-1} Y \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

- GRK = Vektor nilai GRK
- GRK' = Matriks diagonal koefisien emisi GRK

5. Perhitungan Nilai Tambah Bruto dan Emisi GRK Tipe II Untuk memprediksi 3 dampak (Tipe II), yaitu dampak langsung, dampak tidak langsung dan dampak imbasan (*induced effects*) akibat pengaruh konsumsi rumah tangga, maka matriks *A* harus diganti dengan matriks *A**. Matriks *A** disebut matriks koefisien tertutup. Matriks *A** diperoleh dari matriks *A* yang ditambahkan dengan kolom koefisien konsumsi rumah tangga dan baris koefisien upah dan gaji yang berasal dari upah dan gaji dibagi dengan total *input*. Kemudian dapat diperoleh persamaan (9), (10), dan (11) sebagai berikut (Önder, 2021; Sugarmansyah et al., 2022; Sun et al., 2020; West, 1993; Williams, 2016):

$$X^* = (I - A^*)^{-1}Y \dots\dots\dots (9)$$

$$NTB^* = NTB'(I - A^*)^{-1}Y \dots\dots\dots (10)$$

$$GRK^* = GRK'(I - A^*)^{-1}Y \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

*X** = Vektor *output* Tipe II

*NTB** = Vektor nilai tambah bruto Tipe II

*GRK** = Vektor GRK Tipe II

Penelitian ini menggunakan data sekunder, antara lain data Tabel I-O Provinsi D.I. Yogyakarta tahun 2016 dari Badan Pusat Statistik Provinsi D.I. Yogyakarta dalam klasifikasi 52 sektor. Selain Tabel I-O, data yang digunakan adalah laporan inventarisasi gas rumah kaca Provinsi D.I. Yogyakarta (tahun 2013), laporan data inventarisasi emisi gas rumah kaca Kota Yogyakarta (tahun 2017), laporan kajian inventarisasi emisi gas rumah kaca Kabupaten Bantul (tahun 2020), data gas rumah kaca (GRK) Provinsi D.I. Yogyakarta KHLK 2015, data rencana aksi daerah penurunan emisi gas rumah kaca (RAD-GRK) Kemendagri-Bappenas, serta data sekunder lainnya berdasarkan pencarian informasi secara *online* (Badan Pusat Statistik Provinsi D.I. Yogyakarta, 2021; Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bantul, 2020; Pustral UGM, 2017).

Data emisi yang ada pada laporan inventarisasi gas rumah kaca diperoleh dari ekstrapolasi yang klasifikasinya diselaraskan dengan sektor-sektor ekonomi yang ada di Tabel I-O. Data emisi pada laporan inventarisasi gas rumah kaca Provinsi D.I. Yogyakarta (tahun 2013) dilakukan ekstrapolasi untuk menghasilkan pendugaan data emisi tahun 2016. Begitu pula pada data emisi yang tertera pada laporan data inventarisasi emisi gas rumah kaca Kota Yogyakarta (tahun 2017) dan laporan kajian inventarisasi emisi gas rumah kaca Kabupaten Bantul (tahun 2020). Setelah data emisi tahun 2016 diperoleh kemudian data tersebut akan diperhitungkan pada analisis EEIO sebagai koefisien emisi, sebagai dasar dalam membuat matriks koefisien emisi (GRK').

Keterbatasan dari penelitian ini adalah data emisi yang diperoleh dari ekstrapolasi data emisi dari laporan inventarisasi gas rumah kaca Pemerintah Provinsi D.I. Yogyakarta yang klasifikasinya diselaraskan dengan sektor-sektor ekonomi yang ada di Tabel I-O dan

asumsi-asumsi yang mendasari analisis I-O ini antara lain seperti homogenitas yang mensyaratkan keseragaman memproduksi *output* tunggal dengan struktur *input* tunggal, proporsionalitas yaitu hubungan antara *output* dan *input* itu linier dan aditivitas. Asumsi-asumsi yang mendasari model ini dilakukan untuk penyederhanaan sehingga model bisa diterapkan dalam perencanaan, namun sekaligus menjadi sumber keterbatasan model (Sugarmansyah et al., 2022; West, 1993). Namun, meskipun demikian model ini cukup efektif sebagai alat analisis untuk perencanaan pembangunan sektoral, wilayah dan nasional.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Gambaran Umum Sektor Transportasi di Wilayah Penelitian

Sektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta berkembang dengan berbagai moda transportasi angkutan rel, angkutan darat, angkutan sungai, danau dan penyeberangan, dan angkutan udara. Data dari Badan Pusat Statistik Provinsi D.I. Yogyakarta pada Triwulan II tahun 2023 menunjukkan bahwa perekonomian Provinsi D.I. Yogyakarta tumbuh sebesar 5,16%, dan pertumbuhan perekonomian pada triwulan ini diperoleh dari peningkatan kinerja lapangan usaha sektor transportasi dan pergudangan sebesar 10,8%.

Target sektor transportasi berdasarkan Peraturan Gubernur D.I. Yogyakarta No. 86 Tahun 2019 tentang Perubahan Atas Peraturan Gubernur D.I. Yogyakarta No. 34 Tahun 2018 tentang Rencana Aksi Daerah Tujuan Pembangunan Berkelanjutan Tahun 2018-2022, adalah penyediaan sarana dan prasarana sektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta dapat mewujudkan sistem transportasi yang berkelanjutan, dengan memperhatikan aspek keamanan, akses dan jangkauan transportasi umum yang ramah terhadap masyarakat rentan, wanita, anak, difabel dan orang tua/lansia.

Pada laporan inventarisasi GRK Provinsi D.I. Yogyakarta tahun 2013 telah dijelaskan bahwa pada sektor transportasi menggunakan *tier 2* dengan data aktivitas lokal berupa jumlah kendaraan, survei rata-rata perjalanan dan efisiensi kendaraan. Pada laporan inventarisasi juga dinyatakan bahwa angkutan jalan dan kereta api (angkutan darat) saja yang diperhitungkan. Angkutan udara (penerbangan sipil) bukan merupakan kewenangan pemerintah provinsi, serta angkutan air dan lainnya tidak dicakup karena jumlahnya sangat terbatas dan tidak ada kegiatan yang spesifik.

Data dan analisis Dinas Perhubungan Provinsi D.I. Yogyakarta tahun 2011 yang dicantumkan pada laporan inventarisasi GRK DI. Yogyakarta tahun 2013 telah dijelaskan bahwa pada konsumsi BBM jenis bensin sebesar 483,280 kL, sedangkan untuk jenis solar sebesar 53,122 kL. Adapun konsumsi BBM jenis solar untuk bahan bakar kereta api sebesar 540,20 kL.

3.2 Analisis Indeks Daya Penyebaran (α_j) & Indeks Derajat Kepekaan (β_i)

Tabel I-O 52 sektor di Provinsi D.I. Yogyakarta tahun 2016 menunjukkan bahwa sektor transportasi terklasifikasi menjadi 5 subsektor yaitu angkutan rel (AR), angkutan darat

(AD), angkutan laut (AL), angkutan sungai danau dan penyeberangan (ASDP), dan angkutan udara (AU). Hasil perhitungan nilai indeks daya penyebaran (α_j) & indeks derajat kepekaan (β_i) dari 5 subsektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Indeks Daya Penyebaran (α_j) & Indeks Derajat Kepekaan (β_i) Tahun 2016 untuk 5 Subsektor Transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta

Singkatan	Sektor Transportasi	α_j	β_i
AR	Angkutan Rel	0,99724	0,80077
AD	Angkutan Darat	0,97097	1,45135
AL	Angkutan Laut	-	-
ASDP	Angkutan Sungai Danau dan Penyeberangan	0,81469	0,79517
AU	Angkutan Udara	1,16139	1,72002

Tabel 2 menunjukkan hanya satu subsektor angkutan udara yang memiliki nilai indeks nilai $\beta_i > 1$ dan nilai indeks $\alpha_j > 1$. Subsektor ini memiliki keterkaitan langsung dan tidak langsung dengan sektor-sektor ekonomi di depannya yang relatif lebih tinggi dari rata-ratanya, serta keterkaitan langsung dan keterkaitan tidak langsung dengan sektor-sektor ekonomi yang ada di belakangnya yang relatif kuat. Menurut Rasmussen, sektor-sektor yang masuk ke dalam kategori ini disebut *key economy sectors* atau sektor-sektor unggulan (*leading sector*) yang berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi wilayah.

Tabel 2 menunjukkan hanya satu subsektor angkutan udara yang memiliki nilai indeks nilai $\beta_i > 1$ dan nilai indeks $\alpha_j > 1$. Subsektor ini memiliki keterkaitan langsung dan tidak langsung dengan sektor-sektor ekonomi di depannya yang relatif lebih tinggi dari rata-ratanya, serta keterkaitan langsung dan keterkaitan tidak langsung dengan sektor-sektor ekonomi yang ada di belakangnya yang relatif kuat. Menurut Rasmussen, sektor-sektor yang masuk ke dalam kategori ini disebut *key economy sectors* atau sektor-sektor unggulan (*leading sector*) yang berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi wilayah.

Tabel 2 juga menunjukkan subsektor angkutan darat memiliki indeks derajat kepekaan (β_i) > 1 , artinya keterkaitan langsung dan tidak langsung ke depan subsektor angkutan darat ini lebih tinggi dari rata-ratanya atau keterkaitan total ke depannya relatif kuat untuk mendorong sektor ekonomi di depannya untuk tumbuh, namun indeks daya penyebaran (α_j) < 1 , artinya keterkaitan total (keterkaitan langsung dan keterkaitan tidak langsung) ke belakang yang relatif lemah dalam memperkuat perekonomian daerah.

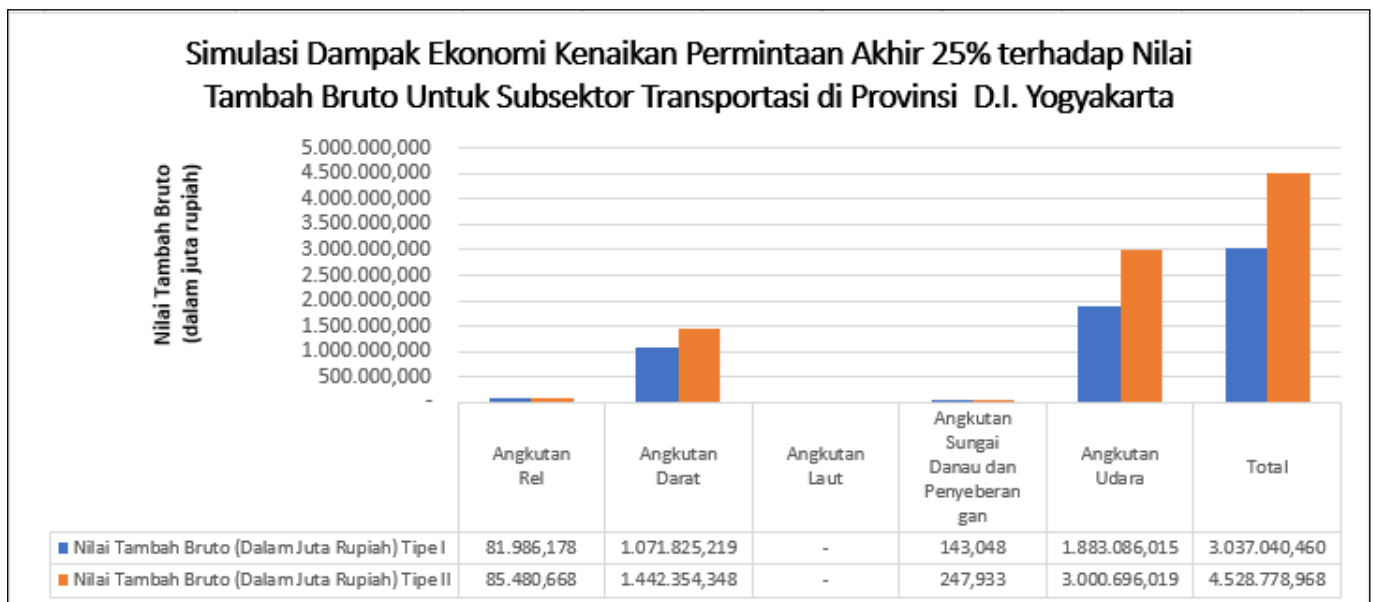
Selanjutnya subsektor angkutan rel, angkutan laut dan angkutan sungai danau dan penyeberangan memiliki indeks derajat kepekaan (β_i) < 1 , artinya total keterkaitan ke depan sektor-sektor ini relatif lemah dari rata-ratanya. Indeks daya penyebaran (α_j) < 1 , artinya keterkaitan total (keterkaitan langsung dan keterkaitan tidak langsung) ke belakang juga relatif lemah dalam memperkuat perekonomian daerah. Subsektor angkutan laut tidak teridentifikasi memiliki keterkaitan ke depan dan ke belakang karena tidak adanya informasi nilai transaksi barang dan jasa pada subsektor angkutan laut dengan sektor lainnya.

Semua subsektor transportasi secara umum berdasarkan pengaruhnya terhadap perekonomian wilayah masih perlu dikembangkan, namun dengan adanya indikator indeks daya penyebaran dan indeks derajat kepekaan akan menjadi bahan pertimbangan dalam prioritas pengembangan dan anggaran yang dialokasikan.

3.3 Simulasi Dampak Peningkatan Permintaan Akhir Subsektor Transportasi Terhadap Nilai Tambah Bruto dan Emisi CO₂

Hasil simulasi dampak peningkatan 25% permintaan akhir terhadap nilai tambah bruto subsektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta dapat dilihat pada Gambar 1. Pengganda tipe I menghitung dampak langsung dan tidak langsung, berdasarkan hasil simulasi, total nilai tambah bruto yang dihasilkan oleh 5 subsektor transportasi untuk pengganda tipe I adalah Rp3.037.040,460 juta, dengan nilai tambah bruto masing-masing subsektor transportasi yaitu untuk angkutan udara sebesar Rp1.883.086,015 juta; untuk angkutan darat sebesar Rp1.071.825,219 juta; untuk angkutan rel sebesar Rp81.986,178 juta; serta untuk angkutan sungai danau dan penyeberangan sebesar Rp143,048 juta. Subsektor angkutan laut tidak bisa dihitung nilai tambah bruto karena tidak adanya data/informasi nilai transaksi barang dan jasa pada subsektor angkutan laut dengan sektor lainnya.

Pengganda tipe II menghitung dampak langsung, dampak tidak langsung, dan dampak imbasan (*induced effects*) yang disebabkan oleh peningkatan konsumsi rumah tangga. Total nilai tambah bruto yang dihasilkan adalah Rp4.528.778,968 juta. Adapun rincian nilai tambah bruto untuk pengganda tipe II pada masing-masing subsektor transportasi, yaitu untuk angkutan udara sebesar Rp3.000.696,019 juta; untuk angkutan darat sebesar Rp1.442.354,348 juta; untuk angkutan rel sebesar Rp85.480,668 juta; serta untuk angkutan sungai danau dan penyeberangan sebesar Rp247,933 juta. Dari tabel tersebut terlihat bahwa subsektor angkutan udara yang paling besar kontribusinya terhadap Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Provinsi D.I. Yogyakarta, diikuti oleh subsektor angkutan darat, subsektor angkutan rel dan yang terakhir adalah subsektor angkutan sungai, danau dan penyeberangan.



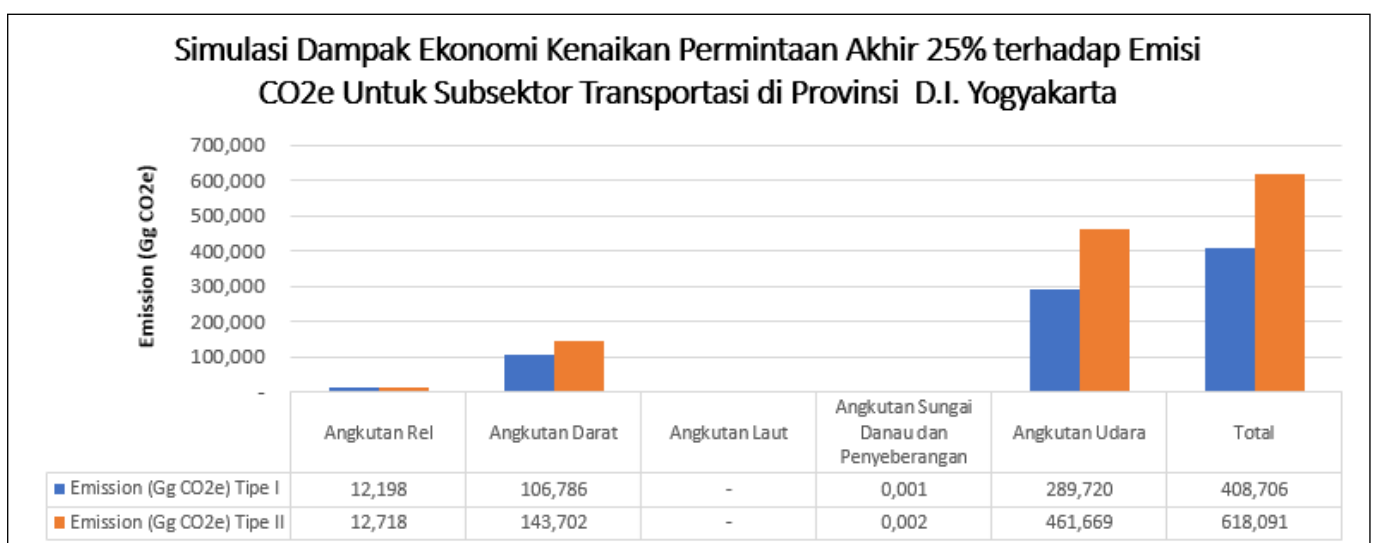
Gambar 1. Simulasi Dampak Ekonomi Kenaikan Permintaan Akhir 25% terhadap Nilai Tambah Bruto untuk Subsektor Transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta

Hasil simulasi dampak peningkatan permintaan akhir terhadap emisi GRK subsektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan hasil simulasi, total emisi yang dihasilkan oleh 5 subsektor transportasi untuk pengganda tipe I adalah 408,706 Gg CO₂e, dengan emisi CO₂e masing-masing subsektor transportasi yaitu untuk angkutan udara sebesar 289,720 Gg CO₂e; untuk angkutan darat sebesar 106,786 Gg CO₂e; untuk angkutan rel sebesar 12,198 Gg CO₂e; serta untuk angkutan sungai danau dan penyeberangan sebesar 0,001 Gg CO₂e. Subsektor angkutan laut belum bisa dihitung emisi CO₂e karena tidak adanya data nilai transaksi barang dan jasa dengan sektor ekonomi lainnya.

Total emisi CO₂e untuk pengganda tipe II adalah 618,091 Gg CO₂e. Adapun rincian emisi CO₂e pada masing-

masing subsektor transportasi, yaitu untuk angkutan udara sebesar 461,669 Gg CO₂e; untuk angkutan darat sebesar 143,702 Gg CO₂e; untuk angkutan rel sebesar 12,718 Gg CO₂e; serta untuk angkutan sungai danau dan penyeberangan sebesar 0,002 Gg CO₂e.

Pengembangan subsektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta perlu diperhatikan seberapa besar kontribusinya terhadap perekonomian wilayah (PDRB) dan seberapa besar emisi CO₂e yang dihasilkannya sehingga bisa diantisipasi upaya untuk memitigasi emisinya. Perhitungan secara terintegrasi antara aspek ekonomi dan emisi GRK dengan analisis EEIO dapat membantu perencana transportasi daerah guna mewujudkan pengembangan sektor transportasi yang berwawasan lingkungan.



Gambar 2. Hasil Simulasi Dampak Ekonomi Kenaikan Permintaan Akhir 25% terhadap Emisi CO₂e untuk Subsektor Transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta

Peningkatan PDRB sektor transportasi melalui dukungan transportasi ramah lingkungan dapat efektif dalam mengurangi tekanan terhadap lingkungan (Ladi *et al.*, 2022). Saat ini pengembangan sektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta, yaitu pada subsektor angkutan rel telah beroperasi kereta rel listrik atau KRL Yogyakarta-Surakarta sejak Februari 2021. Selain KRL, pada September 2021 telah beroperasi kereta Bandara Internasional Yogyakarta (YIA) yang mengangkut penumpang dari bandara menuju Kota Yogyakarta. Teknologi kereta listrik (*electric trains*) menghasilkan emisi paling rendah dibandingkan dengan kereta diesel (*diesel fuelled trains*) dan kereta hidrogen (*hydrogen trains*). Penggunaan kereta listrik juga harus disertai dengan pembuatan, pemeliharaan dan pembuangan kendaraan yang lebih ramah lingkungan. Hal itu sejalan dengan kebijakan di masa dekarbonisasi energi dan peralihan dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan (Logan *et al.*, 2021). Pada subsektor angkutan darat, untuk mendukung Program Malioboro Rendah Emisi, bus Trans Jogja akan dikonversi menjadi bus listrik. Selain itu juga akan dikembangkan becak listrik. Penggantian bus diesel dengan bus listrik dapat menjadi salah satu alternatif strategi untuk menyediakan mobilitas perkotaan yang berkelanjutan. Penggantian bus ini dapat mengurangi CO₂ sebagai komponen terbesar emisi GRK. Selain mengurangi emisi, manfaat lainnya yaitu dapat mengurangi dampak lingkungan kebisingan, mengurangi guncangan, mengurangi biaya operasional dan pemeliharaan karena keandalan bus listrik, mengurangi biaya perjalanan bus karena warga beralih menggunakan kendaraan umum. Akan tetapi, kondisi tersebut dapat tercapai jika dalam produksi listrik menggunakan sumber daya terbarukan (Todoruț *et al.*, 2020). Selain itu, kendaraan listrik lain, misalnya mobil dan motor listrik juga dapat menjadi alternatif moda transportasi ramah lingkungan. Kendaraan listrik dapat digunakan untuk kepentingan pemerintahan, bisnis, pribadi dan angkutan massal. Penggunaan kendaraan listrik di Provinsi D.I. Yogyakarta diharapkan dapat dikembangkan secara bertahap dalam berkontribusi mengatasi tantangan mobilitas perkotaan serta menjaga kelestarian lingkungan. Pemberian insentif serta penyediaan fasilitas pendukung, misalnya *charging* dan *swapping* baterai perlu dipertimbangkan dalam memperkuat ekosistem kendaraan listrik.

Provinsi D.I. Yogyakarta memiliki 2 bandara utama, yaitu Bandara Internasional Yogyakarta (Yogyakarta International Airport/YIA) di Kabupaten Kulon Progo dan Bandara Adisutjipto di Kabupaten Sleman. Kontribusi emisi di sektor udara meningkat seiring dengan meningkatnya permintaan transportasi udara di seluruh dunia. Hal tersebut menandakan bahwa kontribusi transportasi udara terhadap perubahan iklim juga akan mengalami peningkatan. Oleh karenanya perlu upaya menurunkan emisi gas rumah kaca dari sektor transportasi udara. Faktor utama bagi industri penerbangan untuk mengurangi emisi GRK berkaitan dengan bahan bakar terbarukan dan teknologi rendah karbon (Hu *et al.*, 2022).

Hidrogen dapat sebagai pembawa energi untuk mendekarbonisasi sektor produksi listrik, industri dan transportasi dalam mengurangi pemanasan global. Hidrogen diproduksi melalui proses termokimia. Selain itu, produksi hidrogen melalui elektrolisis air dapat mengurangi GRK

dengan menggunakan sumber rendah karbon, misalnya dengan menggunakan energi terbarukan (matahari, angin, air) dan energi nuklir. Penyediaan bahan bakar ramah lingkungan dapat dilakukan dengan menerapkan hidrogen pada sektor transportasi (pesawat terbang, kapal, kendaraan dan kereta api) (Guilbert & Vitale, 2021). Kendaraan berbahan bakar hidrogen dapat menjadi alternatif lain dalam rangka penyediaan kendaraan ramah lingkungan.

4. KESIMPULAN

Pengembangan sektor transportasi di Provinsi D.I. Yogyakarta perlu diperhatikan seberapa besar kontribusinya terhadap perekonomian wilayah (PDRB) dan seberapa besar dampaknya terhadap lingkungan, khususnya emisi GRK (CO₂e) yang dihasilkan sehingga bisa diantisipasi upaya untuk memitigasinya. Perhitungan secara terintegrasi antara aspek ekonomi dan emisi GRK dengan analisis EEIO dapat membantu perencanaan transportasi daerah guna mewujudkan pengembangan sektor transportasi yang berwawasan lingkungan.

Sektor transportasi diklasifikasikan menjadi 5 subsektor, yaitu angkutan rel, angkutan darat, angkutan laut, angkutan sungai danau dan penyeberangan, dan angkutan udara. Subsektor angkutan udara memiliki keterkaitan langsung dan tidak langsung dengan sektor-sektor ekonomi di depannya yang relatif lebih tinggi dari rata-ratanya dan keterkaitan langsung dan keterkaitan tidak langsung dengan sektor-sektor ekonomi yang ada di belakangnya yang relatif kuat. Oleh karena itu, subsektor angkutan udara ini termasuk *key economy sectors* atau sektor-sektor unggulan (*leading sector*) yang berkontribusi relatif lebih besar terhadap pertumbuhan ekonomi wilayah.

Hasil simulasi dampak peningkatan 25% permintaan akhir terhadap nilai tambah bruto (NTB) dan berkontribusi terhadap PDRB DIY yang dihasilkan oleh 5 subsektor transportasi untuk pengganda tipe I (dampak langsung dan dampak tidak langsung) sebesar Rp3.037.040,460 juta, dengan nilai tambah bruto terbesar pada subsektor transportasi angkutan udara sebesar Rp1.883.086,015 juta. Sedangkan total nilai tambah bruto untuk pengganda tipe II (dampak langsung, dampak tidak langsung dan dampak imbasan) sebesar Rp4.528.778,968 juta, dengan nilai tambah bruto terbesar pada subsektor transportasi angkutan udara sebesar Rp3.000.696,019 juta.

Hasil simulasi dampak peningkatan 25% permintaan akhir terhadap emisi yang dihasilkan oleh 5 subsektor transportasi untuk pengganda tipe I adalah 408,706 Gg CO₂e, dengan emisi terbesar pada subsektor transportasi angkutan udara sebesar 289,720 Gg CO₂e. Total emisi CO₂e untuk pengganda tipe II sebesar 618,091 Gg CO₂e, dengan emisi terbesar pada angkutan udara sebesar 461,669 Gg CO₂e. Upaya memitigasi emisi ini perlu dilakukan secara bertahap dengan mendifusikan teknologi bersih dan sistem transportasi yang efisien.

Sektor transportasi sangat diperlukan untuk mendukung mobilitas masyarakat dan bisnis khususnya pengembangan jasa dan destinasi pariwisata di Provinsi D.I. Yogyakarta. Pengembangan sektor transportasi selain berkontribusi terhadap sisi ekonomi diharapkan juga dapat

mendukung penurunan emisi GRK melalui penerapan sistem transportasi yang ramah lingkungan.

PERSANTUNAN

Terima kasih kepada Nugroho Adi Sasongko, PhD. (Kepala Pusat Riset Sistem Produksi Berkelanjutan dan Penilaian Daur Hidup-BRIN) yang telah memberikan kesempatan kepada Kelompok Riset Pengembangan Kawasan/Kota yang Berkelanjutan dan Pembangunan Rendah Karbon untuk dapat melakukan riset *Environmentally Extended Input-Output* secara mandiri.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, Dipokusumo, B., Sjah, T., & Mahyuddin. (2021). Key sectors and inter-sectoral linkages in economic development in East Lombok Regency, West Nusa Tenggara Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 681(1), 012062.
- Awan, A., Alnour, M., Jahanger, A., & Onwe, J. C. (2022). Do technological innovation and urbanization mitigate carbon dioxide emissions from the transport sector? *Technology in Society*, 71, 102128. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102128>
- Badan Pusat Statistik Provinsi D.I. Yogyakarta. (2021). *Tabel Input-Output Provinsi D.I. Yogyakarta Transaksi Domestik Atas Dasar Harga Produsen (17 Lapangan Usaha)*, 2016 (Juta Rupiah). Retrieved from <https://yogyakarta.bps.go.id/statistable/2021/05/31/157/-tabel-input-output-provinsi-di-yogyakarta-transaksi-domestik-atas-dasar-harga-produsen-17-lapangan-usaha-2016-juta-rupiah-.html>
- Bosker, M., Deichmann, U., & Roberts, M. (2018). Hukou and highways the impact of China's spatial development policies on urbanization and regional inequality. *Regional Science and Urban Economics*, 71, 91–109. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2018.05.007>
- Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bantul. (2020). *Laporan Akhir Kajian Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Tahun 2020*. Bantul: Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bantul.
- Guilbert, D., & Vitale, G. (2021). Hydrogen as a Clean and Sustainable Energy Vector for Global Transition from Fossil-Based to Zero-Carbon. *Clean Technologies*, 3(4), 881–909. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3040051>
- Hu, Y.-J., Yang, L., Cui, H., Wang, H., Li, C., & Tang, B.-J. (2022). Strategies to Mitigate Carbon Emissions for Sustainable Aviation: A Critical Review from a Life-cycle Perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 33, 788–808. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.009>
- Kitzes, J. (2013). An Introduction to Environmentally-Extended Input-Output Analysis. *Resources*, 2(4), 489–503. <https://doi.org/10.3390/resources2040489>
- Lian, L., Lin, J., Yao, R., & Tian, W. (2020). The CO2 emission changes in China's transportation sector during 1992–2015: A structural decomposition analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(9), 9085–9098.
- Lindsey, R., & Santos, G. (2020). Addressing transportation and environmental externalities with economics: Are policy makers listening? *Research in Transportation Economics*, 82, 100872. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100872>
- Logan, K. G., Nelson, J. D., McLellan, B. C., & Hastings, A. (2021). Japan and the UK: Emission predictions of electric and hydrogen trains to 2050. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100344.
- Mohan, G., Chapagain, S. K., Fukushi, K., Papong, S., Sudarma, I. M., Rimba, A. B., & Osawa, T. (2021). An extended Input-Output framework for evaluating industrial sectors and provincial-level water consumption in Indonesia. *Water Resources and Industry*, 25, 100141. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100141>
- Nidziy, E. (2017). Financing the construction of transport infrastructure as the basis for sustainable development of the regional economy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 90, 012172.
- Önder, H. G. (2021). Renewable energy consumption policy in Turkey: An energy extended input-output analysis. *Renewable Energy*, 175, 783–796. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.025>
- Popova, Y. (2017). Relations between Wellbeing and Transport Infrastructure of the Country. *Procedia Engineering*, 178, 579–588.
- Pustral UGM. (2017). *Laporan Inventarisasi dan Penyusunan Profil Emisi Gas Rumah Kaca Kota Yogyakarta*. Pusat Studi Transportasi dan Logistik UGM.
- Saboori, B., Sapri, M., & Bin Baba, M. (2014). Economic growth, energy consumption and CO2 emissions in OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)'s transport sector: A fully modified bi-directional relationship approach. *Energy*, 66, 150–161.
- Ševčenko-Kozlovska, G., & Čižiūnienė, K. (2022). The Impact of Economic Sustainability in the Transport Sector on GDP of Neighbouring Countries: Following the Example of the Baltic States. *Sustainability*, 14(6), 3326.
- Song, J., Jiang, L., He, Z., Liu, Z., & Leng, X. (2022). Characteristics Analysis and Identification of Key Sectors of Air Pollutant Emissions in China from the Perspective of Complex Metabolic Network. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9396. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159396>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... Xia, Y. (2014). *Climate change 2013: The physical science basis* [Contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.

- Sugarmansyah, U., Setiastuti, N., Soewargono, B. D., Nugroho, B. H., & Apriyanto, H. (2022). Identification of leading sectors for sustainable regional development: A case study of D.I. Yogyakarta region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1108(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1108/1/012006>
- Sun, Y.-Y., Cadarso, M. A., & Driml, S. (2020). Tourism carbon footprint inventories: A review of the environmentally extended input-output approach. *Annals of Tourism Research*, 82, 102928. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2020.102928>
- Todoruț, A., Cordoș, N., & Iclodean, C. (2020). Replacing Diesel Buses with Electric Buses for Sustainable Public Transportation and Reduction of CO2 Emissions. *Pol. J. Environ. Stud.*, 29(No. 5), 1–13.
- Vukić, L., Mikulić, D., & Keček, D. (2021). The Impact of Transportation on the Croatian Economy: The Input-Output Approach. *Economies*, 9(1), 7.
- West, G. R. (1993). *Input-Output Analysis for Practitioners: An Interactive Input-Output Software Package User's Guide Version 7.1 (GRIMP)*. Brisbane: Department of Economics, The University of Queensland.
- Williams, G. (2016). Economic Impacts from Development of the Coastal Town in Queensland on Tourism and Regional Economy. *Resources*, 5(4), 48. <https://doi.org/10.3390/resources5040048>
- Yao, S., Zhang, F., Wang, F., & Ou, J. (2019). Regional economic growth and the role of high-speed rail in China. *Applied Economics*, 51(32), 3465–3479. <https://doi.org/10.1080/00036846.2019.1581910>
- Yin, M., Bertolini, L., & Duan, J. (2015). The effects of the high-speed railway on urban development: International experience and potential implications for China. *Progress in Planning*, 98, 1–52. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2013.11.001>
- Yu, H. (2018). A review of input-output models on multisectoral modelling of transportation-economic linkages. *Transport Reviews*, 38(5), 654–677.