

Studi Pemodelan Pengendalian Kendaraan Bermotor untuk Menurunkan Polusi Udara di Jakarta

Azhari Aziz Samudra*¹, Bram Hertasing²

¹Program Doktor Publik Administrasi, Universitas Muhammadiyah Jakarta
Jl. K.H. Ahmad Dahlan, Cireundeu, Kec. Ciputat Timur, Kota Tangerang Selatan, Banten 15419, Indonesia

²Pusat Kebijakan Lalu Lintas, Angkutan dan Transportasi Perkotaan, Badan Kebijakan Transportasi
Jl. Medan Merdeka Timur No. 5, Gambir, Jakarta Pusat, 10110, Indonesia

E-mail: *azhariazis.samudra@umj.ac.id

Diterima: 11 September 2023, disetujui: 27 November 2023, diterbitkan *online*: 29 Desember 2023

Abstrak

Peningkatan jumlah kendaraan bermotor yang tidak terkendali di Provinsi DKI Jakarta merupakan salah satu penyebab tingginya emisi dan polusi udara. Pemerintah telah mengeluarkan kebijakan *three in one*, sistem ganjil genap, dan bantuan subsidi kendaraan listrik berbasis baterai untuk mengatasi kemacetan lalu lintas dan mengurangi polusi udara. Namun, implementasinya belum terlihat berhasil. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pilihan skenario solusi yang dapat diambil Pemerintah DKI Jakarta karena terjadinya peningkatan konsentrasi polusi udara. Metode penelitian ini menggunakan analisis pemodelan dinamika sistem untuk menghasilkan keterkaitan antar parameter dan komponen model dalam hubungan kebijakan pengurangan polusi dengan pembatasan kendaraan bermotor, tingkat kepadatan lalu lintas, dan panjang jalan raya. Hasil penelitian uji perilaku historis dan uji statistik Fitment menunjukkan adanya kesesuaian perilaku pada jangka panjang. Simulasi dilanjutkan dengan skenario moderat dan optimis yang diintervensikan ke dalam model untuk memperoleh model yang komprehensif. Kesimpulan penelitian ini menjelaskan bahwa skenario moderat pengurangan jumlah kendaraan yang memengaruhi tingkat polusi udara mencapai di bawah 161 ISPU, sedangkan skenario optimis yang memengaruhi tingkat polusi udara mencapai di bawah 50 ISPU. Berdasarkan dua skenario yang ditawarkan, pilihan terbaik ialah menggunakan skenario optimis di mana pertumbuhan kendaraan bermotor, tingkat kemacetan, dan kepadatan lalu lintas dapat dikendalikan pada tahun 2024-2027.

Kata kunci: polusi, simulasi sistem dinamis, kebijakan publik, pembatasan kendaraan bermotor, Jakarta

Abstract

Motor Vehicle Control Modeling Study to Reduce Air Pollution in Jakarta: The increase in the number of uncontrolled motorized vehicles in DKI Jakarta Province is one of the causes of high emissions and air pollution. In response, the government has issued a three-in-one policy, an odd-even system, and subsidies for battery-based electric vehicles to overcome traffic jams and reduce air pollution, but its implementation has not been successful. This research aimed to provide a choice of solution scenarios that the Jakarta Government must take due to increased air pollution concentrations. This research method used was system dynamics modeling analysis to produce linkages between parameters and model components in the relationship between pollution reduction policies involving motor vehicles, traffic density levels, and highway length. The research results of historical behavioral tests and statistical fitment tests show that there is long-term suitability of behavior. The simulation continues with moderate and optimistic scenarios that intervened in the model to obtain a comprehensive model. This study concluded that a moderate scenario of reducing the number of vehicles will influence air pollution levels reaching below 161 ISPU, while an optimistic scenario will influence air pollution levels reaching below 50 ISPU. Of the two scenarios offered, the best choice is to use the optimal scenario where the growth of motorized vehicles, the level of congestion, and traffic density can be controlled in 2024-2027.

Keywords: pollution, dynamic system simulation, public policy, motor vehicle restrictions, Jakarta

1. Pendahuluan

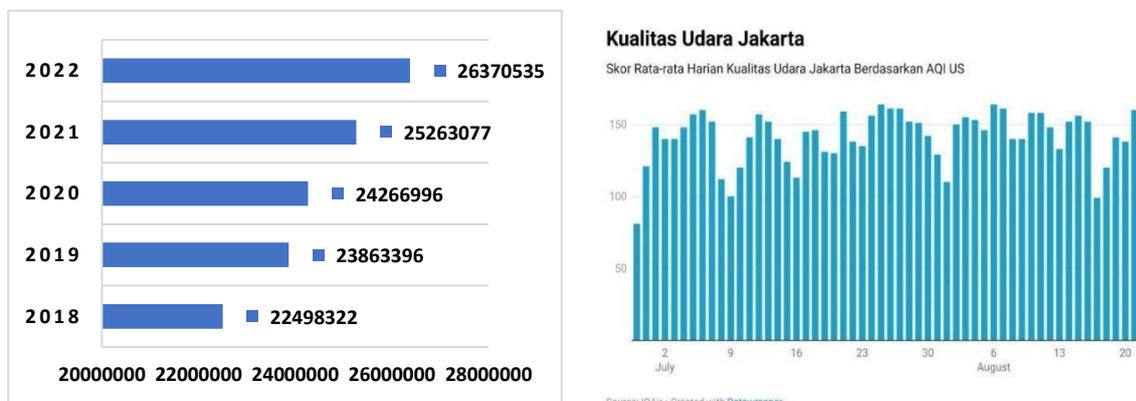
Peningkatan jumlah kendaraan bermotor yang tidak terkendali menyebabkan tingginya emisi dan polusi udara di Kota Jakarta [1]. Peningkatan jumlah kendaraan bermotor bukanlah satu-satunya penyebab, tetapi ada faktor lain seperti konsentrasi pabrik yang beroperasi di wilayah Jabodetabek yang asapnya mengepung ibu kota, pembakaran sampah sembarangan di tempat pembuangan sampah (TPA) dan di tempat umum, dan iklim kering yang menjadi pemicu peningkatan pencemaran udara di ibu kota.

Studi ini berfokus pada pencemaran udara yang disebabkan oleh kendaraan bermotor. Sebagai perbandingan, data yang disajikan oleh Badan Pusat Statistik menyatakan bahwa pada tahun 2016 jumlah kendaraan bermotor di Kota Jakarta adalah 18.006.404 unit. Namun, pada tahun 2022 meningkat menjadi 26.370.535 unit. Dari jumlah tersebut, 73,82% merupakan sepeda motor, 18,42% mobil penumpang, 2,81% bus, dan 4,96% truk [2][3].

Pada tahun 2022, penyedia indeks kemacetan bernama Tomtom melakukan survei yang menyatakan bahwa Jakarta adalah salah satu kota terpadat di dunia [4]. Berbagai faktor penyebabnya antara lain keterbatasan jalan, perilaku pengemudi kendaraan bermotor, dan jumlah kendaraan bermotor yang berlebihan. Pemerintah Provinsi DKI Jakarta telah mengeluarkan kebijakan *three in one* untuk mengatasi kemacetan lalu lintas, namun implementasinya belum berhasil [5]. Pemerintah kota juga berinovasi dengan mengeluarkan kebijakan pengganti yang disebut dengan kebijakan nomor kendaraan ganjil genap [6]. Kebijakan lalu lintas dengan sistem ganjil genap merupakan alternatif dan kelanjutan dari rekayasa manajemen lalu lintas yang diundangkan berdasarkan Peraturan Gubernur Nomor 164 Tahun 2016 dan disempurnakan dengan Peraturan Gubernur Nomor 88 Tahun 2019 yang mana implementasinya juga belum sukses.

Pemerintah Jakarta merumuskan kebijakan baru yaitu pembatasan kendaraan bermotor yang akan diterapkan pada tahun 2025 [7]. Gubernur Jakarta mengeluarkan instruksi untuk membatasi usia kendaraan bermotor yang beroperasi. Kendaraan yang memiliki umur lebih dari 10 tahun tidak boleh berjalan di jalan raya pada awal tahun 2025. Instruksi Gubernur Nomor 66 Tahun 2019 menjadi dasar dari kebijakan rencana pembatasan kendaraan. Bila diamati, kebijakan Gubernur ini dirumuskan berdasarkan pertimbangan hasil *Euromonitor International Survey* yang memprediksi pada tahun 2030 lalu lintas jalan akan lumpuh. Alasan lain ialah hanya 13,3% dari total jumlah mobil individu yang beralih ke *busway* [8]. Kebijakan ini dianggap sebagai kebijakan setengah hati karena sampai akhirnya terjadi pergantian gubernur pun belum direalisasikan. Pada tanggal 20 Maret 2023, pemerintah resmi menerbitkan Instruksi Presiden Nomor 7 tahun 2022 yang menyatakan bahwa instansi pemerintah pusat dan pemerintah daerah diwajibkan mengadopsi kendaraan listrik berbasis baterai atau *Battery Electric Vehicle* (BEV) sebagai kendaraan dinas operasional atau kendaraan perorangan dinas [9][10]. Pemerintah memberikan bantuan subsidi pembelian kendaraan listrik berbasis baterai yang dimulai pada 20 Maret 2023 untuk meningkatkan kualitas udara.

Pemerintah telah mengeluarkan Instruksi Presiden Nomor 7 tahun 2022 dan direalisasikan pada pertengahan Maret 2023. Kondisi udara di Jakarta bukan membaik tetapi terjadi penurunan kualitas. Data IQAir Agustus 2023 mencatat standar polusi di ibu kota adalah beberapa kali dari standar WHO [1]. Kendaraan bermotor dianggap penyebab utama setelah pabrik. Kebijakan ini juga dianggap kebijakan setengah hati dan dapat menimbulkan pertanyaan dari para ahli, akademisi, dan konsultan transportasi. Pertanyaan menariknya ialah mengapa pemerintah tidak mengurangi sebagian atau sepertiga dari jumlah kendaraan yang ada saat ini dan berapa persen pengurangan yang ideal. Untuk lebih memahami kondisi Jakarta, dibawah ini disajikan jumlah kendaraan bermotor dan kualitas indeks udara di Jakarta bulan Juli dan Agustus 2023.



Sumber: [1][11]

Gambar 1. Jumlah kendaraan bermotor dan Kualitas Udara di Jakarta, 2023

Paradigma pengurangan jumlah kendaraan bermotor sejak tiga dasawarsa yang lalu tidak menjadi pilihan terbaik bagi Pemerintah DKI Jakarta karena berdampak terhadap penurunan pendapatan daerah.

Namun, makalah ini mengingatkan bahwa panjang jalan di DKI Jakarta hanyalah 7.208 km (7.208.000 meter), dengan jumlah kendaraan bermotor 26.370.535 unit. Hal ini menjelaskan bahwa rasio panjang jalan dan jumlah kendaraan bermotor sudah tidak masuk akal, yaitu setiap satu meter ditempati oleh 3 kendaraan bermotor. Studi mengenai polusi udara yang disebabkan oleh kendaraan bermotor dengan kajian pemodelan dinamika sistem berdasarkan pencarian daring di situs belum pernah ditemukan. Dikarenakan studi polusi udara oleh kendaraan bermotor ini melibatkan banyak instansi terkait, maka studi ini akan bermanfaat untuk diimplementasikan oleh Kementerian Perhubungan, Kementerian Lingkungan Hidup, Pemerintah Provinsi dan Dinas Perhubungan DKI Jakarta, *stakeholder*, pengambil kebijakan, dan masyarakat.

2. Metodologi

2.1. Lokasi Survei

Penelitian ini dilakukan di kota Jakarta, Indonesia. Data diperoleh dari Badan Pusat Statistik, Kementerian Perhubungan RI, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI, Badan Pusat Statistik DKI Jakarta, Badan Pendapatan Daerah DKI Jakarta, dan Dinas Perhubungan DKI Jakarta, IQ-Air, situs online, surat kabar, dan dokumen dari instansi terkait.

2.2. Metode Pengumpulan Data

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Nilai dan parameter awal diperoleh dari sumber data sekunder [12]. Jika data sekunder tidak tersedia, nilai ini dapat diestimasi dengan mengolah data pendukung atau numerik pada data primer dan sekunder. Untuk mensimulasikan model hubungan kebijakan pembatasan kendaraan bermotor dengan penurunan polusi udara dalam pemodelan dinamika sistem, nilai awal perlu ditetapkan pada konstanta, fungsi tabel, dan variabel level. *Auxiliary* dan indeks kualitas udara biasanya dihitung dari level dan konstanta sehingga tidak memerlukan perhitungan nilai awal yang terpisah. Penentuan nilai parameter harus memperhatikan pengaruh terhadap sensitivitas model. Dalam hal ini, perubahan pada struktur model akan tampak lebih sensitif daripada model umpan balik. Oleh karena itu, estimasi dalam penelitian ini hanya dilakukan pada tingkat akurasi yang dibutuhkan. Mengikuti tujuan pemodelan, penelitian ini akan lebih memperhatikan tren menuju perubahan jangka panjang, memahami sifat dinamis sebuah sistem, dan desain kebijakan alternatif. Oleh karena itu kepekaan perilaku dan kepekaan kebijakan akan diutamakan [13].

2.3. Pengolahan Data, Analisis Data, dan Nilai Parameter

Pengolahan data dilakukan secara kuantitatif dengan pemodelan dinamika sistem, kemudian hasilnya dianalisis secara kualitatif. Analisis data dilakukan dengan menggunakan *software* dari perangkat komputer untuk menghasilkan hubungan atau keterkaitan antar parameter dan komponen model dalam hubungan kebijakan pembatasan kendaraan bermotor dengan penurunan polusi udara. Tujuan analisis sistem dinamik adalah untuk memahami perilaku yang mendasari variabel untuk menemukan faktor-faktor yang menyebabkan model perilaku dan memperbaiki perilaku sistem [14]. Nilai awal dan parameter yang digunakan dalam pemodelan disajikan pada Tabel 1. Nilai-nilai ini sebagian besar diperoleh dari data sekunder dan referensi penting [15]. Beberapa nilai diperbolehkan dalam perkiraan berdasarkan informasi kualitatif yang dianggap andal [16].

Tabel 1. Nilai Awal dan Parameter Model (2022)

No	Indikator	Nilai Awal/Parameter (variabel endogen)	Satuan/Unit	Sumber
1.	Total Jumlah Kendaraan Bermotor	26.370.535	Unit	S
2.	Jumlah Mobil Bus	37.180	Unit	S
3.	Jumlah Sepeda Motor	17.304.447	Unit	S
4.	Jumlah Mobil Truk	748.395	Unit	S
5.	Jumlah Mobil Penumpang	3.766.059	Unit	S
6.	Jumlah Kendaraan Bermotor tahun lalu	21.289.309	Unit	S
7.	Jumlah KB Baru	566.772	Unit/tahun	C
8.	Rasio Pertumbuhan Mobil Bus Baru	2,66	Persen/tahun	C
9.	Rasio Pertumbuhan Sepeda Motor Baru	4,14	Persen/tahun	C
10.	Pertumbuhan Rasio Mobil Truk Baru	4,17	Persen/tahun	C
11.	Pertumbuhan Rasio Mobil Penumpang Baru	4,21	Persen/tahun	C
12.	Rasio Rata-rata Pertumbuhan kendaraan	2.14	Persen/tahun	C
13.	Mutasi Kendaraan	0.1	Persen/tahun	C

14.	Tingkat PDB sektor Transportasi	0,32	Unit/tahun	S
15.	Berat/bobot (<i>surchage</i>)	1 -1,3	koefisien	S
16.	Tarif Pajak Kendaraan Bermotor	2,5-3,0	persentase	S
17.	Skenario Pembatasan jumlah kendaraan	0,0, 0,3, 0,5	Persen	Sc
18.	Panjang Jalan	7.208.000	M	S
19.	Rata-rata Kepadatan KB/Panjang Jalan	3:1	mobil/meter	C
20.	Indeks Kualitas Udara Normal Maksimal	50	IQHI	S
21.	Indeks Kualitas Udara Saat Ini	161	IQHI	S

Sumber: [1],[3],[11],[17],[18]

Keterangan:

S = Diperoleh dari data sekunder

E = Estimasi berdasarkan informasi kualitatif

C = Dihitung dengan akuntansi

Sc= Model scenario

Studi ini bertujuan untuk mendapatkan sebuah kebijakan yang komprehensif dengan menyajikan dua skenario solusi dari analisis model dinamika sistem. Hipotesisnya adalah:

Ha1 : Pengurangan jumlah kendaraan bermotor berpengaruh terhadap kualitas udara dan pendapatan pajak kendaraan.

Ha2 : Pilihan kebijakan ideal untuk mengurangi jumlah kendaraan bermotor ialah memakai skenario optimis.

Ha3 : Skenario optimis dapat memberikan keseimbangan perbaikan kualitas udara, pengurangan tingkat kepadatan lalu lintas dan penurunan polusi udara akibat kendaraan bermotor.

2.4. Kategori Indeks Standar Pencemar Udara

Tabel 2. Konversi Nilai Konsentrasi

ISPU	24 Jam (ug/m3)						
	PM10	PM2.5	SO2	CO	O3	NO2	HC
0-50	50	15.5	52	4000	120	80	45
51-100	150	55.4	180	8000	235	200	100
101-200	350	150.4	400	15000	400	1130	215
201-300	420	250.4	800	30000	800	2260	432
>300	500	500	1200	45000	1000	3000	648

Sumber: [19]

Perhitungan Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) dilakukan berdasarkan nilai batas atas, batas bawah, ambien batas atas, ambien batas bawah, dan konsentrasi ambien hasil pengukuran. Kategori Baik (1-50): Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dengan kategori baik memiliki rentang nilai 1 sampai 50 dan tidak memberikan efek negatif terhadap manusia, hewan, dan tumbuhan. Kategori Sedang (51-100): ISPU kategori sedang memiliki rentang nilai 51 sampai 100, di mana tingkat mutu udara masih dapat diterima pada kesehatan manusia, hewan, dan tumbuhan. Kategori Tidak Sehat (101-200): ISPU kategori tidak sehat memiliki rentang nilai 101-200 artinya tingkat mutu udara merugikan pada manusia, hewan, dan tumbuhan. Kategori Sangat Tidak Sehat (201-300): ISPU kategori sangat tidak sehat memiliki rentang nilai 201 sampai 300, di mana tingkat mutu udara yang dapat meningkatkan risiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar. Kategori Berbahaya (>300): ISPU kategori berbahaya memiliki rentang nilai lebih dari 300, artinya tingkat mutu udara dapat merugikan kesehatan serius pada populasi dan perlu penanganan cepat [19].

3. Hasil dan Pembahasan

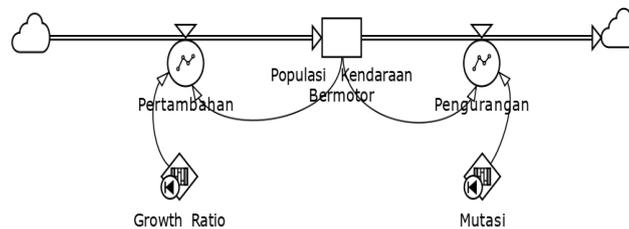
Model simulasi dengan dinamika sistem mengacu pada pendekatan kuantitatif yang didukung oleh uraian kualitatif [20]. Penggunaan pendekatan berpikir sistem kuantitatif (*soft system methodology*) dalam proses operasional difasilitasi dengan penggunaan perangkat lunak konstruktor Powersim sebagai alat pemetaan kognitif dan perumusan model sebagai pendekatan berpikir sistem kuantitatif dinamika sistem [20],[21]. Tujuan utama analisis sistem dinamik menurut Kim Warren adalah menjawab tiga pertanyaan: mengapa polusi meningkat (*why*), di mana atau dalam posisi apa tindakan harus diambil agar kualitas udara dapat diturunkan sesuai baku mutu (*where*), dan bagaimana cara mengubahnya (*how*) [22], pertanyaan terakhir ini lebih cenderung mengenai kebijakan yang akan diambil [23]. Pada setiap model,

struktur umpan balik diharapkan memiliki beberapa *loop* untuk memenuhi persyaratan suatu model. Model yang diuji berkali-kali akan bertahan lama, bahkan dalam kondisi ekstrim (kuat). Estes menambahkan bahwa model juga harus memiliki banyak titik kontak dengan dunia nyata, di mana perbandingan berulang kali dengan dunia nyata akan memperkuat model [24].

Terkait dengan dinamika sistem, tren peningkatan tingkat pencemaran udara di Jakarta terus meningkat dan menurun pada waktu-waktu tertentu, kemudian meningkat kembali. Gambar 1 mengandung makna tertentu yang disebut perilaku atau dinamika [25]. Perilaku timbul dari mana atau oleh siapa. Dalam dinamika sistem, pertanyaannya adalah berapa nilai atau jumlah kuantitas di masa depan. Istilah diagram alir digunakan di dalam pemodelan dinamika sistem dan mengandung arti yang sama dengan diagram alir pada perangkat lunak konstruktor Powersim komputer. Pemodelan dinamika sistem diperkenalkan pertama kali oleh Wiener pada tahun 1930 dalam bentuk *mix method* yang didahului oleh *system thinking*. Kemudian model tersebut dikembangkan oleh Jay Forrester pada tahun 1950 dan dilanjutkan oleh Kim Warren pada tahun 1996 di mana pemodelan dinamika sistem harus menggunakan *software* dari perangkat komputer dengan menggunakan kata diagram alir.

3.1. Diagram Alir Pertumbuhan Jumlah Kendaraan

Dalam analisis dinamika sistem, perkembangan jumlah kendaraan bermotor digambarkan dalam diagram alir yaitu kendaraan baru, bekas, dan mutasi. Diagram alir menghasilkan dua *loops* dan populasi kendaraan bermotor mewakili *stock*. *Loop 1* adalah pertumbuhan kendaraan bermotor, *Loop 2* menunjukkan reduksi yang bersumber dari mutasi, mobil rusak atau mati, atau tidak berjalan lagi di jalan raya. Diagram alir (+) menunjukkan bahwa pertumbuhan kendaraan bermotor meningkat rata-rata 2.13% per tahun untuk semua jenis kendaraan. Asumsi ini masih di bawah apa yang diberitakan di berita-berita nasional, dimana tingkat pertumbuhan telah mencapai di atas 4%. Sementara pada diagram alir (-) menjelaskan *balancing* yang ditunjukkan oleh pengurangan kendaraan bermotor yang diakibatkan oleh mutasi yang diasumsikan 1% dari total kendaraan bermotor.



Sumber: Hasil analisis simulasi, 2022

Gambar 2. Diagram Alir Pertumbuhan Jumlah Kendaraan Bermotor

$$\text{Rumus 1: } \text{PKB} = (\text{GR} \cdot \text{PKB}) - (\text{M} \cdot \text{PKB}) \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- PKB = Populasi Kendaraan Bermotor
- GR = Growth Ratio
- M = Mutasi Ratio

Berdasarkan *flowchart* ini, peningkatan jumlah kendaraan bermotor terjadi karena banyak indikator, misalnya kemudahan kredit kepemilikan, promosi diskon, rendahnya tarif pajak, dan biaya *surcharge* (bobot) kendaraan. Bobot adalah berat/daya angkut kendaraan bermotor yang diukur berdasarkan total tonase/volume silinder yang dinyatakan dengan koefisien 1– 1,3 dan berbeda untuk setiap jenis kendaraan. Bobot merupakan pengembangan dari konsep *surcharge tax* [28]. Sebaliknya, indikator yang dimaksud itu dapat digunakan untuk menekan perkembangan jumlah kendaraan bermotor yang ditambah dengan pengenaan biaya emisi yang tinggi.

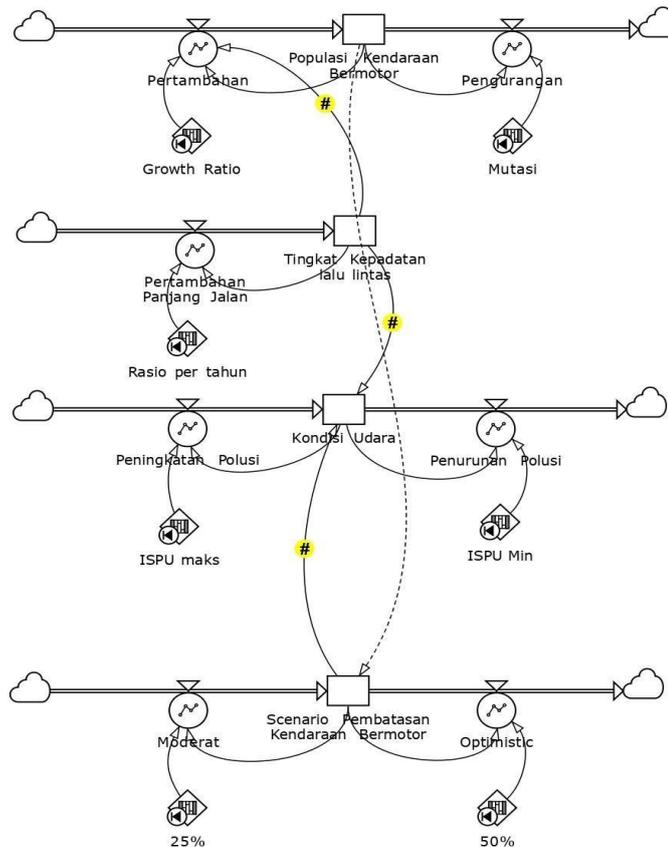
Apabila dicermati dengan seksama, terjadinya peningkatan polusi udara dikarenakan masyarakat kurang mengantisipasi kebijakan-kebijakan yang pro pada kesehatan publik sehingga jumlah kendaraan bermotor tidak terkendali. Cara-cara konvensional yang diterapkan selama ini tidak mungkin lagi untuk

diteruskan, tetapi penerapan hipotesis Leviathan [26] masih memungkinkan untuk diterapkan dengan menaikkan pajak kendaraan sebagaimana dilakukan di beberapa negara maju seperti Jepang yang tidak mau mengikuti *pressure group* dari Agen Tunggal Pemegang Merek Kendaraan (ATPM). Isu-isu yang berkembang saat ini, seperti pemanasan global, perlindungan lingkungan, dan emisi karbon, dapat dijadikan indikator untuk menaikkan tarif tambahan atau pajak serupa untuk mengurangi kemacetan atau pembatasan kendaraan [27],[28]. Berbagai alternatif tersebut dapat dirumuskan dengan menghitung secara ketat yang bertujuan untuk menurunkan kadar polusi udara di Jakarta. Kebijakan *work from home* yang diuji cobakan pada bulan September 2023 juga tidak bisa diterapkan untuk jangka panjang.

3.2. Diagram Alir Kendaraan, Kondisi Udara, dan Kepadatan Lalu Lintas

Dengan memakai diagram alir populasi kendaraan bermotor sebagai *stock*, maka dapat dipahami hubungannya dengan *stock* tingkat kepadatan lalu lintas, dan *stock* kondisi udara di DKI Jakarta. Bagan alirnya adalah sebagai berikut (Gambar 3).

Diagram alir tingkat kepadatan lalu lintas menghadirkan 1 *loop* yaitu pertambahan panjang jalan yang minim. Adapun diagram alir kondisi udara (polusi) menghadirkan dua *loops*. Kondisi udara adalah *stock* dan *loop* 1 menunjukkan sifat peningkatan polusi. Pada *loop* 1, kadar polusi bertambah karena berbagai variabel misalnya pertumbuhan laju kendaraan bermotor dan panjang jalan yang minim (tidak bertambah) yang menimbulkan kepadatan dan kemacetan lalu lintas. Variabel pencemaran udara oleh pabrik tidak dianalisis, dan variabel pengenalan tarif pajak penjualan, pajak pertambahan nilai, dan impor mobil dianggap sebagai faktor eksogen dan tidak dianalisis dalam *flowchart*. Adapun *loop* 2 bersifat penyeimbang atau negatif (-) yaitu penurunan polusi. *Loop* 2 menggambarkan penurunan jumlah kendaraan akibat mutasi. Tingkat mutasi rata-rata untuk mobil penumpang per tahun adalah 1%.



Sumber: Hasil analisis, 2022

Gambar 3. Diagram Alir Pertumbuhan Kendaraan, Kondisi Udara, dan Kepadatan Lalu Lintas

3.3. Perilaku Pemodelan

Nilai awal dan parameter yang digunakan dalam pembuatan model dapat dilihat pada Tabel 1. Nilai tersebut merupakan parameter untuk membuat model yang dibutuhkan oleh sistem dinamik. Pemodelan menggunakan tes perilaku historis dan model uji statistik Fitment yang dapat menstimulasikan pertumbuhan jumlah kendaraan terkait rencana kebijakan pembatasan kendaraan bermotor. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 4.

3.4. Model Perilaku Uji

3.4.1. Model tes perilaku historis

Untuk menentukan model yang dikembangkan sesuai dengan sistem yang ada (*historical behavior*) diperlukan pengujian dengan membandingkan hasil simulasi sistem dinamik komputer dengan data empiris di lapangan [29]. Model yang dikembangkan dinyatakan valid jika hasil simulasi komputer sesuai dan mirip dengan data empiris. Model yang valid dapat digunakan sebagai alat eksperimen untuk menganalisis kebijakan pemerintah. Analisis perbandingan perilaku historis dengan perilaku model simulasi menghasilkan perilaku penurunan jumlah kendaraan bermotor, tingkat polusi udara (kondisi udara), dan tingkat kepadatan lalu lintas. Hasil simulasi uji kesesuaian model perilaku dengan perilaku historis menunjukkan kesesuaian perilaku dan layak digunakan sebagai dasar simulasi kebijakan jangka panjang.

4.4.2. Model Uji Statistik Fitment

Untuk mengukur tingkat kepercayaan model yang dibangun dalam merepresentasikan perilaku sebenarnya digunakan seperangkat uji statistik untuk menguji validitasnya. Dalam pemodelan dinamika sistem, data historis tidak langsung digunakan untuk menyusun model sehingga ukuran model disesuaikan dengan kondisi sebenarnya (*goodness-of-fit*) dan uji signifikansi yang selalu digunakan dalam pemodelan ekonometrika tidak cocok untuk dilaksanakan [30]. Untuk alasan ini, *Root Mean Square Percent Error* (RMSPE) dan statistik ketimpangan Theil dapat digunakan untuk mengukur besarnya dan sifat kesalahan [31]. RMSPE mengukur *root mean square* dari proporsi perbedaan antara nilai yang disimulasikan dan nilai aktual [32].

Sementara itu, statistik ketimpangan Theil membagi *Mean Square Error* (MSE) menjadi komponen-komponen yang mengukur bagian-bagian dari *error* yang disebabkan oleh bias (proporsi ketimpangan yang bias), ketimpangan varian (proporsi varian dari ketimpangan), dan kovarian dari tidak sama (proporsi kovarian dari ketimpangan). Untuk menerapkan statistik Theil dalam pengujian model kesehatan, hal-hal berikut harus dipertimbangkan: UM besar, sedangkan US dan UC kecil menunjukkan kesalahan karena bias. Ini adalah jenis kesalahan sistematis antara model dan kenyataan. *Error* ini disebabkan oleh kesalahan dalam menentukan parameter spesifikasi, dan kesalahan karena ketidaksetaraan varian. Kesalahan ini bersifat sistematis dan terdapat dua jenis, yaitu: US besar, UM kecil dan UC sangat berkorelasi yang berarti rata-rata sama, tetapi varian rata-rata berbeda.

Situasi ini menunjukkan bahwa nilai simulasi dan aktual memiliki kecenderungan yang berbeda. Apabila US besar dan UM nilainya 0, sedangkan UC kecil menunjukkan bahwa nilai sebenarnya memiliki siklus yang tidak ada dalam nilai simulasi. UC dan UM yang luas dan US yang kecil menunjukkan kesalahan karena ketidaksetaraan kovarian. Hal ini menunjukkan bahwa nilai rata-rata yang disimulasikan dan aktualnya sama, tetapi fasenya berbeda, dan kesalahan ini perlu diperbaiki [33].

Dalam meningkatkan kepercayaan model, untuk menghasilkan perilaku sistem seperti keadaan sebenarnya, *error*, dan kegagalan UC dan US harus kecil, sedangkan model dengan kesalahan yang signifikan tidak dapat diterima [34]. Variabel *error* dalam model ini dirangkum dalam tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Statistik Kesesuaian Model

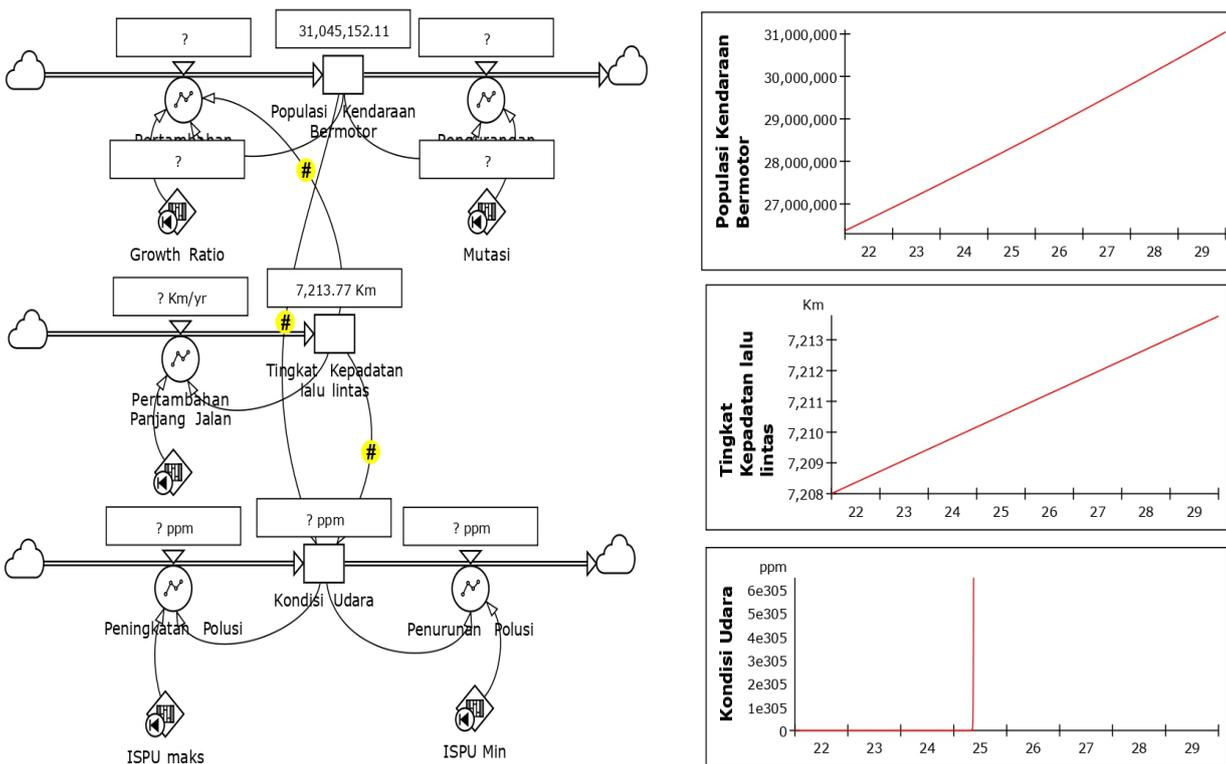
Variabel	RMSPE	Statistik Ketimpangan Theil		
		UM	US	UC
Jumlah Kendaraan Bermotor	0,0593	0,0156	0,0864	0,1538
Tingkat Kepadatan Lalin	0,1732	0,0752	0,4032	0,0363
Kondisi Udara	0,3279	0,5516	0,3072	0,5569

Sumber: Simulasi data hasil tes perilaku historis, 2022.

Tabel 3 menunjukkan bahwa dari indikator yang diuji terdapat kesalahan akar persentase kuadrat rata-rata (RMSPE). Kesalahan dapat terjadi karena kesalahan sistematis antara model dan kenyataan atau karena kesalahan dalam menentukan spesifikasi parameter. Total penurunan kendaraan bermotor sebesar 15,38 UC, dan tingkat kepadatan sebesar 3,63 UC. Hal ini menunjukkan bahwa nilai tersebut cenderung ke *variance imperfection* (US). Artinya *mean*-nya sama, korelasinya tinggi, tetapi varian *mean*-nya berbeda. Keadaan ini menunjukkan bahwa nilai simulasi dan aktual akan selalu berbeda. Namun pada kenyataannya, jumlah kendaraan bermotor akan selalu bervariasi tiap tahun dan akan sangat menentukan nilai kondisi udara, sehingga akan terjadi penurunan polusi udara 0.55 atau mendekati angka 80 (indikator ISPU/IQAir, atau setengah dari angka 161 saat ini). Secara umum nilai kesesuaian hasil uji statistik dinilai baik dalam menentukan validitas model yang dibuat dalam meniru perilaku sejarah. Meskipun masih terdapat kesalahan, masih dalam batas toleransi analisis kebijakan yaitu tidak melebihi 1,0.

3.5. Simulasi dan Analisis

3.5.1. Kondisi saat ini dan Penentuan Skenario



Sumber: Hasil analisis, 2022-2030

Gambar 4. Korelasi Diagram Alir ketiga Variabel

Berdasarkan Gambar 4, perlu didesain sebuah model. Model yang disimulasikan adalah penerapan kebijakan pembatasan kendaraan bermotor dan dampaknya terhadap pengurangan polusi udara dan tingkat kepadatan lalu lintas di Jakarta. Model juga harus mampu menjawab tindakan apa yang harus dilakukan agar pendapatan selalu stabil atau meningkat. Oleh karena itu digunakan dua skenario yaitu

moderat (2,5%) dan optimis (5%). Skenario tersebut dilakukan untuk tahun 2022-2030.

Skenario pesimis tidak ditampilkan karena saat ini kondisi Jakarta dapat disebut sebagai kondisi pesimis, di mana tidak dilakukan intervensi apapun. Asumsi utama yang mendasari tren perkembangan skenario dasar adalah tingkat pertumbuhan kendaraan bermotor akan memengaruhi kondisi udara (polusi), total jumlah kendaraan bermotor saat ini (rasionya adalah 2.21% per tahun), dan rasio pertumbuhan kendaraan dengan panjang jalan.

Skenario moderat adalah skenario dengan laju pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang dibatasi sebesar 2,5% per tahun berdasarkan asumsi yang sama seperti diuraikan di atas (poin b sampai dengan poin e). Sedangkan Skenario optimis adalah skenario dengan tingkat pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang dibatasi sebesar 5% per tahun berdasarkan asumsi yang sama seperti diuraikan di atas.

3.5.2. Simulasi dan Analisis Skenario

a). Skenario moderat

Jika pemerintah memilih skenario moderat (2,5%), pertumbuhan jumlah kendaraan penumpang akan turun menjadi 19,05% pada akhir tahun 2030 dan kemacetan lalu lintas dan emisi karbon juga akan berkurang. Jumlah polusi udara pun menurun sampai 25,23%.

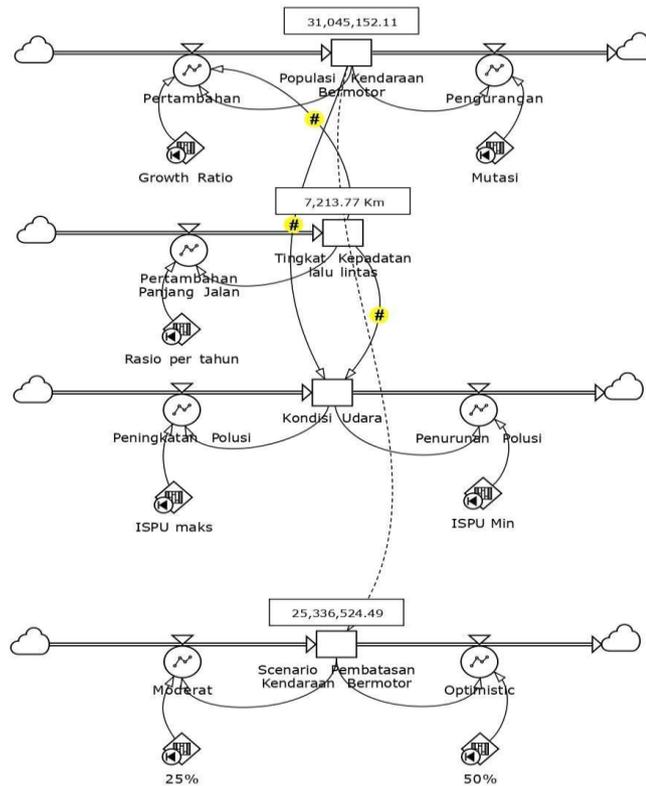
b). Skenario optimis

Jika pemerintah memilih skenario optimis (5%), maka pertumbuhan jumlah kendaraan penumpang akan turun mencapai 38,11% pada akhir tahun 2030. Kemacetan lalu lintas dan emisi karbon juga turun secara signifikan. Tingkat polusi akan turun menjadi 49,16%. Sebaiknya jika memilih skenario optimis diperkuat atau membutuhkan intervensi kebijakan lainnya.

Skenario yang menghasilkan model pemecahan masalah harus diperoleh dengan menggunakan data sekunder, perkiraan berdasarkan informasi kualitatif (Tabel 1), dan perhitungan dari scenario. Hal tersebut dikarenakan semua indikator berkontribusi pada model. Model boleh jadi akan terlihat terlalu rumit, tetapi model memiliki kesanggupan menggambarkan prediksi secara komprehensif dan dapat mengantisipasi kemungkinan-kemungkinan buruk di masa depan.

Untuk memperbarui model, maka peneliti berikutnya dapat memodifikasi model dasar dan ditambahkan ke struktur. Perubahan dan penambahan struktur didasarkan pada kondisi aktual di wilayah lokus penelitian dan berbagai informasi yang diperoleh melalui wawancara atau data lainnya. Kondisi mental dasar ini sangat berguna dalam memperkaya struktur yang akan dibangun, misalnya ada penurunan penerimaan pajak. Dalam hal ini, perlu diantisipasi dengan tambahan indikator pendapatan dari bea balik nama kendaraan bermotor, hotel, restoran, pajak, biaya, dan pengeluaran lainnya yang juga memengaruhi validitas model dan telah dimasukkan ke dalam model generik.

Struktur model tersebut menunjukkan lima *loop*. *Loop* 1 dan 2 memiliki pertumbuhan kendaraan, dan *loops* penyeimbang atau negatif (-), dan *loop* 3 menunjukkan stagnasi pertumbuhan jalan. Populasi kendaraan adalah *stock*. Pertumbuhan kendaraan berpengaruh pada tingkat kepadatan lalu lintas. Tingkat kepadatan tersebut terakumulasi karena penambahan panjang jalan tidak lagi memungkinkan untuk ditambah. *Loop* 4 merupakan *loop* negatif (-) yang menggambarkan peningkatan polusi udara dan *loop* 5 adalah *loop* positif (+) yang menggambarkan terjadinya penurunan polusi udara. Selanjutnya pada skenario pembatasan kendaraan (*loop* 6 dan 7) tidak dianggap sebagai penyeimbang (*loops*), tetapi hanyalah merupakan intervensi simulasi dari skenario saja untuk menggambarkan alternatif pilihan kebijakan.



Sumber: hasil analisis, 2022

Gambar 5. Model Intervensi Kebijakan Pembatasan pada Diagram Alir

4. Kesimpulan

Hasil penelitian ini menjelaskan bahwa penyebab utama pencemaran udara di Jakarta dalam satuan hitungan berasal dari kendaraan bermotor. Kurva kondisi udara mendeskripsikan kondisi yang sangat memprihatinkan pada awal tahun 2025 apabila Pemerintah DKI Jakarta tidak mengintervensi dengan kebijakan pembatasan atau pengurangan kendaraan bermotor, atau beralih pada kendaraan listrik. Pada tahun 2025 akan terjadi polusi yang tidak terkendali yang mencapai 600 ISPU atau kategori sangat berbahaya (>300), di mana tingkat mutu udara dapat merugikan kesehatan populasi dan perlu penanganan cepat dan sesegera mungkin. Terdapat dua skenario yaitu moderat dan optimis dari analisis model sistem dinamika yang dapat diterapkan. Simulasi moderat sebesar 50% menunjukkan hanya mampu menurunkan tingkat pencemaran sebesar 112,01 poin pada tahun 2027, sedangkan pada simulasi optimis menunjukkan penurunan polutan yang signifikan hingga 45,01 poin. Dari dua skenario ini, pilihan yang baik adalah menggunakan skenario optimis karena akan bermanfaat bagi Pemerintah DKI Jakarta untuk mengendalikan penyebab pencemaran udara. Pemerintah juga perlu berhati-hati dalam menerapkan kebijakan pengurangan kendaraan bermotor, yang akan mengurangi pendapatan pemerintah daerah. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menambahkan indikator lain yang memengaruhi model. Temuan studi ini menunjukkan bahwa ketiga hipotesis penelitian telah terbukti benar.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Dana Penelitian dan Pengembangan Dosen yang memberikan dukungan melalui dana hibah universitas dengan nomor 13-DPP-1/8-2023 pada 3 Agustus 2023. Adapun apresiasi tertinggi penulis ucapkan kepada Rektor, Dekan Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik, dan Ketua Program Studi Doktor Universitas Muhammadiyah Jakarta.

Daftar Pustaka

[1] IQAir, "Air quality in Jakarta: Unhealthy for Sensitive Groups," *IQAir*, Jakarta, Indonesia, 2023.
 [2] D. Angelia, "(2022). Makin Sesak, Bagaimana Pertumbuhan Jumlah Kendaraan di Jakarta?," 2022.
 [3] BPS, "Perkembangan Transportasi Nasional Agustus 2023 (National Transportation Development August 2023)," 2023.

- [4] B. Clinton, "Riset TomTom: Jakarta Kota Termacet Nomor 29 di Dunia," *Kompas.com*, Jakarta, Indonesia, Mar. 15, 2023.
- [5] R. Hanna, G. Kreindler, and B. Olken, "Citywide effects of high-occupancy vehicle restrictions: Evidence from 'three-in-one' in Jakarta," *Science* (80-.), vol. 357, pp. 89–93, Jul. 2017, doi: 10.1126/science.aan2747.
- [6] F. Supriana, M. Siregar, E. Tangkudung, and A. Kusuma, "Evaluation of Odd-Even Vehicle Registration Number Regulation Before and After Expansion of the Rule in Jakarta," Jan. 2020. doi: 10.2991/aer.k.200220.032.
- [7] M. R. Sandi, "Pemerintah Provinsi Jakarta Ajukan Rancangan Peraturan Pembatasan Kendaraan Pribadi (Jakarta Provincial Government Proposes Draft Regulation on Restricting Private Vehicles)," *Sindonews*, Jakarta, Indonesia, 2022.
- [8] N. Rahadianto, S. Maarif, and L. Yulianti, "Analysis of intention to use transjakarta bus," *Indep. J. Manag. Prod.*, vol. 10, p. 301, Feb. 2019, doi: 10.14807/ijmp.v10i1.748.
- [9] H. Bram *et al.*, "Strategi Zonasi Penggunaan Kendaraan Bermotor dengan Pendekatan Zona Parkir Progresif dan Zona Rendah Emisi dalam Mewujudkan Kota Ramah Lingkungan," *J. Penelit. Transp. Darat*, vol. 24, no. 2, pp. 119–126, 2022, doi: 10.25104/jptd.v24i2.2175.
- [10] E. Wibowo, "Membaca Arah Kebijakan Kendaraan Listrik," *Kompas.com*, 2023.
- [11] BPS, "Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Jenis Kendaraan (unit) di Provinsi DKI Jakarta 2020-2022," Jakarta, Indonesia, 2022.
- [12] M. Favereau, L. Robledo, and M. Bull, "Homeostatic representation for risk decision making: a novel multi-method simulation approach for evacuation under volcanic eruption," *Nat. Hazards*, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11069-020-03957-2.
- [13] M. Hekimoglu and Y. Barlas, "Sensitivity analysis for models with multiple behavior modes: a method based on behavior pattern measures: Sensitivity Analysis by Behavior Pattern Measures," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 32, pp. 332–362, Jul. 2016, doi: 10.1002/sdr.1568.
- [14] A. E. Şenaras, "Structure And Behavior In System Dynamics: A Case Study In Logistic," *J. Bus. Res.*, vol. 9, Dec. 2017, doi: 10.20491/isarder.2017.334.
- [15] J. Duggan, *System Dynamics Modeling with R*. University of Galway: Springer US, 2016.
- [16] L. Schoenenberger, A. Schmid, R. Tanase, M. Beck, and M. Schwaninger, "Structural Analysis of System Dynamics Models," *Simul. Model. Pract. Theory*, p. 102333, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.simpat.2021.102333.
- [17] BPS (Jakarta Central Bureau of Statistics), "Realisasi Pendapatan Pemerintah Provinsi DKI Jakarta Menurut Jenis Pendapatan (ribu rupiah) 2018-2022," BPS, 2022. <https://jakarta.bps.go.id/indicator/101/730/1/realisasi-pendapatan-pemerintah-provinsi-dki-jakarta-menurut-jenis-pendapatan-ribu-rupiah.html>
- [18] R. A. Umasugi, "Pemprov DKI: 114 Pabrik di Jakarta Cemari Lingkungan Lewat Cerobong Buangan Gas Sisa," *Kompas.com*, Jakarta, Indonesia, 2019.
- [19] W. A. Wibawana, "5 Kategori Indeks Kualitas Udara di Indonesia Menurut ISPU KLHK," *detikNews*, 2023.
- [20] G. Coyle, "Qualitative and Quantitative Modelling in System Dynamics: Some Research Questions," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 16, pp. 225–244, Dec. 2000, doi: 10.1002/1099-1727(200023)16:3<225::AID-SDR195>3.0.CO;2-D.
- [21] J. Duggan, "An Introduction to System Dynamics," in *System Dynamics Modeling with R*, 2016, pp. 1–24. doi: 10.1007/978-3-319-34043-2_1.
- [22] W. Walker and G. Fisher, "Public Policy Analysis," 2013, pp. 1188–1192. doi: 10.1007/978-1-4419-1153-7_828.
- [23] K. Warren, "Improving strategic management with the fundamental principles of system dynamics," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 21, pp. 329–350, Feb. 2006, doi: 10.1002/sdr.325.
- [24] A. Estes, M. Alemany, F. Ottati, and A. Bas, "System dynamics model for improving the robustness of a fresh agri-food supply chain to disruptions," *Oper. Res.*, vol. 23, Apr. 2023, doi: 10.1007/s12351-023-00769-7.
- [25] C. Brennan and O. Molloy, "A system dynamics approach to sustainability education," *Syst. Res. Behav. Sci.*, vol. 37, pp. 875–879, Nov. 2020, doi: 10.1002/sres.2755.
- [26] A. Millsap, B. Hobbs, and D. Stansel, "Local Governments and Economic Freedom: A Test of the Leviathan Hypothesis," *Public Financ. Rev.*, vol. 47, p. 109114211881790, Feb. 2019, doi: 10.1177/1091142118817909.
- [27] R. Williams, R. Pettinen, P. Ziman, K. Kar, and R. Dauphin, "Fuel Effects on Regulated and Unregulated Emissions from Two Commercial Euro V and Euro VI Road Transport Vehicles," *Sustainability*, vol. 13, p. 7985, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13147985.
- [28] T. Oderinwale and H. van der Weijde, "Carbon taxation and feed-in tariffs: evaluating the effect of network and market properties on policy effectiveness," *Energy Syst.*, vol. 8, Aug. 2017, doi: 10.1007/s12667-016-0219-3.
- [29] J. Paine, "Dynamic supply chains with endogenous dispositions," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 39, Dec. 2022, doi: 10.1002/sdr.1725.
- [30] Ö. Tezel, B. Tiryaki, E. Özkul, and O. Kesemen, "A New Goodness-of-Fit Test: Free Chi-Square (FCS)," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 34, pp. 879–897, Feb. 2021, doi: 10.35378/gujs.743444.
- [31] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?– Arguments against avoiding RMSE in the literature," *Geosci. Model Dev.*, vol. 7, pp. 1247–1250, Jun. 2014, doi: 10.5194/gmd-7-1247-2014.
- [32] V. Narwane, V. Yadav, B. Narkhede, P. Priyadarshinee, R. Raut, and N. Cheikhrouhou, "The role of big data for Supply Chain 4.0 in manufacturing organisations of developing countries," *J. Enterp. Inf. Manag.*, Sep. 2021, doi: 10.1108/JEIM-11-2020-0463.
- [33] S. Naumov and R. Oliva, "Refinements to Eigenvalue Elasticity Analysis: Interpretation of parameter elasticities," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 34, pp. 426–437, Aug. 2018, doi: 10.1002/sdr.1605.
- [34] L. Schoenenberger and R. Tanase, "Controlling complex policy problems: A multimethodological approach using system dynamics and network controllability," *J. Simul.*, vol. 12, Nov. 2017, doi: 10.1080/17477778.2017.1387335.