



PAPER – OPEN ACCESS

Pemodelan Kebijakan Pengurangan Emisi Karbon di Pelabuhan dengan Pendekatan Sistem Dinamis

Author : Deni Yudhistira Rizaldi, and Armand Omar Moeis
DOI : 10.32734/ee.v9i2.2792
Electronic ISSN : 2654-704X
Print ISSN : 2654-7031

Volume 9 Issue 2 – 2026 TALENTA Conference Series: Energy & Engineering (EE)



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).

Published under licence by TALENTA Publisher, Universitas Sumatera Utara



Pemodelan Kebijakan Pengurangan Emisi Karbon di Pelabuhan dengan Pendekatan Sistem Dinamis

Deni Yudhistira Rizaldi*, Armand Omar Moeis

**Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Kampus UI Salemba, Jakarta Pusat, 10430, Indonesia*

deni.yudhistira@office.ui.ac.id, armand.omar@ui.ac.id

Abstrak

Pertumbuhan perekonomian yang semakin pesat, akan mendorong peningkatan kinerja dan aktivitas di pelabuhan. Peningkatan tersebut akan menghasilkan emisi yang signifikan akibat aktivitas di Pelabuhan yang semakin intens sehingga dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan sekitar Pelabuhan. Peningkatan aktivitas di Pelabuhan pada umumnya akan berdampak positif satu sama lain terhadap pertumbuhan ekonomi, namun di saat yang sama akan berdampak negatif terhadap kualitas lingkungan dimana emisi yang dihasilkan meningkat signifikan setiap tahunnya. Oleh karena itu Pemerintah Republik Indonesia perlu melakukan intervensi melalui kebijakan pengurangan emisi dalam rangka meningkatkan pertumbuhan ekonomi dan aktivitas di Pelabuhan sekaligus meningkatkan kualitas lingkungan di Pelabuhan. Penelitian ini akan mengembangkan model kebijakan dengan menggunakan pendekatan sistem dinamis untuk memberikan rekomendasi kebijakan yang dapat mendorong penurunan emisi di Pelabuhan Tanjung Priok. Penelitian ini akan menguji alternatif kebijakan yang saat ini menjadi prioritas pengurangan emisi di Pelabuhan Tanjung Priok diantaranya yaitu *shore power* dan elektrifikasi peralatan Pelabuhan. Penelitian ini menunjukkan bahwa Kebijakan kombinasi *Shore Power* dan Elektrifikasi Peralatan Pelabuhan merupakan kebijakan pengurangan emisi karbon di pelabuhan yang terbaik dan tangguh karena menghasilkan output berupa peningkatan aktivitas di Pelabuhan dan pertumbuhan ekonomi tertinggi sekaligus menghasilkan peningkatan kualitas lingkungan berupa penurunan emisi di Pelabuhan yang tertinggi.

Kata Kunci: Emisi; Pelabuhan, Kebijakan, Pemodelan, Sistem Dinamis

Abstract

Rapid economic growth will drive improvements in port performance and activity. These improvements will also lead to a significant increase in emissions caused by the high intensity of port activity, resulting in a negative impact on the environment of the port and its surroundings. Port activity improvements generally have a positive impact on economic growth, and vice versa. However, they will also negatively impact environmental quality, as emissions produced increase significantly each year. Therefore, the Government of Indonesia needs to intervene through emission-reduction policies in ports to improve those conditions, thereby enhancing economic growth and port activity while improving the port's environmental quality. This study will develop a policy model using a system dynamics approach to provide policy recommendations to drive emission reductions at the port of Tanjung Priok. This study will analyze policy alternatives that are currently priorities for emission reduction in the port of Tanjung Priok, such as *shore power* and port equipment electrification. This study shows that a combination policy of *shore power* and port equipment electrification is the best and most robust carbon emission reduction policy in the port because it results in the highest output of port activity improvement and economic growth at the same time, resulting in improved environmental quality in terms of the highest emission reduction in the port.

Keywords: Emission; Port; Policy; Modelling; System Dynamics

1. Pendahuluan

Pelabuhan berperan penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan perdagangan global, sebagai bagian dari rantai pasok logistik global maupun nasional [1] [2]. Pertumbuhan perdagangan internasional, globalisasi, dan persaingan antar Perusahaan

menyebabkan permasalahan terkait sumber daya, lingkungan, dan sosial di Pelabuhan menjadi semakin signifikan [3]. Peningkatan arus barang dan pengembangan infrastruktur Pelabuhan menjadikan pelabuhan dan aktivitas didalamnya sebagai kontributor utama dalam penggunaan energi [4]. Menurut *International Maritime Organization* (IMO), Emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan dari penggunaan energi dari logistik maritim yaitu sebesar 1.076 juta ton atau sekitar 2,89% dari total emisi CO₂ global. Jika kondisi tersebut dibiarkan tanpa adanya intervensi, maka total emisi dari logistik maritim akan semakin meningkat signifikan di masa depan.

Seluruh proses di pelabuhan memerlukan konsumsi energi yang signifikan baik melalui konsumsi bahan bakar fosil maupun melalui konsumsi energi listrik pada kapal petikemas dan peralatan Pelabuhan. Konsumsi energi yang signifikan tersebut akan menghasilkan emisi yang dapat diatribusikan pada kapal, peralatan bongkar muat, dan truk pada proses penerimaan dan pengiriman [5]. Konsumsi energi dari setiap aktivitas di Pelabuhan menghasilkan berbagai polutan seperti nitrogen oksida (Nox), sulfur oksida (Sox), karbon monoksida (CO), *particulate matter* (PM), dan hidrokarbon (HC) [6]. Aktivitas di terminal petikemas menghasilkan berbagai emisi gas rumah kaca di Pelabuhan meliputi CO₂, Sox, Nox, CO, HC, dan partikel karbon hitam yang akan terakumulasi di atmosfer secara perlahan menimbulkan risiko kesehatan masyarakat akibat berbagai penyakit pernapasan [7].

Operator Pelabuhan dan pelayaran cenderung berupaya meningkatkan arus petikemas dengan menarik semakin banyak kapal dan petikemas untuk ditangani. Peningkatan arus petikemas dan kapal berdampak positif terhadap perekonomian, namun demikian berdampak pada peningkatan emisi di Pelabuhan akibat konsumsi energi di Pelabuhan yang semakin besar. Adapun Pemerintah menghadapi isu dampak emisi Pelabuhan terhadap kesehatan tenaga kerja baik di area Pelabuhan maupun area di sekitar Pelabuhan yang dapat mengganggu produktivitas dan aktivitas perekonomian [6]. Oleh karena itu diperlukan adanya upaya pengendalian emisi agar Pelabuhan dapat berperan dalam mendukung pertumbuhan perekonomian sekaligus mengurangi dampak lingkungan.

Strategi penurunan emisi di Pelabuhan dapat dilakukan melalui penggunaan energi (elektrifikasi dan bahan bakar alternatif), kapal (*onshore power supply* dan *just-in-time berthing*), modernisasi peralatan Pelabuhan, efisiensi energi, operasional (Digitalisasi), dan alih moda transportasi [8]. *Shore power* atau yang juga disebut sebagai *cold ironing* dan *onshore power supply* merupakan teknologi yang digunakan untuk menggantikan fungsi mesin auxiliari kapal untuk memenuhi kebutuhan listrik kapal dengan menghubungkan kapal dengan jaringan listrik darat atau sumber energi ramah lingkungan lainnya [9]. Elektrifikasi peralatan Pelabuhan bertujuan untuk mengkonversi penggunaan bahan bakar fosil menuju energi listrik sehingga lebih ramah lingkungan sekaligus mengurangi biaya operasional seperti *crane*, *container truck*, dan *forklift* dari yang sebelumnya menggunakan mesin diesel menjadi berbasis listrik [4] [10].

Penerapan strategi penurunan emisi pada logistik maritim telah berkembang menjadi isu yang dinamis dan sistematis dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan [3]. Sistem dinamik merupakan pendekatan yang dapat memberikan pemahaman terhadap struktur dan dinamika dari sistem yang kompleks menggunakan model simulasi, sehingga dapat digunakan dalam merancang kebijakan yang efektif [11]. Dibutuhkan adanya pengembangan model kebijakan menggunakan pendekatan sistem dinamis atas strategi penurunan emisi yang dapat mengurangi dampak lingkungan pada aktivitas di Pelabuhan sehingga Pelabuhan tidak menjadi faktor yang memperlambat namun dapat menjadi faktor yang mendorong pertumbuhan perekonomian.

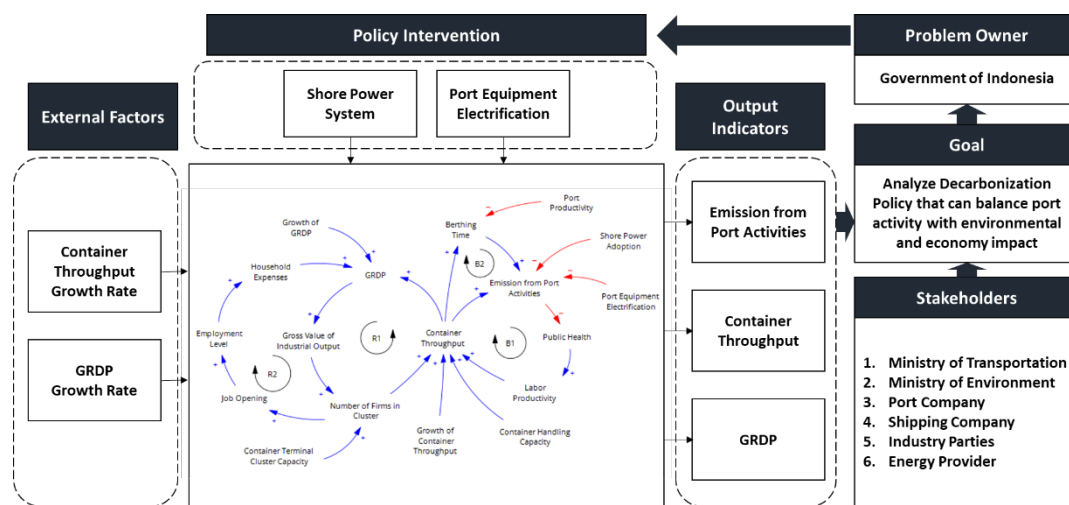
Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang telah mengembangkan model kebijakan penurunan emisi di Pelabuhan diantaranya yaitu [3] [12] [13] di China, [14] di Kanada, dan [7] [15] di Indonesia. Penelitian-penelitian tersebut berfokus pada penurunan emisi di kapal yaitu melalui penggunaan *shore power*, penggunaan *low sulfur fuel oil*, pembatasan emisi sulfur, dan penurunan kecepatan kapal. Sedangkan peralatan Pelabuhan yang juga menjadi sumber emisi di Pelabuhan belum diakomodir dalam model kebijakan yang telah dibangun sebelumnya. Penelitian ini akan mengembangkan model kebijakan pengurangan emisi di Pelabuhan baik dari sisi kapal maupun dari sisi peralatan Pelabuhan melalui penggunaan *shore power* dan elektrifikasi peralatan Pelabuhan di Pelabuhan Tanjung Priok.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi kebijakan yang dapat mendorong penerapan strategi penurunan emisi di Pelabuhan sehingga peningkatan aktivitas di Pelabuhan tidak menjadi faktor yang memperlambat, namun dapat menjadi faktor yang mendorong pertumbuhan perekonomian.

2. Metodologi Penelitian

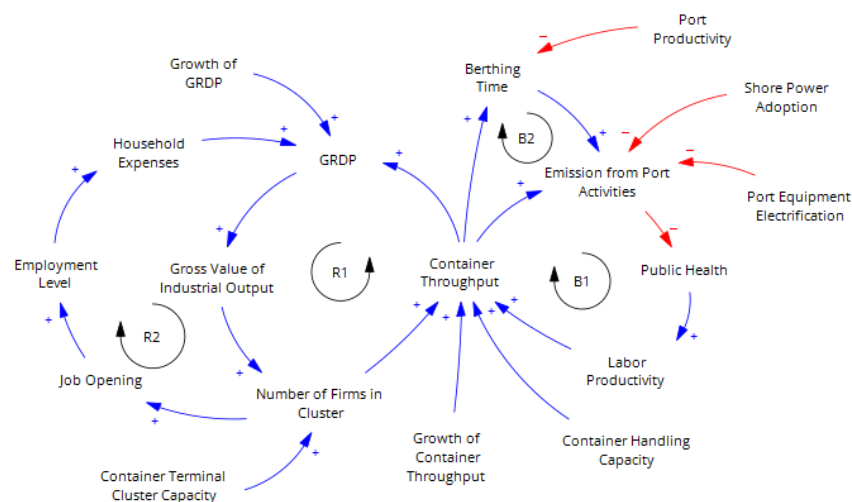
2.1. Konseptualisasi Model

Diagram sistem dapat digunakan untuk melakukan konseptualisasi atas suatu sistem kompleks yang terdiri atas faktor eksternal, sistem, indikator output, tujuan, pemangku kepentingan, pemilik masalah, intervensi kebijakan. Diagram sistem pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 1. Diagram Sistem Penelitian ini

Salah satu *tools* utama konseptualisasi model dalam pendekatan Sistem Dinamis yaitu *causal loop diagram* (CLD) yang digunakan untuk merepresentasikan hubungan sirkular, keterkaitan, dan jeda waktu antar komponen berupa *feedback loops*. *Causal loop diagram* pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada gambar berikut.

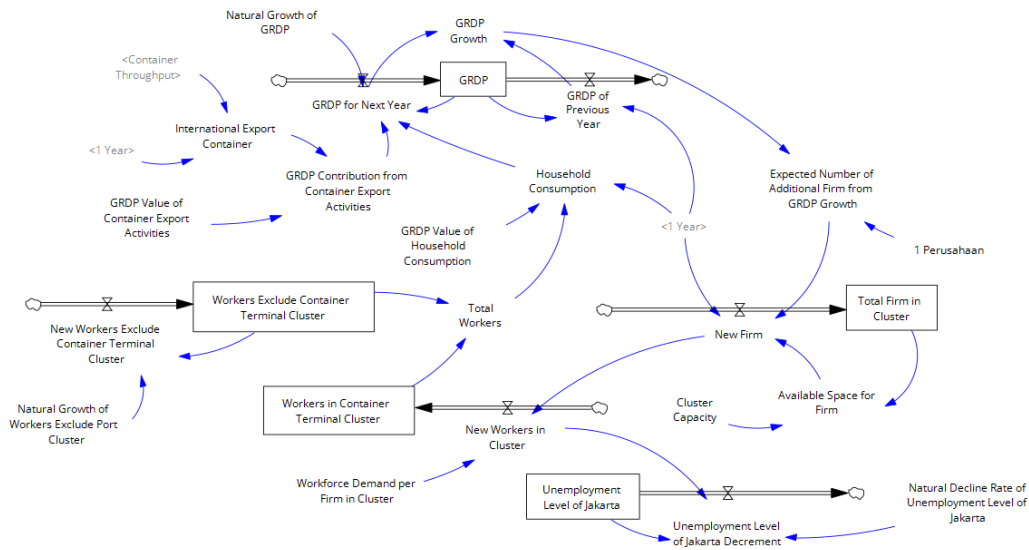


Gambar 2. Causal Loop Diagram Penelitian ini

Terdapat 4 *loop* pada *Causal loop diagram* penelitian ini yang terdiri atas 2 *balancing loop* dan 2 *reinforcing loop* sebagai berikut:

- Loop B1 mendeskripsikan bahwa peningkatan arus petikemas akan meningkatkan emisi dari aktivitas Pelabuhan yang dapat menyebabkan penurunan kesehatan masyarakat serta produktivitas tenaga kerja, sehingga dapat menurunkan arus petikemas. Loop ini menunjukkan dampak emisi dari aktivitas di Pelabuhan khususnya dari sisi Pelabuhan.
- Loop B2 mendeskripsikan bahwa peningkatan arus petikemas akan meningkatkan waktu sandar kapal dan meningkatkan emisi dari aktivitas Pelabuhan yang dapat menyebabkan penurunan kesehatan masyarakat serta produktivitas tenaga kerja, sehingga dapat menurunkan arus petikemas. Loop ini menunjukkan dampak emisi dari aktivitas di Pelabuhan khususnya dari sisi kapal.
- Loop R1 mendeskripsikan bahwa peningkatan arus petikemas akan meningkatkan GRDP yang akan meningkatkan jumlah usaha di klaster terminal petikemas, sehingga dapat meningkatkan kembali arus petikemas.
- Loop R2 mendeskripsikan bahwa peningkatan GRDP akan meningkatkan jumlah usaha di klaster terminal petikemas yang akan meningkatkan pembukaan lapangan kerja dan tingkat pekerjaan sehingga dapat meningkatkan konsumsi rumah tangga sebagai faktor yang mempengaruhi peningkatan GRDP.

Submodul ekonomi memiliki variable *GRDP* sebagai *stock* utama dengan *flow* yang dipengaruhi oleh *CO2 emission from port equipment* dan *CO2 emission from ship*. Submodul ini juga menunjukkan hubungan antara jumlah pekerja di klaster terminal petikemas dengan jumlah usaha dan konsumsi rumah tangga. Submodul ekonomi dapat ditunjukkan pada gambar berikut.

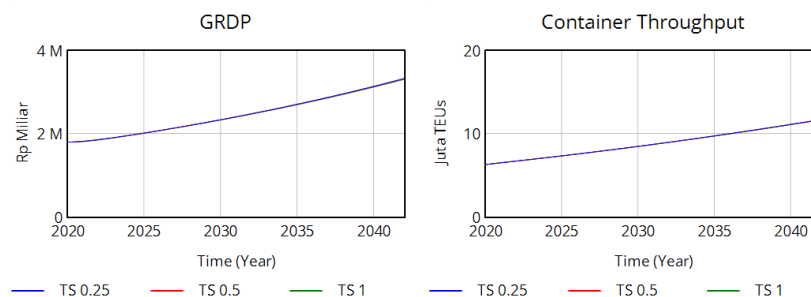


Gambar 5. Stock and Flow Diagram Submodul Ekonomi

2.3. Pengujian Model

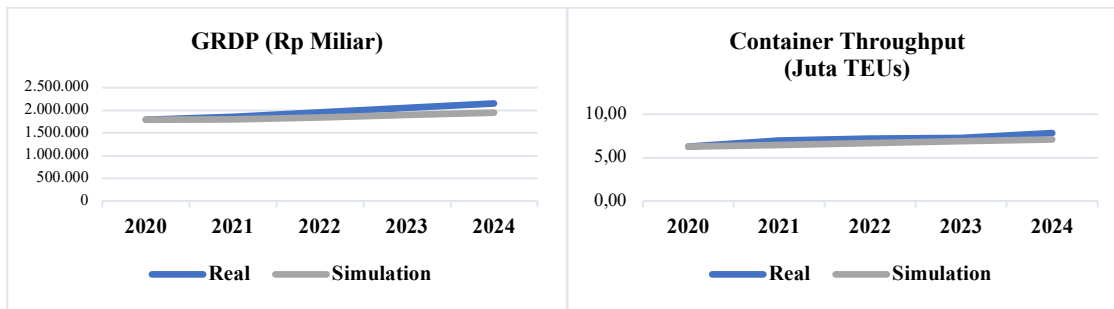
Pengujian model dilakukan melalui verifikasi dan validasi untuk mengetahui apakah model yang dibuat telah sesuai dan dapat merepresentasikan sistem pada keadaan yang sebenarnya. Pengujian model yang dilakukan meliputi *Integration Error Test*, *Behavioral Reproduction Test*, dan *Qualitative Behaviour Analysis*. Verifikasi bertujuan untuk mengetahui apakah model telah dibangun dengan benar. Adapun Validasi bertujuan untuk mengetahui apakah model yang benar telah dibangun.

Integration Error Test dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan dari perilaku sistem terhadap perubahan jangka waktu integrasi. Perubahan jangka waktu integrasi diatur melalui perubahan *time step* yaitu 1 tahun, 0,5 tahun, dan 0,25 tahun. Adapun variabel yang diuji dalam *Integration Error Test* yaitu *GRDP* dan *Container Throughput*. Berdasarkan *Integration Error Test* yang dilakukan pada kedua variabel, tidak terdapat perbedaan perilaku sistem yang signifikan dari setiap *time step*. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat error dalam proses integrasi pada model penelitian ini



Gambar 6. Integration Error Test

Behavioral Reproduction Test bertujuan untuk menguji kesesuaian model terhadap kondisi dunia nyata yang dilakukan melalui perbandingan hasil simulasi dengan data historis terkait. Adapun variabel yang diuji dalam *Behavioral Reproduction Test* yaitu *GRDP* dan *Container Throughput* dalam 5 tahun terakhir. Berdasarkan hasil *Behavioral Reproduction Test*, perbandingan hasil simulasi dengan data historis memiliki nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang relatif kecil yaitu sebesar 5,10% untuk variabel *GRDP* dan sebesar 5,71% untuk variabel *Container Throughput*. Hasil ini menunjukkan bahwa model yang dibangun dapat merepresentasikan kondisi dunia nyata yang sebenarnya.

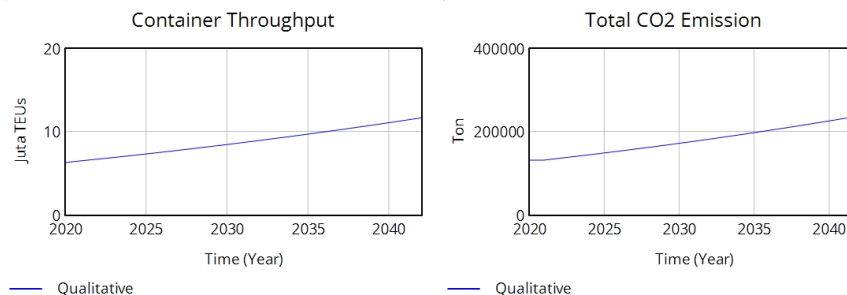


Gambar 7. Behavioral Reproduction Test

Tabel 1. Behavioral Reproduction Test

GRDP (Rp Miliar)	2020	2021	2022	2023	2024
Real	1,792,291	1,856,001	1,953,489	2,050,473	2,151,041
Simulation	1,792,290	1,804,170	1,843,460	1,893,330	1,948,090
Deviasi	0.00%	2.79%	5.63%	7.66%	9.44%
MAPE			5.10%		
Container Throughput (Juta TEUs)	2020	2021	2022	2023	2024
Real	6.27	6.94	7.17	7.29	7.83
Simulation	6.27	6.48	6.68	6.88	7.09
Deviasi	0.00%	6.59%	6.91%	5.62%	9.41%
MAPE			5.71%		

Qualitative Behaviour Analysis dilakukan untuk mengetahui apakah model memiliki perilaku yang sama dengan logika pada situasi dunia nyata yang sebenarnya. Variabel yang diuji dalam *Qualitative Behaviour Analysis* yaitu *Container Throughput* dengan *Total CO2 Emission*. Adapun ekspektasi atas kondisi tersebut yaitu Peningkatan *Container Throughput* akan berdampak pada Peningkatan *Total CO2 Emission*. Berdasarkan hasil *Qualitative Behaviour Analysis*, peningkatan pada *Container Throughput* sejalan dengan peningkatan *Total CO2 Emission*. Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki perilaku yang sama dengan logika pada situasi dunia nyata.



Gambar 8. Qualitative Behavioral Analysis

2.4. Perancangan Skenario

Ketidakpastian faktor eksternal dapat mempengaruhi perbedaan perilaku sistem dibandingkan dengan kondisi *business as usual*. Analisis skenario dapat digunakan untuk mengakomodir adanya ketidakpastian faktor eksternal sehingga dapat menggambarkan beberapa perilaku sistem yang mungkin terjadi. Dalam penelitian ini, faktor eksternal yang dapat mempengaruhi perilaku sistem yaitu peningkatan aktivitas di Pelabuhan yang direpresentasikan dengan variabel *Container Throughput Growth Rate*, dan pertumbuhan ekonomi yang direpresentasikan dengan variabel *GRDP Growth Rate*. Ketidakpastian terhadap kedua variabel tersebut secara umum dapat mempengaruhi perilaku sistem dalam hal ini yaitu subsistem operasional Pelabuhan, subsistem lingkungan, dan subsistem ekonomi. Terdapat 2 skenario yang akan diuji dalam penelitian ini yaitu skenario *economic growth* dan *economic slowdown* yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

Skenario *economic growth* merupakan kondisi dimana ekonomi tumbuh lebih cepat sehingga menghasilkan pertumbuhan yang lebih tinggi dibandingkan kondisi *business as usual*. Pada skenario ini, kondisi tersebut direpresentasikan dengan variabel *Container Throughput Growth Rate* dan *GRDP Growth Rate* yang nilainya 50% lebih tinggi dibandingkan kondisi *business as usual*. Skenario *economic slowdown* merupakan kondisi dimana ekonomi tumbuh lebih lambat sehingga menghasilkan

pertumbuhan yang lebih rendah dibandingkan kondisi *business as usual*. Pada skenario ini, kondisi tersebut direpresentasikan dengan variabel *Container Throughput Growth Rate* dan *GRDP Growth Rate* yang nilainya 50% lebih rendah dibandingkan kondisi *business as usual*. Perbandingan nilai variabel antara kondisi *business as usual* dengan skenario *economic growth* dan *economic slowdown* dapat ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2. Perbandingan Nilai Variabel pada Analisis Skenario

Variabel	<i>Business as Usual</i> (S0)	Skenario	
		<i>Economic Growth</i> (S1)	<i>Economic Slowdown</i> (S2)
<i>GRDP Growth Rate</i>	5.21%	8.00%	3.00%
<i>Container Throughput Growth Rate</i>	3.19%	5.00%	2.00%

2.5. Pengembangan Kebijakan

Penelitian ini akan menguji alternatif kebijakan dalam rangka pengurangan emisi di Pelabuhan diantaranya yaitu *shore power* dan elektrifikasi peralatan Pelabuhan. Kedua alternatif kebijakan tersebut menyasar pengurangan emisi pada sumber utama konsumsi di Pelabuhan yaitu kapal dan peralatan Pelabuhan.

Shore power sudah diimplementasikan di 2 terminal petikemas Pelabuhan Tanjung Priok, namun dengan tingkat penggunaan oleh kapal yang masih rendah yaitu sebesar 2%. Penelitian ini akan menguji alternatif kebijakan Peningkatan Penggunaan *Shore Power* secara bertahap dengan menyasar peningkatan penggunaan khususnya pada kapal-kapal internasional dengan proporsi sekitar 50% dari seluruh kapal. Elektrifikasi peralatan di Pelabuhan Tanjung Priok saat ini sebesar 38.60% untuk *quay equipment* dan 18.37% untuk *yard equipment*. Penelitian ini akan menguji alternatif kebijakan Peningkatan Elektrifikasi Peralatan Pelabuhan secara bertahap hingga mencapai 100% sesuai dengan target elektrifikasi di Pelabuhan Tanjung Priok.

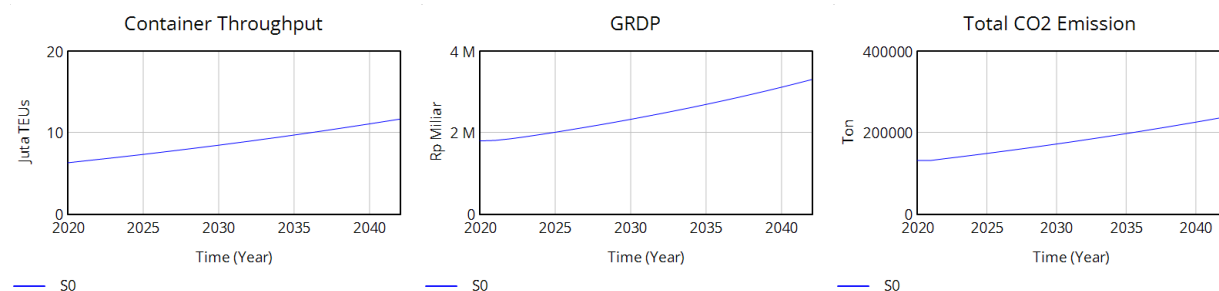
Tabel 3. Perbandingan Nilai Variabel pada Alternatif Kebijakan

Alternatif Kebijakan	Periode Waktu	Variabel		
		<i>SP Adoption Rate</i>	<i>Quay Equipment Electrification</i>	<i>Yard Equipment Electrification</i>
<i>Business as Usual</i>	<i>Constant</i>	2.00%	38.60%	18.37%
<i>Shore Power</i>	<i>Short Term</i>	15%	38.60%	18.37%
	<i>Medium Term</i>	30%	38.60%	18.37%
	<i>Long Term</i>	50%	38.60%	18.37%
	<i>Short Term</i>	2.00%	50%	50%
Elektrifikasi Peralatan Pelabuhan	<i>Medium Term</i>	2.00%	75%	75%
	<i>Long Term</i>	2.00%	100%	100%
	<i>Medium Term</i>	2.00%	38.60%	18.37%
	<i>Long Term</i>	2.00%	38.60%	18.37%

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Kondisi Business as Usual

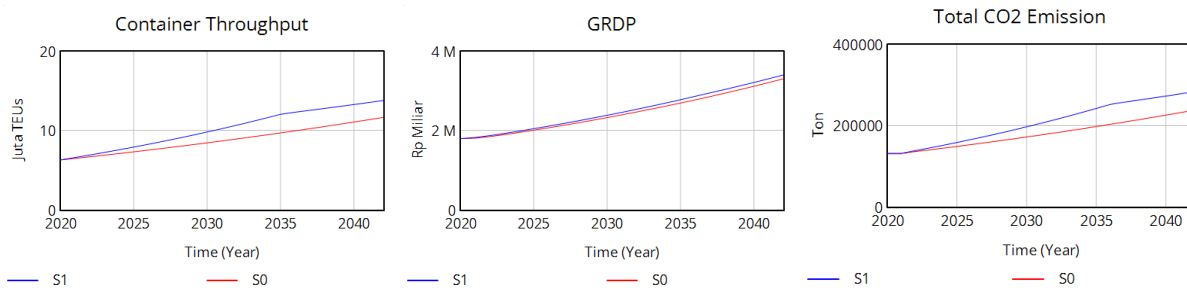
Hasil simulasi *container throughput*, *GRDP*, dan *Total CO2 Emission* pada kondisi *business as usual* (S0) dapat ditunjukkan pada gambar berikut.

Gambar 9. Hasil Simulasi Kondisi *Business as Usual*

Hasil simulasi pada kondisi *business as usual* menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas di Pelabuhan (direpresentasikan dengan *container throughput*) berkorelasi positif dengan pertumbuhan ekonomi (direpresentasikan dengan GRDP), namun demikian peningkatan tersebut berdampak terhadap penurunan kualitas lingkungan dalam hal ini yaitu peningkatan *Total CO2 Emission*.

3.2. Analisis Skenario

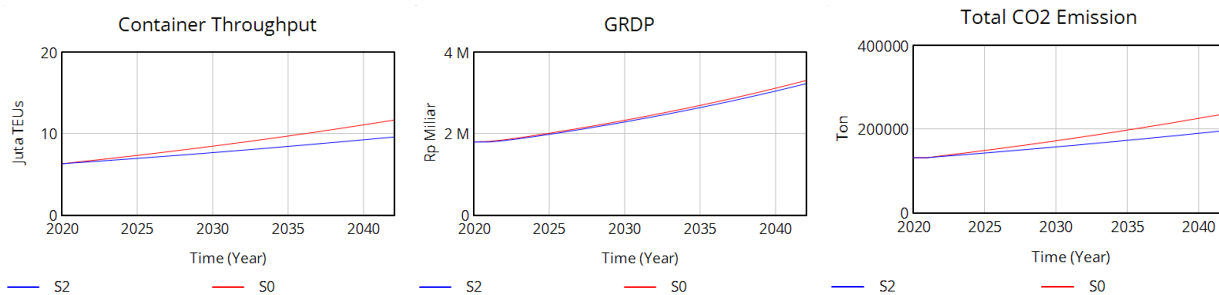
Hasil simulasi *container throughput*, GRDP, dan *Total CO2 Emission* pada skenario *economic growth* (S1) dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 10. Hasil Simulasi Skenario *Economic Growth*

Berdasarkan simulasi pada skenario *economic growth* (S1), pertumbuhan ekonomi yang lebih cepat dalam hal ini yaitu *Container Throughput Growth Rate* dan *GRDP Growth Rate* yang lebih tinggi, mampu menghasilkan *Container throughput* dan GRDP dengan nilai dan peningkatan yang lebih tinggi. Namun demikian, skenario tersebut juga menghasilkan *Total CO2 Emission* dengan nilai dan peningkatan yang lebih tinggi. Adapun dampak peningkatan *Total CO2 Emission* lebih besar dibandingkan peningkatan *Container throughput* dan GRDP. Sehingga pertumbuhan ekonomi yang lebih cepat mampu menghasilkan peningkatan pada aktivitas di Pelabuhan dan perekonomian, namun memiliki dampak penurunan kualitas lingkungan yang lebih besar.

Hasil simulasi *container throughput*, GRDP, dan *Total CO2 Emission* pada skenario *economic slowdown* (S2) dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



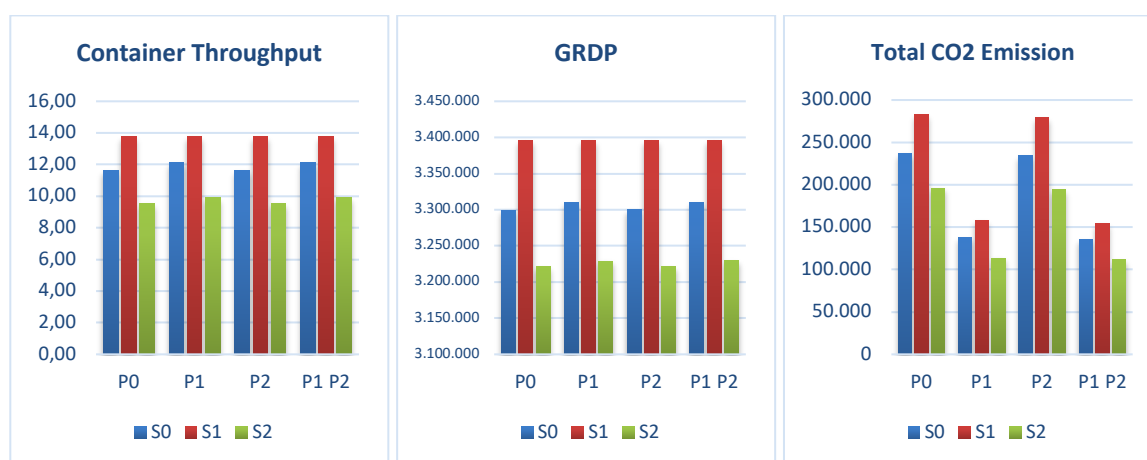
Gambar 11. Hasil Simulasi Skenario *Economic Slowdown*

Berdasarkan simulasi pada skenario *economic slowdown* (S2), pertumbuhan ekonomi yang lebih lambat dalam hal ini yaitu *Container Throughput Growth Rate* dan *GRDP Growth Rate* yang lebih rendah mampu menghasilkan *Container throughput* dan GRDP dengan nilai dan peningkatan yang lebih rendah. Namun demikian, skenario tersebut juga menghasilkan *Total CO2 Emission* dengan nilai dan peningkatan yang lebih rendah. Adapun dampak penurunan *Container throughput* dan GRDP lebih besar dibandingkan peningkatan *Total CO2 Emission*. Sehingga pertumbuhan ekonomi yang lebih lambat mampu menghasilkan peningkatan kualitas lingkungan, namun memiliki dampak penurunan pada aktivitas di Pelabuhan dan perekonomian yang lebih besar.

3.3. Analisis Kebijakan

Berdasarkan pengembangan alternatif kebijakan yang telah disusun, kebijakan tersebut diuji pada model untuk mengetahui perilaku sistem ketika terdapat intervensi terhadap sistem. Alternatif kebijakan yang akan diuji meliputi kebijakan *shore power* (P1), elektrifikasi peralatan Pelabuhan (P2), serta kombinasi diantara kebijakan-kebijakan tersebut. Dalam menentukan alternatif kebijakan terbaik, diperlukan kebijakan yang tangguh dalam menghadapi adanya ketidakpastian. Pada bagian ini, penentuan alternatif kebijakan terbaik dilakukan berdasarkan hasil simulasi skenario dan kebijakan.

Hasil simulasi *container throughput*, GRDP, dan *total CO2 emission* pada seluruh skenario dan alternatif kebijakan dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 12. Hasil Simulasi Seluruh Skenario & Kebijakan

Berdasarkan analisis hasil simulasi pada setiap skenario dan alternatif kebijakan, kebijakan kombinasi *Shore Power* (P1) dan Elektrifikasi Peralatan Pelabuhan (P2) merupakan kebijakan yang terbaik dan tangguh karena mampu menghasilkan *output* tertinggi pada setiap aspek (aktivitas Pelabuhan, ekonomi, dan lingkungan) dan setiap skenario. Adapun jika mengabaikan kombinasi dari setiap kebijakan, kebijakan *Shore Power* (P1) dapat menjadi prioritas utama karena menghasilkan *output* yang lebih baik dibandingkan kebijakan Elektrifikasi Peralatan Pelabuhan (P3).

4. Kesimpulan

Peningkatan aktivitas di Pelabuhan berkorelasi positif dengan pertumbuhan ekonomi, namun demikian berdampak terhadap penurunan kualitas lingkungan. Ketika kondisi ekonomi tumbuh lebih cepat, mampu menghasilkan peningkatan pada aktivitas di Pelabuhan dan perekonomian, namun memiliki dampak penurunan kualitas lingkungan yang lebih besar. Sementara ketika kondisi ekonomi tumbuh lebih lambat, mampu menghasilkan peningkatan kualitas lingkungan, namun memiliki dampak penurunan pada aktivitas di Pelabuhan dan perekonomian yang lebih besar.

Emisi dari aktivitas di Pelabuhan dihasilkan dari 2 sumber utama yaitu pada sisi Pelabuhan dan pada sisi kapal melalui konsumsi energi yang signifikan baik melalui konsumsi bahan bakar fosil maupun melalui konsumsi energi listrik. Diperlukan adanya kebijakan pengendalian emisi di Pelabuhan sehingga aktivitas di Pelabuhan tidak berdampak pada penurunan kualitas lingkungan.

Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi di Pelabuhan pada intinya dapat dilakukan melalui 2 hal yaitu efisiensi energi dan konversi energi. Penelitian ini menguji dua strategi pengurangan emisi yang saat ini menjadi prioritas di Pelabuhan Tanjung Priok yaitu *shore power* dan elektrifikasi peralatan Pelabuhan yang termasuk konversi energi.

Kebijakan kombinasi *Shore Power* dan Elektrifikasi Peralatan Pelabuhan merupakan kebijakan pengurangan emisi karbon di pelabuhan yang terbaik dan tangguh karena menghasilkan *output* berupa peningkatan aktivitas di Pelabuhan dan pertumbuhan ekonomi tertinggi sekaligus menghasilkan peningkatan kualitas lingkungan tertinggi. Kebijakan yang dapat menjadi prioritas untuk diimplementasikan yaitu kebijakan *Shore Power* karena menghasilkan *output* yang lebih baik dibandingkan kebijakan Elektrifikasi Peralatan Pelabuhan.

Penelitian ini hanya mempertimbangkan kapal dan terminal petikemas dalam pemodelan kebijakan pengurangan emisi di Pelabuhan. Penelitian di masa yang akan datang dapat mempertimbangkan jenis kapal lain yang beraktivitas di Pelabuhan, serta mempertimbangkan kebutuhan investasi dan aspek keuangan dari sisi operator pelabuhan & pelayaran yang akan mempengaruhi tingkat penerapan dan efektivitas kebijakan pengurangan emisi di Pelabuhan.

Referensi

- [1] Z. Wan *et al.*, "Evaluation of emission reduction strategies for berthing containerships: A case study of the Shekou Container Terminal," *J. Clean. Prod.*, vol. 299, May 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126820.
- [2] A. Cristea, D. Hummels, L. Puzzello, and M. Avetisyan, "Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport," *J. Environ. Econ. Manage.*, vol. 65, no. 1, pp. 153–173, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.jeem.2012.06.002.
- [3] Y. Kong, J. Liu, and J. Chen, "Exploring the carbon abatement measures in maritime supply chain: a scenario-based system dynamics approach," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, no. 18, pp. 6131–6152, 2023, doi: 10.1080/00207543.2022.2088427.

- [4] O. Okşaş, "Carbon emission strategies for container handling equipment using the activity-based method: A case study of Ambarlı container port in Türkiye," *Mar. Policy*, vol. 149, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.marpol.2023.105480.
- [5] J. Sim, "A carbon emission evaluation model for a container terminal," *J. Clean. Prod.*, vol. 186, pp. 526–533, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.170.
- [6] P. N. Nguyen, S. H. Woo, and H. Kim, "Ship emissions in hotelling phase and loading/unloading in Southeast Asia ports," *Transp. Res. D Transp. Environ.*, vol. 105, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103223.
- [7] A. O. Moeis, C. P. Salim, A. D. Setiawan, and A. R. Destyanto, "Developing a decarbonization policy model of container terminal clusters," *Journal of International Logistics and Trade*, vol. 23, no. 1, pp. 38–55, 2025, doi: 10.1108/JILT-10-2024-0077.
- [8] A. S. Alamoush, F. Ballini, and A. I. Ölçer, "Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review," Nov. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111508.
- [9] M. A. Budiyanto, M. A. Gibran, and T. Shinoda, "Carbon reduction and social cost–benefit analysis of shore-side electricity application in sustainable green port development," *Management of Environmental Quality*, 2025, doi: 10.1108/MEQ-01-2025-0034.
- [10] N. Kristoro, A. Fadli Assomadi, I. Teknologi, and S. N. Surabaya, "Impact Analysis Study of Port Main Equipment Electrification Efforts on Emission Reduction at the Port: Case Study of Tanjung Priok Port," *The Journal of Academic Science*, vol. 1, 2024, [Online]. Available: <https://thejoas.com/index.php/>
- [11] John. Sterman, *Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill, 2000.
- [12] Y. Gu and X. Yu, "A life cycle cost analysis of different shore power incentive policies on both shore and ship sides based on system dynamics and a Chinese port case," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 20, pp. 29563–29583, Apr. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-33009-2.
- [13] Y. Li, X. Zhang, K. Lin, and Q. Huang, "The analysis of a simulation of a Port-city green cooperative development, based on system dynamics: A case study of Shanghai Port, China," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 21, Nov. 2019, doi: 10.3390/su11215948.
- [14] H. Peng, J. Hao, L. Lyu, S. Wan, X. Tian, and C. An, "Shore power mitigates the prevailing carbon leakage driven by maritime market-based measures: A dynamic system interpretation," *J. Clean. Prod.*, vol. 499, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145243.
- [15] A. O. Moeis, F. Desriani, A. R. Destyanto, T. Y. Zagloel, A. Hidayatno, and A. Sutrisno, "Sustainability assessment of the tanjung priok port cluster," *International Journal of Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 353–363, 2020, doi: 10.14716/ijtech.v11i2.3894.