

Penanganan emisi karbon di Kota Cilegon menggunakan pendekatan sistem dinamis

Handling carbon emissions in cilegon city uses a dynamic system approach

Aryo Suryandaru*, Aldien Tsabit Hidayat, Muhammad Imam Apriadi, Sahrupi

* Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Serang Raya Jl. Raya Cilegon No.Km. 5, Taman, Drangong, Kec. Taktakan, Kota Serang, Banten 42162, Indonesia

* Email: suryandaruayo@gmail.com

INFORMASI ARTIKEL

- Histori Artikel
- Artikel dikirim 16/01/2024
 - Artikel diperbaiki 10/05/2024
 - Artikel diterima 24/05/2024

ABSTRAK

Gas CO₂ menyumbang 94% emisi gas rumah kaca, yang berasal dari 56,6 persen dari bahan bakar fosil, 17,3 persen dari deforestasi, dan 20,1 persen dari sumber lain. Pertumbuhan industri yang pesat di Kota Cilegon berkontribusi terhadap peningkatan jumlah kendaraan bermotor, yang menjadi sumber emisi CO₂. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya emisi CO₂ dan hubungan sebab akibat dengan menggunakan *causal loop diagram* dan mengusulkan solusi alternatif untuk mengatasi masalah emisi CO₂ di Kota Cilegon. Metode sistem dinamik dimulai dengan identifikasi masalah. Kemudian, variabel-variabel penting dalam model diidentifikasi dan dimodelkan menggunakan *causal loop diagram* (CLD). Hasil penelitian penanganan emisi karbon di Kota Cilegon menggunakan pendekatan sistem dinamis diperoleh 12 variabel yaitu emisi kendaraan, kendaraan listrik, transportasi umum, industri, ruang terbuka hijau (RTH) Kota, reforestasi, pembakaran sampah, daur ulang, bahan bakar jumputan padat, bank sampah dan pertanian dan pada *causal loop diagram* didapatkan 3 *loop balancing* yang didapat dari RTH Kota, pembakaran sampah yang dapat dikurangi dengan mendaur ulang, bahan bakar jumputan padat dan bank sampah lalu pertanian serta transportasi. Serta 1 *reinforcing* yang mempunyai *feedback* positif didapat dari reforestasi.

Kata Kunci: Emisi karbon; Gas CO₂; *causal loop diagram* (CLD); sistem dinamis

ABSTRACT

94% of greenhouse gas emissions are attributed to CO₂ gas; the remaining 56.6% are derived from fossil fuels, 17.3% from deforestation, and 20.1% from other sources. Cilegon City's quick industrial development is causing more cars to be driven, which adds to the city's CO₂ emissions. With the use of a *causal loop diagram*, this study seeks to quantify CO₂ emissions, establish cause-and-effect linkages, and provide alternate approaches to the problem of CO₂ emissions in Cilegon City. Problem identification is the first step in the System Dynamics technique. Next, a *Causal Loop Diagram* (CLD) is used to identify and model the key variables in the model. Using a dynamic system approach, the research on managing carbon emissions in Cilegon City yielded 12 variables, including vehicle emissions, electric vehicles, industry, public transportation, reforestation, waste incineration, recycling, solid waste fuel, waste banks, agriculture, and transportation. Three *balancing loops*—waste incineration, which can be decreased by recycling, solid waste fuel and waste banks, as well as agriculture and transportation—were taken from the RTH City

and included in the causal loop diagram. Additionally, reforestation produced one positive feedback reinforcing loop.

Keywords: Carbon emissions ; CO₂ gas; causal loop diagram (CLD); dynamic system

1. PENDAHULUAN

Menurut perkiraan dari komisi eropa, emisi gas rumah tangga Indonesia diperkirakan akan mencapai 1,24 gigaton setara karbon dioksida (Gt CO₂) pada tahun 2022, atau sekitar 2,3% dari total emisi global [1]. Emisi karbon adalah pelepasan karbon dioksida (CO₂) dari kegiatan manusia seperti panen produk hutan, industri, transportasi, dan deforestasi ke atmosfer [2]. Emisi karbon menyebabkan emisi gas rumah kaca, mempengaruhi suhu tanah dan perubahan iklim. Proses ini, baik pada manusia maupun lingkungan, merupakan kekhawatiran yang signifikan bagi kesehatan manusia dan lingkungan [3].

Gas CO₂ menyumbang 94% emisi gas rumah kaca, yang berasal dari 56,6 persen dari bahan bakar fosil, 17,3% dari deforestasi, dan 20,1% dari sumber lain [4]. Dikenal sebagai kota industri, Kota Cilegon memiliki penghasil baja terbesar di Indonesia, PT. Krakatau Steel Tbk, dan hampir 80% industri kimia nasional [5]. Pertumbuhan industri yang pesat di Kota Cilegon juga berkontribusi terhadap peningkatan jumlah kendaraan bermotor, yang juga menjadi sumber emisi CO₂. Di Indonesia, ambang batas CO₂ untuk udara bersih adalah 310–330 ppm, dan ambang batas CO₂ untuk udara tercemar adalah 350–700 ppm [6].

Mengubah hutan, lahan pertanian, dan ruang terbuka hijau lainnya menjadi lahan yang dibangun dengan struktur perkerasan dan bangunan adalah proses pertumbuhan fisik kota. Berbagai masalah dapat muncul ketika daya dukung lingkungan dan kebutuhan penduduk tidak seimbang [7]. Beberapa efek negatif yang mudah ditemukan di kota termasuk polusi udara, air, dan tanah [8]. Namun demikian, data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan menunjukkan bahwa emisi CO₂ di Kota Cilegon terus meningkat dengan jumlah emisi mencapai 114,494 Gg CO₂ pada tahun 2022. Peningkatan ini pasti akan menyebabkan pemanasan global dan memperburuk kondisi lingkungan Kota Cilegon [9]. Keberlanjutan lingkungan sangat penting bagi semua orang karena merupakan komponen pembangunan berkelanjutan, khususnya dalam mengurangi emisi CO₂ [10].

Hasil penelitian sebelumnya memungkinkan pembuatan model sistem dinamis untuk mempertimbangkan kebijakan terbaik untuk mengurangi emisi karbon dioksida. Proses ini mencakup mengenali dan mendefinisikan masalah, mengembangkan sistem, pembuatan model, simulasi model, verifikasi dan validasi model analisis kebijakan, dan implementasi kebijakan. Cara terbaik untuk mencapai hasil adalah dengan membayar pajak per emisi karbon pada sumber yang menghasilkan dengan efektivitas 20% [3].

Metode sistem dinamik dimulai dengan identifikasi masalah. Kemudian, variabel-variabel penting dalam model diidentifikasi dan dimodelkan menggunakan *causal loop diagram* (CLD) [11]. Observasi karbon dioksida di Kota Cilegon bertujuan untuk mengidentifikasi CO₂ sumber dan mengukur tingkat emisi, dan membantu merencanakan langkah pengendalian emisi yang efektif.

Metode observasi yang digunakan melibatkan wawancara dengan pihak terkait, seperti dengan dinas lingkungan hidup Kota Cilegon. Dengan mengajukan beberapa pertanyaan mengenai informasi jumlah rata-rata CO₂, sektor penyumbang terbesar emisi CO₂ di Kota Cilegon

Dengan melakukan wawancara ini dapat memberikan informasi mengenai data-data yang diperlukan seperti mengetahui jumlah rata-rata CO₂ yang ada di Kota Cilegon, Dengan mengetahui data-data yang berasal dari dinas lingkungan hidup Kota Cilegon seperti pada salah satu sektor di Kota Cilegon yaitu jalan akses PT. Pelindo. Data tentang emisi karbon di Kota Cilegon, termasuk emisi dari bangunan dan pabrik, dapat membantu mengidentifikasi solusi yang efektif untuk mengurangi emisi CO₂ dan melindungi lingkungan dan membantu menciptakan kota yang lebih bersih, sehat, dan ramah lingkungan bagi penduduknya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya emisi CO₂ dan hubungan sebab akibat dengan menggunakan *causal loop diagram* dan mengusulkan solusi alternatif untuk mengatasi masalah emisi CO₂ di Kota Cilegon.

2. METODE

Gambar 2 peneliti mengumpulkan data, proses pengolahan data dilakukan untuk mengetahui lebih lanjut tentang data penelitian. Metode yang digunakan yaitu melalui pendekatan sistem dinamis dengan *tools* menggunakan *causal loop diagram*.

Metode dinamika sistem, juga dikenal sebagai "*system dynamics*", adalah teknik pemodelan yang sangat berkaitan dengan dinamika beberapa tendensi dalam berbagai sistem yang kompleks, seperti pola tingkah laku yang dihasilkan oleh sistem seiring berjalannya waktu [13]. Model memiliki hubungan kausalitas dan didasarkan pada situasi di dunia nyata yang disederhanakan, seperti objek, situasi, atau proses dalam sistem yang kompleks [14].

Hubungan sebab akibat antara sejumlah elemen yang berjalan di dalam sistem ditunjukkan oleh *causal loop diagram* (CLD). *Causal loop diagram* (CLD) terdiri dari panah (*link*) dan variabel faktor kondisi, situasi, tindakan, atau keputusan yang dapat dipengaruhi dan dipengaruhi oleh variabel lain disebut variabel. Variabel dapat kualitatif atau kuantitatif [15].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelepasan karbon ke atmosfer dikenal sebagai emisi karbon. Emisi gas rumah kaca adalah penyebab utama perubahan iklim. beberapa faktor emisi gas karbon di cilegon yaitu industri, pertanian, RTH Kota dan pembakaran sampah salah satu penyumbang terbesar emisi karbon yaitu emisi kendaraan. Data berikut dikumpulkan dari dinas lingkungan hidup Kota Cilegon (DLH).

Tabel 1. Udara ambien CO₂ Kota Cilegon

Tempat	Hasil	Satuan	Tahun
Simpang 4 PCI	606	ppm	2022
Simpang 3 Cilegon	706	ppm	2022
Ciwandan	592	ppm	2022
Akses Tol Cilegon Barat	700	ppm	2022

Data dari dinas lingkungan hidup Kota Cilegon pada tahun 2022 menunjukkan konsentrasi 500 ppm hingga 700 ppm. **Tabel 1** merupakan daerah yang memiliki tingkat emisi udara ambien yang cukup tinggi. Yang Pertama, merupakan daerah Simpang 4 PCI menghasilkan tingkat emisi ambien sebesar 606 ppm pada tahun 2022. Daerah simpang 4 PCI sendiri merupakan akses jalan umum untuk kendaraan besar maupun kecil. Yang kedua, merupakan daerah simpang 3 cilegon menghasilkan tingkat emisi udara ambien sebesar 706 ppm pada tahun 2022. Daerah simpang 3 cilegon merupakan akses jalan utama yang ada di Kota Cilegon dan merupakan pusat Kota Cilegon. Yang ketiga, merupakan daerah kecamatan Ciwandan memiliki tingkat emisi udara ambien 592 ppm pada tahun 2022. Daerah kecamatan Ciwandan sendiri dipenuhi oleh populasi penduduk dan berdekatan dengan sektor industri yang ada di Kota Cilegon. Yang keempat, merupakan daerah akses tol cilegon barat yang menghasilkan emisi udara ambien sebesar 700 ppm pada tahun 2022. Akses tol cilegon barat adalah akses jalan untuk sektor industri dan merupakan akses jalan utama untuk kendaraan umum.

Analisis *causal loop diagram* (CLD)

Langkah dalam memodelkan *causal loop diagram* yang melibatkan proses.

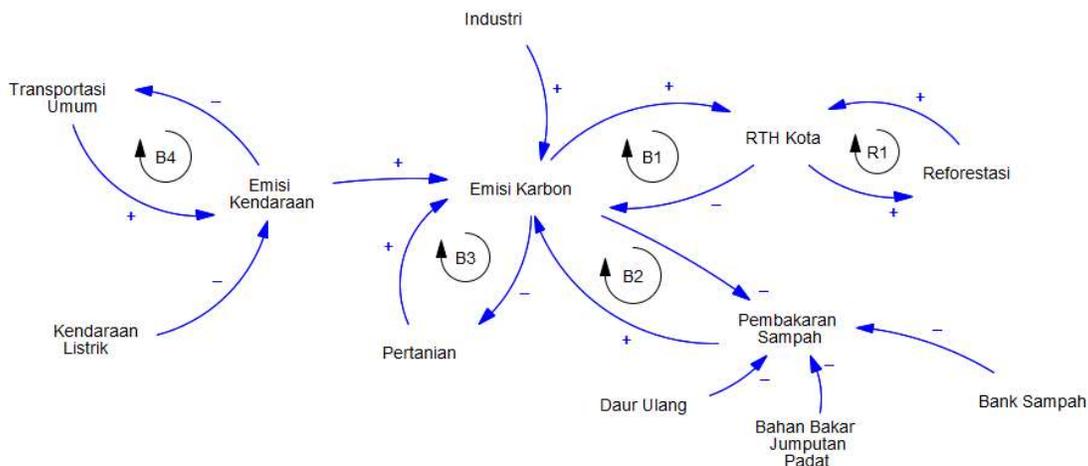
a. Identifikasi variabel *causal loop diagram* (CLD)

Berdasarkan data informasi yang telah didapatkan dari berbagai sumber dapat disimpulkan adanya 5 variabel yang berpengaruh terhadap penyumbang emisi gas karbon CO₂ adapun variabel tersebut antara lain:

- 1) Industri
- 2) Emisi kendaraan
- 3) Pembakaran sampah

- 4) Pertanian
 - 5) Transportasi umum
- b. Hubungan antar variabel

Berdasarkan hasil identifikasi variabel CLD yang dilakukan, maka dapat dikatakan bahwa variabel di atas merupakan variabel bebas yang diamati penulis sebagai penyumbang emisi gas CO₂ di Kota Cilegon. Industri dapat menjadi sumber polusi udara melalui cerobong asap dan emisi gas buang dari proses produksi. Emisi kendaraan bermotor, terutama dari pembakaran bahan bakar fosil, dapat mencemari udara. Pertanian juga dapat berkontribusi terhadap polusi udara melalui penggunaan pestisida dan pupuk kimia yang dapat menghasilkan emisi gas beracun. Pembakaran sampah, terutama jika dilakukan secara tidak terkontrol, dapat menghasilkan emisi gas berbahaya seperti gas metana dan karbon dioksida. Variabel yang diamati ini akan dihubungkan dengan variabel tetap berupa metode pengurangan emisi CO₂ dengan perlakuan yang berbeda di setiap sumbernya. Metode ini dilakukan karena pada setiap penyumbang emisi CO₂ berasal dari bahan bakar yang berbeda. Berdasarkan variabel-variabel tersebut dapat diterangkan satu elemen penguatan (*reinforcing*) dan satu elemen penyeimbang (*balancing*). Struktur dasarnya dapat diamati pada Gambar 3.



Gambar 3. Causal loop diagram emisi gas karbon Kota Cilegon

Berdasarkan Gambar 3 dapat diketahui bahwa adanya beberapa faktor yang mempengaruhi:

- 1) Industri: Terdapat banyak industri yang ada di Kota Cilegon tepatnya yang berada di Kawasan Ciwandan. Salah satu industri kimia nasional berada di lokasi ini. Penanganan emisi CO₂ di industri salah satunya dapat dilakukan dengan metode CCS (*carbon capture system*), yang dilakukan dengan cara menangkap emisi gas CO₂ yang keluar dari cerobong pembuangan gas di industri, kemudian disimpan pada *storage* dan dapat dimanfaatkan menjadi produk kimia, salah satunya adalah soda ash yang dapat dibuat dari CO₂ melalui proses reaksi dengan NaOH.
- 2) Emisi Kendaraan: Emisi gas buang pada kendaraan motor, mobil, truk. Dapat dikurangi dengan penggunaan transportasi umum dan kendaraan listrik.
- 3) Pertanian: Hal ini dapat menambah emisi gas karbon karena pembukaan ruang dan penggunaan *tractor*. Serta dapat mengurangi emisi karbon dengan adanya tanaman perkebunan.
- 4) Pembakaran Sampah: Sampah yang dibakar menghasilkan gas CO₂. Dapat dikurangi dengan adanya bank sampah, dengan didaur ulang dengan menjadikan bahan bakar jemputan padat.
- 5) RTH Kota: Dengan adanya RTH kota dapat mengurangi emisi karbon semakin banyak pohon semakin dapat mengurangi emisi karbon.

Hasil dari *causal loop diagram* emisi gas karbon didapatkan 3 *loop balancing* yang didapat dari RTH Kota, pembakaran sampah yang dapat dikurangi dengan mendaur ulang, bahan bakar jemputan padat dan bank sampah lalu pertanian serta transportasi. Serta 1 *reinforcing* yang mempunyai *feedback* positif didapat dari *reforestasi*.

4. SIMPULAN

Emisi CO₂ di beberapa kawasan yang ada di Kota Cilegon antara lain simpang 4 PCI 606 ppm, Ciwandan 592 ppm, simpang tiga cilegon 706 ppm dan akses tol cilegon barat 700 ppm dengan baku mutu 310–330 ppm untuk udara bersih. Dengan hal ini dapat disimpulkan bahwa kondisi udara yang ada pada beberapa kawasan di Kota Cilegon itu sudah tercemar, hasil penelitian penanganan emisi karbon di Kota Cilegon menggunakan pendekatan sistem dinamis diperoleh 12 variabel yaitu emisi kendaraan, kendaraan listrik, transportasi umum, industri, ruang terbuka hijau (RTH) kota, reforestasi, pembakaran sampah, daur ulang, bahan bakar jumpunan padat, bank sampah dan pertanian dan pada *causal loop diagram* didapatkan 3 *loop balancing* yang didapat dari RTH Kota, pembakaran sampah yang dapat dikurangi dengan mendaur ulang, bahan bakar jumpunan padat dan bank sampah lalu pertanian serta transportasi. Serta 1 *reinforcing* yang mempunyai *feedback* positif didapat dari reforestasi.

REFERENSI

- [1] R. Martin *et al.*, *Ghg Emissions of All World Countries Jrc Science for Policy Report*. 2023. doi: 10.2760/235266.
- [2] A. Nastiti and P. Hardiningsih, “Determinan Pengungkapan Emisi Karbon Perusahaan Manufaktur,” *J. Ilm. Akunt. dan Keuang.*, vol. 4, no. 6, pp. 2668–2681, 2022.
- [3] R. Akbar, M. Amin, and D. S. Donoriyanto, “Analisis Perancangan Model Kebijakan Dalam Mengurangi Emisi Karbon Sektor Energi Di Indonesia Dengan Pendekatan Sistem Dinamis,” *Student Scintific Creat. J.*, vol. 1, no. 3, pp. 120–130, 2023.
- [4] I. Mawardi, W. S. Winanti, T. W. Sudinda, and A. Alimin, “Analisis Capaian Nol Bersih Emisi Karbon Sebagai Acuan Indonesia Dalam Pemenuhan Komitmen Mitigasi Perubahan Iklim,” *J. sains dan Teknol. mitigasi bencana*, vol. 16, no. 2, pp. 1–22, 2022.
- [5] M. Azhari, Y. Hanani D, and Nurjazuli, “Hubungan Kadar Pencemaran SO₂ Dan NO₂ Dengan Incidence Rate ISPA Pada Balita Di Kota Cilegon Tahun 2018-2020,” *J. Keselam. Kesehat. Kerja dan Lingkung.*, vol. 3, no. 1, pp. 22–29, 2022, doi: 10.25077/jk3l.3.1.22-29.2022.
- [6] D. Harista. and L. Jurusan, Teknik, “dihasilkan dari kegiatan penerbangan maupun kegiatan ground handling dan kegiatan main power station di Bandara Halim Perdanakusuma pada tahun 2014-2018. Lewat karya ilmiah ini, dapat mengetahui aktivitas pencemaran emisi atau GRK terhadap lingkungan di B,” pp. 2014–2017, 2020.
- [7] I. Hanafi and A. Fitrianto, “Skenario Kebijakan Tentang Ruang Terbuka Hijau di Kota Batu: Suatu Pendekatan Simulasi,” *Kolaborasi J. Adm. Publik*, vol. 8, no. 1, pp. 1–17, 2022, [Online]. Available: <https://journal.unismuh.ac.id/index.php/kolaborasi/article/view/6998>
- [8] H. M. Caesarina and D. R. Rahmani, “Penyediaan Ruang Terbuka Hijau dengan Pendekatan Kota Hijau pada Perkotaan Martapura,” *J. Planoeearth*, vol. 4, no. 1, p. 11, 2019, doi: 10.31764/jpe.v4i1.712.
- [9] “Grafik Emisi,” Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: https://signsmart.menlhk.go.id/v2.1/app/chart/emisi_energy_p
- [10] Cakrawati Sudjoko, “Strategi Pemanfaatan Kendaraan Listrik Berkelanjutan Sebagai Solusi Untuk Mengurangi Emisi Karbon,” *J. Paradig. J. Multidisipliner Mhs. Pascasarj. Indones.*, vol. 2, no. 2, pp. 54–68, 2021.
- [11] P. F. E. Adipraja and M. Islamiyah, “prediksi volume sampah TPAS Talangagung dengan pendekatan sistem dinamik,” *smatika J.*, vol. 6, no. 2, pp. 24–28, 2016, doi: <https://doi.org/10.32664/smatika.v6i02.44>.
- [12] badan pusat statistik Kota Cilegon, “Kota Cilegon Dalam Angka 2022,” cilegon, 2022, pp. 1–323.
- [13] A. H. Kristianto and J. P. Nadapdap, “Dinamika Sistem Ekonomi Sirkular Berbasis Masyarakat Metode Causal Loop Diagram Kota Bengkayang,” *Sebatik*, vol. 25, no. 1, pp. 59–67, 2021, doi: 10.46984/sebatik.v25i1.1279.
- [14] F. Jay W, *Some Basic Concepts in System Dynamics*. 2009.
- [15] D. Sherwood, *Causal Loop Diagrams*, no. January 2004. 2022. doi: 10.4324/9781003304050-4.