

Model *System Dynamics* untuk Pengelolaan Sampah Padat Perkotaan di Kota Pekanbaru

St. Nova Meirizha^{1*}, Agus Mulyadi², Nabila Zakia Indra³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Industri Universitas Muhammadiyah Riau
Jalan Tuanku Tambusai Ujung, Kota Pekanbaru, Riau

^{1*} novameirizha@umri.ac.id

² agusmulyadi@umri.ac.id

³ 200103042@student.umri.ac.id

System Dynamics Model for Managing Municipal Solid Waste in Kota Pekanbaru

Dikirimkan : 09, 2024. Diterima : 03, 2025. Dipublikasikan : 03, 2025.

Abstract— *Municipal Solid Waste (MSW) is still an issue in urban areas, including Pekanbaru, one of the most densely populated cities in Riau. The increase in the amount of MSW that is left has an impact on the environment and health. This study aims to provide MSW management policies by analyzing various alternative scenarios, including reduction and treatment. The method used is System Dynamics, which consists of designing a CLD (Causal Loop Diagram) model, then continuing by building an SFD (Stock and Flow Diagram) model composed of 3 alternative scenarios that have three levels each scenario. The simulation period was carried out until 2058. The simulation and model validation results showed that increasing recycling capacity and reducing the use of plastic products can significantly reduce the amount of waste entering the TPA (Final Disposal Site). The best scenario in MSW management is the combination scenario with a 30% reduction in MSW and 72.9% treatment. Waste reduction is carried out through education programs and public awareness, reducing the use of disposable materials and increasing recycling. Waste processing is carried out by constructing modern facilities such as incinerators and compost plants. Implementing this scenario can reduce the burden on landfills and maximize the use of waste as a resource. This research will contribute to developing future sustainable and environmentally friendly waste management strategies.*

Keywords— Pekanbaru; Policy; System Dynamics; Municipal Solid Waste; Simulation

Abstrak— Sampah padat perkotaan atau *Municipal Solid Waste (MSW)* masih menjadi isu di daerah perkotaan termasuk Pekanbaru sebagai salah satu kota terpadat di Provinsi Riau. Peningkatan jumlah MSW yang dibiarkan berdampak terhadap lingkungan dan kesehatan. Pengelolaan MSW saat ini berupa daur ulang melalui bank MSW dan *sanitary landfill*, namun hal tersebut belum optimal. Karena timbulan MSW terus meningkat. Peningkatan jumlah MSW yang dibiarkan berdampak terhadap lingkungan dan kesehatan. Penelitian ini bertujuan memberikan alternatif skenario kebijakan pengelolaan MSW dengan menganalisis berbagai alternatif skenario meliputi pengurangan dan pengolahan untuk Dinas Lingkungan Hidup Kota Pekanbaru. Metode yang digunakan yaitu *System Dynamics* yang terdiri dari perancangan model CLD (*Causal Loop Diagram*), kemudian dilanjutkan dengan membangun model SFD (*Stock and Flow Diagram*). Terdiri dari 3 alternatif skenario yang memiliki 3 tingkat setiap skenarionya. Periode simulasi dilakukan hingga tahun 2058. Hasil simulasi dan validasi model menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas daur ulang dan pengurangan penggunaan produk berbahan plastik dapat secara signifikan mengurangi jumlah MSW yang masuk ke TPA (Tempat Pembuangan Akhir). Skenario kombinasi dengan pengurangan MSW sebesar 30% dan pengolahan 72,9% merupakan skenario terbaik dalam pengelolaan MSW. Pengurangan MSW dilakukan melalui program edukasi dan kesadaran masyarakat, pengurangan penggunaan bahan sekali pakai, serta peningkatan daur ulang. Pengolahan MSW dilakukan melalui pembangunan fasilitas pengolahan MSW

modern, seperti insinerator dan pabrik kompos Implementasi dari skenario ini dapat mengurangi beban tempat pembuangan akhir dan memaksimalkan pemanfaatan MSW sebagai sumber daya. Penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan strategi pengelolaan MSW yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan di masa depan.

Kata kunci— Pekanbaru; Kebijakan; System Dynamics; Sampah Padat Perkotaan; Simulasi

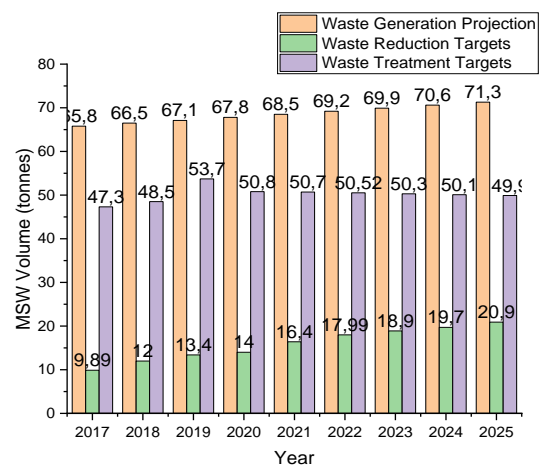
I. PENDAHULUAN

Meningkatnya jumlah sampah padat di perkotaan atau *Municipal Solid Waste* (MSW) telah menarik banyak perhatian. Jumlah MSW yang terus meningkat berkaitan dengan isu global yaitu permasalahan lingkungan, kesehatan publik, inklusi sosial dan keberlanjutan ekonomi [1], [2]. Dalam beberapa tahun terakhir, jumlah MSW di negara berkembang seperti di Asia dan Afrika telah meningkat berkali-kali lipat [3]. Pertumbuhan populasi yang tinggi mendorong peningkatan jumlah MSW [4]. Penanganan MSW yang tidak memadai dapat menimbulkan dampak, baik dalam skala lokal, regional, maupun global, seperti meningkatnya suhu global [5], pencemaran lingkungan dan kesehatan masyarakat [6].

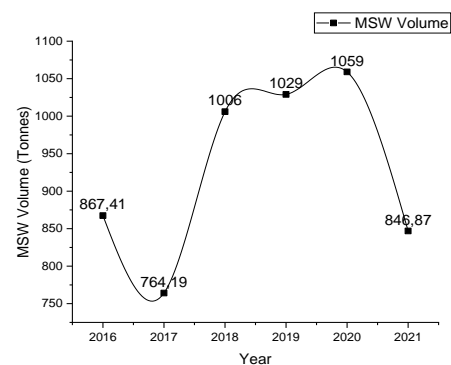
Peraturan presiden Nomor 97 tahun 2017 mengenai kebijakan dan strategi nasional (Jakstranas) pengelolaan MSW rumah tangga dan sejenis MSW rumah tangga. Hal tersebut merupakan bentuk kepedulian pemerintah agar tercipta arah kebijakan dan strategi dalam pengurangan dan penanganan MSW nasional yang terintegrasi dan berkelanjutan. Melalui KLHK, target Indonesia pada tahun 2025 (Indonesia Bersih MSW) melalui pengurangan MSW sebesar 30%, dan penanganan MSW sebesar 70% atau MSW terkelola dengan baik mencapai 100% [7]. Pengelolaan MSW yang kurang baik berdampak terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) [8]. Indonesia termasuk salah satu negara penyumbang emisi GRK terbesar didunia yaitu sebesar 3,1% pada tahun 2020 [9]. Berdasarkan laporan Bapenas, penanganan MSW adalah salah satu sektor terbesar penghasil total emisi GRK (11%) pada tahun 2015 selain sektor industri dan pertanian.

Sebagai Ibu kota Provinsi Riau, Pekanbaru memiliki luas wilayah 632.26 km² dengan jumlah penduduk mencapai 1.020.308 jiwa [10]. Jumlah penduduk yang cukup besar, berdampak terhadap tingginya timbulan MSW yang dihasilkan [11]. Saat ini kinerja pengelolaan MSW di Kota Pekanbaru masih belum optimal [12]. Selain itu, kota Pekanbaru termasuk salah satu dari 10 besar kota dengan produksi MSW terbanyak di Indonesia pada tahun 2022 [13]. Jumlah MSW dihasilkan mencapai 369.019,82 ton/tahun, di mana sebesar 273.284,55 ton/tahun atau 74,04% MSW terkelola melalui penanganan (69,70%) dan pengurangan MSW (4,36%). Sedangkan 95.735,27 atau 25,94% belum terkelola dengan baik [14]. TPA Muara Fajar 1 beroperasi pada tahun 1997 dengan luas 8,6 Ha, dan pada tahun 2007 sudah tidak dapat menerima

MSW. Sedangkan TPA Muara Fajar 2 menjadi alternatif terakhir pembuangan MSW dan diperkirakan penuh beberapa tahun ke depan. Besarnya jumlah tumpukan MSW di TPA akibat belum terdapat penerapan teknologi yang mampu mengurangi jumlah MSW secara masif serta kinerja yang masih belum baik di Kota Pekanbaru [12].



Gambar 1. Target pengurangan dan penanganan MSW nasional



Gambar 2. Timbulan MSW kota Pekanbaru tahun 2016-2021

Pemerintah kota Pekanbaru menetapkan target pada tahun 2024, MSW yang diangkat ke TPA menurun dari 73% dari total MSW menjadi 70%. Selain itu, pengurangan MSW diharapkan menjadi 30% dari total MSW [15]. Oleh sebab itu, pemerintah berupaya mengurangi MSW yang masuk ke TPA Muara Fajar dengan menerapkan konsep *waste to product* dengan menciptakan nilai tambah MSW melalui kegiatan bank MSW dan rumah kompos [16]. Namun, kegiatan tersebut belum dapat dilakukan secara optimal akibat kondisi MSW yang masih tercampur. Selain itu, aspek lingkungan menjadi alasan utama pengurangan MSW ke TPA Muara Fajar yang

dihasilkan dari proses pengangkutan MSW [17]. Emisi dari pengangkutan MSW di pengaruhi oleh kendaraan pengangkutan MSW yang akan meningkat seiring bertambahnya jumlah MSW. Emisi tersebut meliputi karbon dioksida (CO₂), Metana (CH₄), Dinitrogen Oksida (N₂O). Sedangkan dari TPA menghasilkan CO₂ dan CH₄ yang berdampak signifikan terhadap efek gas rumah kaca [1].

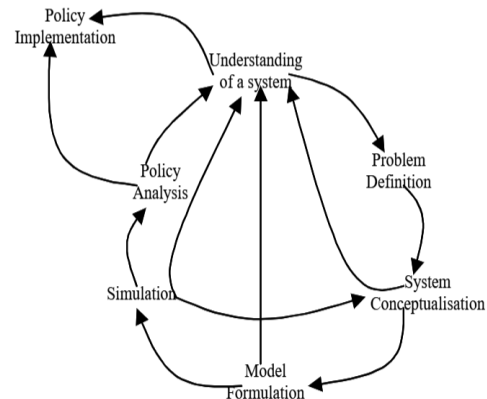
Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan pemahaman kondisi sistem pengelolaan MSW secara komprehensif. Strategi yang diharapkan mampu mempertimbangkan kinerja pengelolaan MSW saat ini, dinamika jumlah dan komposisi MSW, serta dampak jangka panjang dari strategi yang dipilih. Berdasarkan pemaparan tersebut, rumusan masalah pada penelitian yaitu bagaimana upaya strategi pengelolaan MSW yang dapat menurunkan timbulan MSW, meningkatkan penanganan MSW sehingga menghasilkan perancangan pengelolaan MSW yang berkelanjutan. Pendekatan yang dapat digunakan dalam memodelkan kondisi tersebut yaitu *system dynamics* [17]. Model ini mampu mengakomodasi kompleksitas pengelolaan MSW yang terdiri dari banyak proses dan saling berhubungan, serta berpengaruh terhadap kinerja sistem pengelolaan MSW.

II. METODOLOGI PENELITIAN

System Dynamics merupakan metode yang digunakan untuk memahami dan menganalisis sistem kompleks. Metode ini berfokus pada struktur dan perilaku sistem yang terdiri dari interaksi antar variabel dan *loop feedback* [18]. Metode ini dikembangkan pertama kali oleh Jay Forrester pada tahun 1960-an di MIT dalam menganalisis dan merancang kebijakan serta untuk membantu pengambilan keputusan [19]. Gambar 3 menunjukkan proses pemodelan sistem pengelolaan MSW padat di Kota Pekanbaru.

Tahapan pengembangan model *System Dynamics* dimulai dari pemahaman mendalam tentang sistem, yang melibatkan pengumpulan informasi dan data terkait masalah pengelolaan MSW. Data ini diperoleh dari sumber yang dapat diandalkan seperti badan pusat statistik (BPS) dan Dinas lingkungan hidup dan kebersihan kota Pekanbaru. Proses pemahaman sistem ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi elemen-elemen kunci dalam sistem. Kemudian berikutnya yaitu *problem identification and definition* yang diatasi dengan model *system dynamics*. Fokus permasalahan dalam penelitian ini yaitu volume timbulan MSW yang meningkat setiap waktu. Selanjutnya, sistem diubah menjadi sebuah *causal loop diagram* (CLD) pada tahap *system conceptualization* yang mencerminkan

hubungan antara variabel-variabel utama dalam sistem. Diagram tersebut terdiri dari variabel yang dihubungkan oleh anak panah yang menunjukkan hubungan sebab akibat dengan sebuah tanda (baik + atau -) pada sebuah tautan.




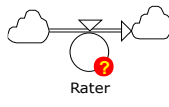


Gambar 3. Proses Pemodelan System Dynamics [20]

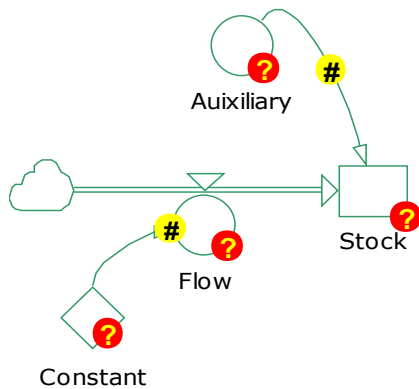
Tanda tersebut memiliki makna yaitu hubungan sebab akibat dari variabel A ke Variabel B adalah positif (+), artinya perubahan pada variabel A menghasilkan perubahan pada variabel B dalam arah yang sama. Sedangkan hubungan sebab akibat dari variabel C ke variabel D adalah negatif (-), maka perubahan pada variabel C menghasilkan perubahan pada variabel B dalam arah yang berlawanan. Selain itu, hubungan sebab akibat yang membentuk loop lengkap diberikan tanda. *Feedback loop reinforcing* (+), jika terdiri dari jumlah tautan negatif yang genap. *Loop reinforcing* ini menunjukkan ketidakseimbangan. Sedangkan *Feedback loop balancing* (-), jika terdiri dari tautan negatif berjumlah ganjil. *loop balancing* menunjukkan sistem berusaha kembali ke keseimbangan. Pada CLD tidak memungkinkan membedakan antara stock dan rate, sehingga perlu menggunakan *stock and flow diagram* (SFD). *System dynamics* dibangun dari variabel yang terdiri dari *stock*, *flow*, *auxiliary*, dan *constant* [18], seperti yang terlihat pada Tabel I. Penelitian ini menggunakan *software Powersim Studio 10*.

Tahapan selanjutnya yaitu *model formulation* atau pengembangan persamaan model. tahap ini melibatkan pengembangan persamaan matematis yang menggambarkan bagaimana variabel-variabel dalam sistem berubah seiring waktu. Model ini menciptakan landasan matematis untuk memahami perilaku sistem dan memungkinkan untuk menjalankan simulasi yang memberikan wawasan tentang bagaimana sistem akan berperilaku dalam berbagai skenario. Simulasi dan validasi adalah tahap penting dalam pengembangan model. Model yang telah diformulasikan diuji melalui Powersim untuk menjalankan simulasi yang mencerminkan kondisi nyata [21]. Dua proses validasi yang dapat

dilakukan yaitu menghitung *mean comparison* (E1) dan perbandingan variasi amplitudo (E2) [22].

TABEL I
VARIABEL PADA SISTEM DINAMIS

Simbol	Nama	Keterangan
	Stock	variabel yang mengakumulasi sesuatu dari waktu ke waktu.
	Rate	Menggambarkan laju perubahan yang mempengaruhi stock
	Auxiliary	Variabel perantara yang membantu menghitung laju perubahan
	Constants	Nilai tetap dalam model, tidak berubah sepanjang waktu



Gambar 4. Notasi *stock and flow diagram* pada *software Powersim*

$$E1 = \frac{|\bar{S} - \bar{A}|}{\bar{A}} \times 100\% \quad (1)$$

Di mana \bar{S} merupakan nilai rata-rata hasil simulasi, dan \bar{A} merupakan nilai rata-rata data aktual. E1 bernilai valid jika $< 5\%$. Sedangkan untuk validasi dengan variasi amplitudo yaitu dengan menggunakan rumus berikut

$$E2 = \frac{|S_s - S_a|}{S_a} \times 100\% \quad (2)$$

Di mana S_s merupakan standar deviasi model, dan S_a merupakan standar deviasi data aktual. E2 dikatakan valid jika bernilai $< 30\%$. Selanjutnya, model digunakan untuk menganalisis berbagai skenario kebijakan. Analisis ini memberikan *insight* mengenai dampak potensial dari berbagai tindakan atau kebijakan pada sistem pengelolaan MSW.

Akhirnya, hasil analisis kebijakan digunakan sebagai dasar untuk merancang kebijakan yang lebih baik untuk perbaikan sistem

III. HASIL PENELITIAN

Hasil penelitian berdasarkan tahapan pada *System Dynamics* dimulai dari pembuatan model CLD, kemudian membangun model SFD, dilanjutkan dengan verifikasi dan validasi model yang dibuat, dan perancangan skenario.

A. Model Causal Loop Diagram (CLD)

Model pengelolaan MSW berfokus terhadap timbulan MSW yang dihasilkan dan akibatnya. Menurut [23] MSW berasal dari aktivitas manusia berbentuk padat yang tidak diinginkan kembali. Sehingga model ini dimulai dari populasi yang menghasilkan MSW dalam menentukan jumlah MSW yang dihasilkan. Tabel II menjelaskan mengenai hubungan setiap variabel yang telah diidentifikasi. Kemudian dilanjutkan dengan membangun model CLD pengelolaan MSW yang dapat dilihat pada gambar 5. Setiap anak panah menunjukkan sebab dari suatu variabel berdampak terhadap variabel lainnya. Hipotesis interaksi ini didasarkan pada kajian pustaka dan studi lapangan. Dinamis model tersebut dihasilkan oleh *Loop Feedback*.

TABEL II
VARIABEL & HUBUNGAN PADA CLD

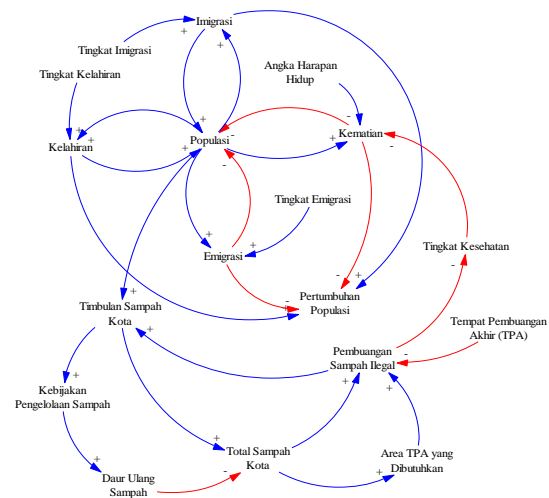
No.	Variable	Hubungan	Referensi
1	Populasi	Kelahiran (+)	[24]
		Kematian (+)	[24]
		Imigrasi (+)	[24]
		Emigrasi (+)	[24]
		Timbulan MSW Kota (+)	[25]
2	Kelahiran	Populasi (+)	[24]
		Pertumbuhan Populasi (+)	[24]
3	Tingkat Kelahiran	Kelahiran (+)	Pendapat
4	Kematian	Populasi (-)	[24]
		Pertumbuhan Populasi (+)	[24]
5	Angka Harapan Hidup	Kematian (-)	[26]
6	Imigrasi	Populasi (+)	[24]
		Pertumbuhan Populasi (+)	[24]
7	Tingkat Imigrasi	Imigrasi (+)	Pendapat
8	Emigrasi	Populasi (-)	[24]
		Pertumbuhan Populasi (+)	[24]
9	Tingkat Emigrasi	Emigrasi (+)	Pendapat
10		Kelahiran (+)	[24]

No.	Variable	Hubungan	Referensi
	Pertumbuhan Populasi	Kematian (-)	[24]
		Imigrasi (+)	[24]
		Emigrasi (-)	[24]
11	Timbulan MSW Kota	Pengelolaan MSW (+)	[27]
12	Total MSW Kota	Total MSW Kota (+)	Pendapat
		Pembuangan MSW Ilegal (+)	Pendapat
12	Total MSW Kota	Area TPA Yang Dibutuhkan (+)	[28]
		Daur Ulang MSW (+)	Pendapat
13	Kebijakan Pengelolaan MSW	Daur Ulang MSW (+)	Pendapat
14	Daur Ulang MSW	Total MSW Kota (-)	Pendapat
15	Pembuangan MSW Ilegal	Tingkat Kesehatan (-)	[29]
16	Tempat Pembuangan Akhir (TPA)	Pembuangan MSW Ilegal (-)	[30]
17	Area TPA Yang Dibutuhkan	Pembuangan MSW Ilegal (+)	[30]
18	Tingkat Kesehatan	Kematian (-)	Pendapat

Model CLD untuk pengelolaan MSW di kota Pekanbaru menggambarkan hubungan dinamis antara beberapa faktor utama yang mempengaruhi sistem pengelolaan MSW. Jumlah penduduk yang meningkat secara langsung meningkatkan produksi MSW, yang pada gilirannya menuntut peningkatan infrastruktur pengelolaan MSW seperti Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dan fasilitas daur ulang. Peningkatan infrastruktur ini dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan MSW dan jumlah MSW yang terolah, sehingga mengurangi jumlah MSW yang tidak terkelola dengan baik. Selain itu, kesadaran dan pendidikan masyarakat memainkan peran penting dalam mengurangi produksi MSW per kapita. Meningkatnya kesadaran dan pendidikan masyarakat dapat meningkatkan partisipasi dalam program daur ulang dan pengelolaan MSW yang efektif, yang pada akhirnya mengurangi dampak lingkungan negatif dari MSW yang tidak terkelola. Dampak lingkungan yang negatif, seperti pencemaran air, tanah, dan udara, dapat menurunkan kualitas hidup masyarakat.

Model CLD untuk pengelolaan MSW di kota Pekanbaru menggambarkan hubungan dinamis antara beberapa faktor utama yang mempengaruhi sistem pengelolaan MSW. Jumlah penduduk yang meningkat secara langsung meningkatkan produksi MSW, yang pada gilirannya menuntut peningkatan infrastruktur pengelolaan MSW seperti Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dan fasilitas daur ulang. Peningkatan infrastruktur ini dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan MSW dan jumlah MSW yang

terolah, sehingga mengurangi jumlah MSW yang tidak terkelola dengan baik. Selain itu, kesadaran dan pendidikan masyarakat memainkan peran penting dalam mengurangi produksi MSW per kapita. Meningkatnya kesadaran dan pendidikan masyarakat dapat meningkatkan partisipasi dalam program daur ulang dan pengelolaan MSW yang efektif, yang pada akhirnya mengurangi dampak lingkungan negatif dari MSW yang tidak terkelola. Dampak lingkungan yang negatif, seperti pencemaran air, tanah, dan udara, dapat menurunkan kualitas hidup masyarakat.



Gambar 5. Causal Loop Diagram dari MSW

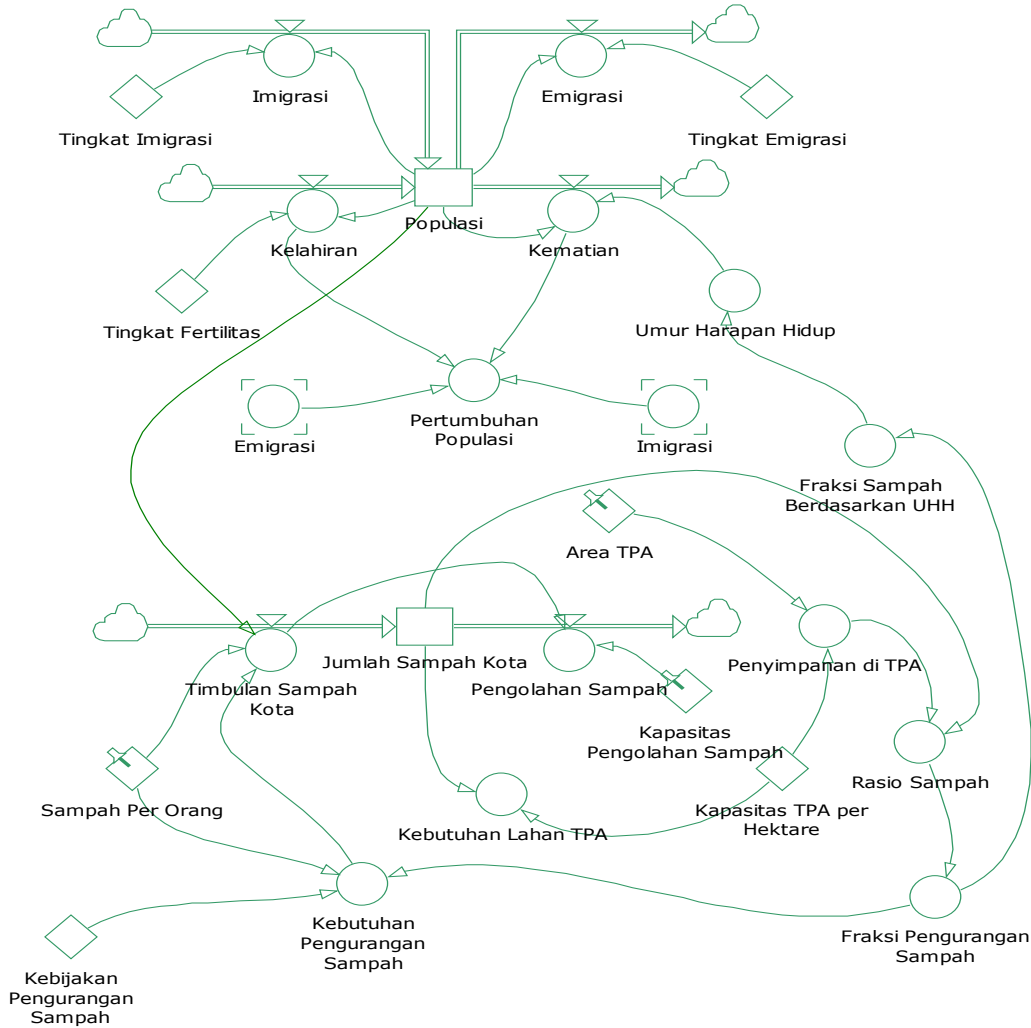
Pada CLD terdapat 11 loop yang terdiri dari 6 Loop Reinforcing (R) dan 5 Loop Balancing (B). Loop seperti R1 dan R2 menggambarkan bagaimana imigrasi dan tingkat kelahiran yang tinggi meningkatkan populasi, yang pada akhirnya memicu lebih banyak MSW. Loop R3 dan R4 menunjukkan bahwa ketika populasi meningkat, timbulan MSW bertambah, mempengaruhi kebijakan pengelolaan MSW, serta mengakibatkan lebih banyak pembuangan MSW ilegal dan peningkatan risiko kesehatan. Dampak ini dapat meningkatkan angka kematian, yang menjadi efek umpan balik terhadap populasi itu sendiri. Selain itu, loop R5 dan R6 memperlihatkan bahwa peningkatan jumlah MSW tanpa pengelolaan yang memadai menyebabkan peningkatan pembuangan MSW ilegal, yang memperburuk timbulan MSW dan mempercepat kebutuhan akan tempat pembuangan akhir (TPA).

Di sisi lain, balancing loop dalam CLD ini mencoba menyeimbangkan peningkatan populasi dan timbulan MSW melalui mekanisme tertentu. Loop seperti B1 dan B2 menunjukkan bagaimana faktor alamiah seperti kematian dan emigrasi membantu menyeimbangkan populasi, sementara loop seperti B3, B4, dan B5 menunjukkan upaya

stabilisasi melalui kebijakan pengelolaan MSW. Pada B3 dan B4, peningkatan timbulan MSW dapat menurunkan kesehatan masyarakat, yang berujung pada kenaikan angka kematian dan akhirnya membantu menekan pertumbuhan populasi. Sedangkan, pada B5, peningkatan kebijakan daur ulang yang baik dapat mengurangi timbulan MSW kota secara efektif, sehingga mengurangi pembuangan MSW ilegal dan menjaga keseimbangan dalam sistem pengelolaan MSW.

Model SFD yang ditampilkan pada Gambar 6 merepresentasikan dinamika MSW di kota Pekanbaru. Diagram ini terdiri dari beberapa komponen utama yang mencakup *stock*, *flow*, *constants*, dan variabel pengendali (*Auxiliary Variables*). SFD digunakan untuk menggambarkan akumulasi dan aliran dalam sistem pengelolaan MSW di kota Pekanbaru. Stok utama dalam model ini mencakup jumlah MSW yang dihasilkan, kebijakan terhadap pengurangan MSW, MSW yang terolah, dampak MSW terhadap kesehatan, dan MSW yang berakhir di TPA.

B. Model Stock and Flow Diagram (SFD)



Gambar 6. Stock and Flow Diagram dari MSW

Stok MSW volume dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jumlah penduduk, tingkat konsumsi, dan aktivitas ekonomi. Pertumbuhan populasi dan urbanisasi di Pekanbaru menyebabkan peningkatan laju produksi MSW baru. Saat ini jumlah penduduk kota Pekanbaru sebesar 1.117.360 Jiwa. Sedangkan jumlah MSW yang dihasilkan per orang sebesar 0,98 Kg. Saat ini pemerintah berupaya mengurangi jumlah MSW melalui pengurangan penggunaan produk berbahan plastik yang efektifnya sebesar 10%.

Stok MSW volume dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jumlah penduduk, tingkat konsumsi, dan aktivitas ekonomi. Pertumbuhan populasi dan urbanisasi di Pekanbaru menyebabkan peningkatan laju produksi MSW baru. Saat ini jumlah penduduk kota Pekanbaru sebesar 1.117.360 Jiwa. Sedangkan jumlah MSW yang dihasilkan per orang sebesar 0,98 Kg. Saat ini berdasarkan Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan (DLHK) kota Pekanbaru, upaya pengurangan sampah MSW mampu mengurangi sampah sebesar 10%. Sedangkan dari

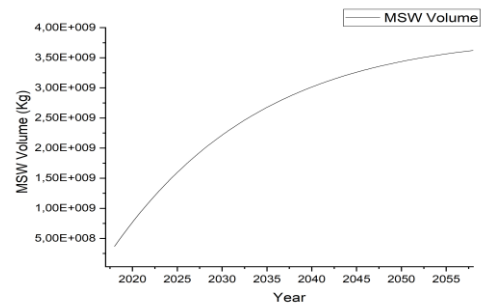
si pengolahan, skema daur ulang masih menjadi alternatif utama dalam pengelolaan MSW. Kapasitas dan efisiensi fasilitas pengolahan mempengaruhi laju pengolahan MSW, yang tercermin dalam stok MSW volume. MSW di TPA menunjukkan jumlah MSW yang tidak terolah dan berakhir di TPA. Kapasitas TPA dan kebijakan pembuangan akhir sangat mempengaruhi stok. Pekanbaru memiliki 1 TPA yang berlokasi di Muara Fajar, Kecamatan Rumbai. Luas area TPA yang dapat digunakan untuk menampung MSW sebesar 5 Ha. Metode ini disebut *open dumping*, di mana MSW dibuang tanpa dilakukan penutupan tanah dan diolah lebih lanjut. Dampak negatif dari sistem pengolahan TPA seperti ini berupa terbatasnya jumlah MSW yang ditampung, sehingga jika dibiarkan terus menerus berdampak pada kesehatan. Beberapa formulasi pada SFD dapat dilihat pada Tabel III.

TABEL III
FORMULASI MODEL SFD MSW

No	Variabel	Nama	Formulasi [Referensi]
1	Populasi	Level	1.11736e+06 orang [31]
2	Kelahiran	Rate	Populasi* <i>Tingkat Fertilitas</i> ' [24]
3	Tingkat Fertilitas	Constant	0,022 /tahun [31]
4	Kematian	Rate	Populasi/ <i>Umur Harapan Hidup</i> ' [24]
5	Umur Harapan Hidup	Auxiliary	68<<year>>-(<i>Fraksi Sampah Kota Berdasarkan UHH</i> *68) [32]
6	Emigrasi	Rate	Populasi* <i>Tingkat Emigrasi</i> ' [24]
7	Tingkat Emigrasi	Constant	0,04 /tahun [31]
8	Imigrasi	Rate	Populasi* <i>Tingkat Imigrasi</i> '
9	Tingkat Imigrasi	Constant	0,05/tahun [31]
10	Pertumbuhan Populasi	Auxiliary	(<i>Kelahiran</i> + <i>Imigrasi</i>)-(<i>Kematian</i> + <i>Emigrasi</i>) [24]
11	Jumlah Sampah Kota	Level	3.6719e+08 Kg [33]
12	Timbulan Sampah Kota	Rate	Populasi*(<i>Sampah Kota Per Orang</i> - <i>Kebutuhan Pengurangan Sampah</i>)*365 <<Hari/year>> [34]
13	Pengolahan Sampah	Rate	<i>Timbulan Sampah Kota</i> * <i>Kapasitas Pengolahan Sampah</i> ' [Pengolahan Data]
14	Sampah Per Orang	Constant	0,5 kg/orang/hari [35]
15	Kapasitas Pengolahan Sampah	Constant	46,7% [DLHK Kota Pekanbaru]
16	Kebijakan Pengurangan Sampah	Constant	10% [DLHK Kota Pekanbaru]
17	Kebutuhan Pengurangan Sampah	Auxiliary	<i>Fraksi Pengurangan Sampah</i> * <i>Kebijakan Pengurangan Sampah</i> '*

No	Variabel	Nama	Formulasi [Referensi]
			Sampah Per Orang' [Pengolahan Data]
18	Fraksi Pengurangan Sampah	Auxiliary	IF (<i>Rasio Sampah</i> '<1,1, <i>Rasio MSW</i>)-1 [Pengolahan Data]
19	Rasio Sampah	Auxiliary	<i>Jumlah Sampah Kota</i> / <i>Penyimpanan di TPA</i> ' [Pengolahan Data]
20	Kapasitas TPA per Hektare	Auxiliary	40.000.000 Ha [36]
21	Kebutuhan Lahan TPA	Auxiliary	<i>Jumlah Sampah Kota</i> / <i>Kapasitas TPA per Hektare</i> ' [Pengolahan Data]
22	Penyimpanan di TPA	Auxiliary	<i>Kapasitas TPA per Hektare</i> * <i>Area TPA</i> ' [Pengolahan Data]
23	Area TPA	Constant	5 Ha [36]
24	Fraksi Sampah Berdasarkan UHH	Auxiliary	<i>Fraksi Pengurangan Sampah</i> *1<<%>> [Pengolahan Data]

Hasil dari simulasi model SFD untuk jumlah MSW dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Hasil Simulasi MSW sampai 2058

C. Verifikasi dan Validasi Model

Verifikasi model dilakukan dengan 2 cara yaitu dengan melihat konsistensi dimensi (unit) yang telah disediakan oleh *software Powersim* dan verifikasi struktur berdasarkan pakar [37]. Validasi model merupakan proses pengujian model yang dibangun sudah merepresentasikan dari sistem nyata [38]. Pada penelitian ini pengujian validasi dilakukan dengan dua cara yaitu perbandingan rata-rata dan perbandingan variasi amplitudo [22]. Hasil validasi untuk variabel jumlah populasi dan volume MSW dengan perbandingan rata-rata dapat dilihat pada Tabel IV dan V.

TABEL IV
VALIDASI PERBANDINGAN RATA-RATA PADA POPULASI

Tahun	Aktual (orang)	Simulasi (orang)	Error (%)
2018	1.117.359	1.117.360	0,08
2019	1.143.359	1.124.230	1,67
2020	983.356	1.131.120	15,02
2021	994.585	1.137.920	14,41

2022	1.007.540	1.144.670	13,61
2023	1.020.308	1.151.460	12,85
MAPE			9,60

TABEL V
VALIDASI PERBANDINGAN RATA-RATA VOLUME MSW

Tahun	Aktual (Kg)	Simulasi (Kg)	Error (%)
2018	367.190.000	397.721.000	8,31
2019	375.585.000	376.467.000	0,23
2020	383.980.000	356.210.000	7,23
2021	353.133.850	336.879.000	4,60
2022	356.501.800	318.453.000	10,67
2023	401.500.000	300.924.000	25,05
MAPE			9,35

Tabel IV dan V menggambarkan representasi yang baik dari model yang telah dikembangkan terhadap sistem yang dibangun. Hasil validasi melalui perbandingan rata-rata persentase error menunjukkan bahwa kesalahan yang dihasilkan oleh model ini adalah 9,60% untuk variabel populasi, sementara untuk variabel volumenya MSW sebesar 9,35%. Kedua variabel tersebut menunjukkan nilai rata-rata < 10% [39], yang dapat disimpulkan bahwa model ini dapat menggambarkan dinamika pengelolaan MSW.

D. Skenario Kebijakan

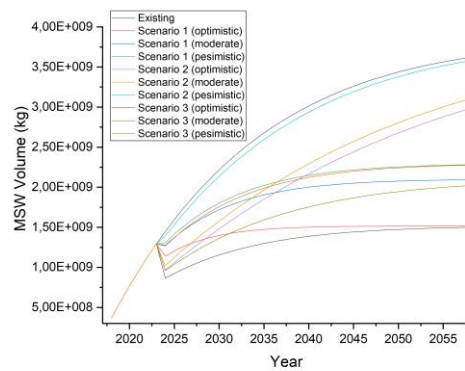
Skenario model merupakan metode prognosis di mana data saat ini digunakan untuk mengembangkan berbagai kemungkinan alternatif masa depan (Reibnitz, 1988). Pembuatan skenario pada model berdasarkan target pengelolaan MSW pemerintah Kota Pekanbaru. Model ini membagi skenario menjadi 3 yaitu skenario 1 (*waste reduction*), skenario 2 (*waste treatment*), dan skenario 3 (*waste reduction dan waste treatment*). Setiap skenario terdiri dari 3 tingkat yaitu *optimistic*, *moderate*, dan *pesimistic*. Detail skenario dapat dilihat pada Tabel VI.

TABEL VI
DETAIL SKENARIO UNTUK MSW

Skenario		Pengurangan MSW (%)	Pengolahan MSW (%)
Skenario 1 (Pengurangan MSW)	<i>Optimistic</i>	30	46,7
	<i>Moderate</i>	20	46,7
	<i>Pesimistic</i>	18	46,7
Skenario 2 (Pengolahan MSW)	<i>Optimistic</i>	10	72,9
	<i>Moderate</i>	10	70
	<i>Pesimistic</i>	10	50

Skenario 3 (Pengurangan & Pengolahan MSW)	<i>Optimistic</i>	30	72,9
	<i>Moderate</i>	20	70
	<i>Pesimistic</i>	18	50

Berdasarkan 3 skenario yang diberikan menunjukkan pendekatan yang berbeda dalam mengelola MSW. Gambar 8 menunjukkan perbandingan hasil setiap skenario yang dijalankan untuk variabel timbulan MSW (sumbu Y) setiap tahun simulasi (sumbu X). Skenario 3 *Optimistic* dapat mengurangi jumlah MSW secara signifikan selama periode simulasi. Jumlah rata-rata MSW yang dihasilkan skenario dapat dilihat pada Tabel VII.



Gambar 8. Perbandingan Hasil Semua Skenario

TABEL VII
DETAIL SKENARIO UNTUK MSW

Skenario	Pengurangan MSW (%)	
<i>Eksisting</i>	2.587.313.220	
Skenario 1 (Pengurangan MSW)	<i>Optimistic</i>	1.366.988.341
	<i>Moderate</i>	1.754.986.390
	<i>Pesimistic</i>	1.870.450.049
Skenario 2 (Pengolahan MSW)	<i>Optimistic</i>	1.948.431.073
	<i>Moderate</i>	2.045.360.293
	<i>Pesimistic</i>	2.530.208.341
Skenario 3 (Pengurangan & Pengolahan MSW)	<i>Optimistic</i>	1.257.910.634
	<i>Moderate</i>	1.559.055.171
	<i>Pesimistic</i>	1.849.150.049

IV. PEMBAHASAN

Berdasarkan data volume MSW di Kota Pekanbaru dari tahun 2018 hingga 2058, terdapat tren peningkatan volume MSW yang signifikan dari

tahun ke tahun. Pada tahun 2018, volume MSW tercatat sebesar 3.584.220 kg [12] dan terus meningkat hingga mencapai 3.621.050.000 kg pada tahun 2058. Peningkatan ini menunjukkan pertumbuhan populasi, peningkatan aktivitas ekonomi, dan perubahan gaya hidup masyarakat yang menghasilkan lebih banyak MSW. Kenaikan volume MSW per tahun bervariasi, tetapi secara umum menunjukkan tren yang stabil dan bertahap. Misalnya, volume MSW pada tahun 2023 meningkat menjadi 1.292.980.000 kg dari 1.127.960.000 kg pada tahun sebelumnya, menunjukkan peningkatan sebesar sekitar 165.020.000 ton [40]. Tren ini menegaskan kebutuhan mendesak akan sistem pengelolaan MSW yang efektif dan efisien untuk mengatasi peningkatan volume MSW.

Berdasarkan tiga skenario pengelolaan MSW melalui pengurangan MSW, pengolahan MSW, dan kombinasi keduanya. Pengurangan MSW dapat dicapai melalui edukasi masyarakat untuk mengurangi penggunaan plastik dan barang sekali pakai, serta meningkatkan kesadaran akan pentingnya daur ulang. Langkah ini dapat mencakup kampanye publik yang fokus pada dampak lingkungan dari plastik sekali pakai dan manfaat pengurangan MSW bagi kehidupan sehari-hari. Di sisi lain, pengolahan MSW yang efektif bisa dicapai dengan mendaur ulang MSW dan mengembangkan infrastruktur pengolahan modern, seperti insinerator dan pabrik kompos. Kondisi saat ini menghasilkan total MSW sebesar 2.587.313.220 kg/tahun. Skenario 1, yang fokus pada pengurangan MSW, menghasilkan jumlah MSW hingga 1.366.988.341 kg/tahun pada skenario optimistik, sedangkan skenario pesimistis menurun hingga 1.870.450.049 kg/tahun. Skenario 2, yang hanya mengandalkan pengolahan MSW, menghasilkan jumlah MSW yang sedikit lebih tinggi, terutama pada skenario pesimistis (2.530.208.341 kg/tahun). Skenario 3, yang menggabungkan pengurangan dan pengolahan MSW, memberikan hasil terbaik dengan jumlah MSW terendah pada skenario optimistik sebesar 1.257.910.634 kg/tahun. Kombinasi pengurangan dan pengolahan MSW lebih efektif dalam mengurangi jumlah MSW secara keseluruhan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan model simulasi *System Dynamics* untuk pengelolaan MSW di Kota Pekanbaru. Hasil model menunjukkan bahwa peningkatan populasi secara langsung meningkatkan timbulan MSW, yang pada gilirannya menuntut peningkatan infrastruktur pengelolaan MSW. Oleh sebab itu, penelitian ini menyarankan dua strategi utama: pengurangan

MSW dan pengolahan MSW. Pengurangan MSW dapat dicapai melalui edukasi masyarakat tentang pengurangan penggunaan plastik dan barang sekali pakai, serta meningkatkan kesadaran akan pentingnya daur ulang. Di sisi lain, pengolahan MSW melalui daur ulang serta melibatkan pembangunan fasilitas modern seperti insinerator dan pabrik kompos yang mampu mengolah MSW dengan lebih efisien. Dari simulasi yang dilakukan, skenario terbaik yang dihasilkan adalah kombinasi pengurangan MSW sebesar 30% dan pengolahan MSW sebesar 72,9%. Implementasi skenario ini diharapkan dapat secara signifikan menurunkan timbulan MSW yang masuk ke TPA, sehingga mengurangi beban TPA dan emisi gas rumah kaca yang terkait dengan pengelolaan MSW yang tidak efisien. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi dalam merancang kebijakan pengelolaan MSW yang berkelanjutan di masa depan, khususnya di Pekanbaru. Hasilnya dapat menjadi dasar bagi pemerintah untuk meningkatkan pengelolaan MSW melalui kombinasi pengurangan dan pengolahan MSW yang lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada RisetMU batch VII atas dukungan pendanaan yang telah memungkinkan terlaksananya penelitian ini dengan baik.

REFERENSI

- [1] N. Gupta, K. K. Yadav, And V. Kumar, "A Review On Current Status Of Municipal Solid Waste Management In India," *J Environ Sci (China)*, Vol. 37, Pp. 206–217, Nov. 2015, Doi: 10.1016/J.Jes.2015.01.034.
- [2] D. E. Turcott Cervantes, A. López Martínez, M. Cuartas Hernández, And A. Lobo García De Cortázar, "Using Indicators As A Tool To Evaluate Municipal Solid Waste Management: A Critical Review," *Waste Management*, Vol. 80, Pp. 51–63, Oct. 2018, Doi: 10.1016/J.Wasman.2018.08.046.
- [3] S. Suthar And P. Singh, "Household Solid Waste Generation And Composition In Different Family Size And Socio-Economic Groups: A Case Study," *Sustainable Cities And Society*, Vol. 14, Pp. 56–63, Feb. 2015, Doi: 10.1016/J.ScS.2014.07.004.
- [4] S. Supangkat And H. Herdiansyah, "Analysis Correlation Of Municipal Solid Waste Generation And Population: Environmental Perspective," *Iop Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, Vol. 519, No. 1, P. 012056, Jun. 2020, Doi: 10.1088/1755-1315/519/1/012056.
- [5] N. Ferronato And V. Torretta, "Waste Mismanagement In Developing Countries: A Review Of Global Issues," *Int J Environ Res Public Health*, Vol. 16, No. 6, P. 1060, Mar. 2019, Doi: 10.3390/Ijerp16061060.
- [6] I. R. Abubakar *Et AL.*, "Environmental Sustainability Impacts Of Solid Waste Management Practices In The Global South," *Int J Environ Res Public Health*, Vol. 19, No. 19, P. 12717, Oct. 2022, Doi: 10.3390/Ijerp191912717.
- [7] Ppid, "Wujudkan Indonesia Bersih Sampah Melalui Pengelolaan Sampah Terintegrasi." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://Ppid.Menlhk.Go.Id/Berita/Siaran->

- Pers/4128/Wujudkan-Indonesia-Bersih-Sampah-Melalui-Pengelolaan-Sampah-Terintegrasi
- [8] R. L. Verma And G. Borongan, "Emissions Of Greenhouse Gases From Municipal Solid Waste Management System In Ho Chi Minh City Of Viet Nam," *Urban Science*, Vol. 6, No. 4, Art. No. 4, Dec. 2022, Doi: 10.3390/Urbansci6040078.
- [9] Council On Foreign Relations, "Who Releases The Most Greenhouse Gases?," World101 From The Council On Foreign Relations. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://World101.Cfr.Org/Global-Era-Issues/Climate-Change/Who-Releases-Most-Greenhouse-Gases>
- [10] Badan Pusat Statistik, "Kota Pekanbaru Dalam Angka 2023," Pek, 2023.
- [11] F. Zulkipli, Z. M. Nopiah, N. E. A. Basri, And C. J. Kie, "Stock Flow Diagram Analysis On Solid Waste Management In Malaysia," Vol. 1782, P. 040023, Oct. 2016, Doi: 10.1063/1.4966090.
- [12] K. Hayati, N. R. Kusumaningrum, K. Amri, And Afriyani, "Kinerja Pengelolaan Sampah Di Kota Pekanbaru," 2022.
- [13] Okezone, "10 Kota Dengan Produksi Sampah Terbanyak Di Indonesia, Nomor 2 Tak Sangka : Okezone Travel," <https://Travel.Okezone.Com/>. Accessed: Nov. 04, 2023. [Online]. Available: <https://Travel.Okezone.Com/Read/2022/08/23/408/2653138/10-Kota-Dengan-Produksi-Sampah-Terbanyak-Di-Indonesia-Nomor-2-Tak-Sangka>
- [14] Dlhk, "Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah." Accessed: Oct. 21, 2024. [Online]. Available: <https://Sipsn.Menlhk.Go.Id/Sipsn/Public/Data/Capaian>
- [15] P. D. Lestari, "Dlhk Kota Pekanbaru Targetkan 30 Persen Volume Sampah Tertangani - Riau Pos," Dlhk Kota Pekanbaru Targetkan 30 Persen Volume Sampah Tertangani - Riau Pos. Accessed: Oct. 21, 2024. [Online]. Available: <https://Riaupos.Jawapos.Com/Pekanbaru/2254076793/Dlhk-Kota-Pekanbaru-Targetkan-30-Persen-Volume-Sampah-Tertangani>
- [16] I. Rielasari, "Pengelolaan Sampah Kota Pekanbaru," Vol. 5, No. 1, 2018.
- [17] R. Eisted, A. W. Larsen, And T. H. Christensen, "Collection, Transfer And Transport Of Waste: Accounting Of Greenhouse Gases And Global Warming Contribution." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://Journals.Sagepub.Com/Doi/10.1177/0734242x09347796>
- [18] E. Suryani, R. A. Hendrawan, And U. E. Rahmawati, *Model Dan Simulasi Sistem Dinamik*. Yogyakarta: Deepublish, 2020.
- [19] John. D. Sterman, *Business Dynamic-System Thinking And Modelling For A Complex World*. Irwin/Mcgraw-Hill, 2000.
- [20] G. Richardson And D A. L. Pugh, *Introduction To System Dynamics Modelling With Dynamo*. Productivity Pr, 1981.
- [21] J. D. W. Morecroft, *Strategic Modelling And Business Dynamics: A Feedback Systems Approach*, Second Edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley And Sons Ltd, 2015.
- [22] Y. Barlas, "Multiple Tests For Validation Of System Dynamics Type Of Simulation Models," *European Journal Of Operational Research*, Vol. 42, No. 1, Pp. 59–87, Sep. 1989, Doi: 10.1016/0377-2217(89)90059-3.
- [23] E. Damanhuri, W. Handoko, And T. Padmi, "Municipal Solid Waste Management In Indonesia," In *Municipal Solid Waste Management In Asia And The Pacific Islands: Challenges And Strategic Solutions*, A. Pariatamby And M. Tanaka, Eds., Singapore: Springer, 2014, Pp. 139–155. Doi: 10.1007/978-981-4451-73-4_8.
- [24] D. J. Bogue, *Principles Of Demography*. New York: John Wiley & Sons, 1969.
- [25] A. U. Zaman And S. Lehmann, "Challenges And Opportunities In Transforming A City Into A 'Zero Waste City,'" *Challenges*, Vol. 2, No. 4, Art. No. 4, Dec. 2011, Doi: 10.3390/Challe2040073.
- [26] R. Lee, "The Demographic Transition: Three Centuries Of Fundamental Change," *Journal Of Economic Perspectives*, Vol. 17, No. 4, Pp. 167–190, Dec. 2003, Doi: 10.1257/089533003772034943.
- [27] T. Karak, R. M. Bhagat, And P. Bhattacharyya, "Municipal Solid Waste Generation, Composition, And Management: The World Scenario," *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, Vol. 42, No. 15, Pp. 1509–1630, Aug. 2012, Doi: 10.1080/10643389.2011.569871.
- [28] D. C. Wilson, L. Rodic, A. Scheinberg, C. A. Velis, And Alabaster, "Comparative Analysis Of Solid Waste Management In 20 Cities." Accessed: Oct. 28, 2024. [Online]. Available: <https://Journals.Sagepub.Com/Doi/Full/10.1177/0734242x12437569>
- [29] L. Giusti, "A Review Of Waste Management Practices And Their Impact On Human Health," *Waste Manag.*, Vol. 29, No. 8, Pp. 2227–2239, Aug. 2009, Doi: 10.1016/J.Wasman.2009.03.028.
- [30] A. Mahar, R. Malik, A. Qadir, T. Ahmed, Z. Khan, And M. Khan, "Review And Analysis Of Current Solid Waste Management Situation In Urban Areas Of Pakistan," In *Proceedings Of The International Conference On Sustainable Solid Waste Management*, Chennai, India, Jan. 2007.
- [31] Bps Provinsi Riau, "Statistik Kelapa Sawit Provinsi Riau 2022," 2024.
- [32] S. Suci, "Life Expectancy: Memperpanjang Harapan Rentang Hidup." Accessed: Jan. 02, 2025. [Online]. Available: <https://Sejawat.Co.Id/Article/Detail/Life-Expectancy-Memperpanjang-Harapan-Rentang-Hidup-1680701940>
- [33] Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan, "Sipsn - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional." Accessed: Jan. 02, 2025. [Online]. Available: <https://Sipsn.Menlhk.Go.Id/Sipsn/Public/Data/Timbulan>
- [34] I. Surjandari, A. Hidayatno, And A. Supriatna, "Model Dinamis Pengelolaan Sampah Untuk Mengurangi Beban Penumpukan," *Jurnal Teknik Industri: Jurnal Keilmuan Dan Aplikasi Teknik Industri*, Vol. 11, No. 2, Art. No. 2, Dec. 2009, Doi: 10.9744/Jti.11.2.134-147.
- [35] L. Febriani, Y. I. Siregar, And R. M. Putra, "Analisis Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Berbasis Masyarakat Di Kecamatan Marpoyan Damai Kota Pekanbaru," *Photon: Journal Of Natural Sciences And Technology*, Vol. 11, No. 1, Art. No. 1, Oct. 2020, Doi: 10.37859/Jp.V11i1.2089.
- [36] Redaksi, "Tpa 2 Muara Fajar Tampung 243.301,71 Ton Sampah Per Tahun," Riaukini.Com. Accessed: Jan. 03, 2025. [Online]. Available: <https://Riaukini.Com/News/Detail/2087/Tpa-2-Muara-Fajar-Tampung-24330171-Ton-Sampah-Per-Tahun>
- [37] J. W. Forrester And P. M. Senge, "Tests For Building Confidence In System Dynamics Models," *Tims Studies In The Management Sciences*, Vol. 14, Pp. 209–228, 1980.
- [38] A. M. Law And W. D. Kelton, *Simulation Modeling And Analysis*, Second Edition. In Mcgraw-Hill Series In Industrial Engineering And Management Science. New York St. Louis San Francisco Auckland: Mcgraw-Hill, Inc, 1991.
- [39] Y. Barlas, "Formal Aspects Of Model Validity And Validation In System Dynamics," *Syst. Dyn. Rev.*, Vol. 12, No. 3, Pp. 183–210, 1996, Doi: 10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4.
- [40] KLHK, "SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional." Accessed: Oct. 07, 2024. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/timbulan>