



Pengolahan Sampah Di Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Pintu Bosi Menggunakan Metode Sistem Dinamik Dengan Model *Stock And Flow Diagram*

Andreas Sendika Nevano Marbun¹, Natasha Trya Frisca Ambarita²,
Nathaly Grace Gultom³, Owen Louis Lumbantobing⁴, Fitriani Tupa Ronauli
Silalahi⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Program Studi Manajemen Rekayasa, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Del

Abstract

Received: 20 Juni 2025
Revised: 27 Juni 2025
Accepted: 01 Juli 2025

Penelitian ini membahas pengolahan sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Pintu Bosi di Kabupaten Toba, Sumatera Utara, menggunakan metode sistem dinamik dengan model *Stock and Flow Diagram*. Peningkatan volume sampah yang signifikan setiap tahun memerlukan metode analisis yang mampu mengidentifikasi faktor-faktor penyebab dan memberikan solusi berkelanjutan. Model sistem dinamik digunakan untuk memahami interaksi variabel-variabel seperti pertumbuhan penduduk, produksi sampah, dan kapasitas pengelolaan sampah. Data dikumpulkan melalui observasi, studi literatur, dan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi skenario peningkatan kapasitas TPA, program daur ulang sampah, dan pengurangan konsumsi plastik dapat mengurangi volume timbulan sampah secara efektif dan berkelanjutan.

Keywords: Tempat Pembuangan Akhir (TPA), *stock and flow diagram*, pengelolaan sampah, sistem dinamik

(*) Corresponding Author: andreassendika9@gmail.com¹, natashaambarita11@gmail.com²,
windinathalygrace@gmail.com³, owentobing2018@gmail.com⁴,
fitrianitupa@gmail.com⁵

HowtoCite: Marbun, A., Ambarita, N., Gultom, N., Lumbantobing, O., & Silalahi, F. (2025). Pengolahan Sampah Di Tempat Pembuangan Akhir (Tpa) Pintu Bosi Menggunakan Metode Sistem Dinamik Dengan Model *Stock And Flow Diagram*. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 11(7.D), 21-37. Retrieved from <https://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP/article/view/10975>

PENDAHULUAN

Jumlah populasi serta perubahan pola masyarakat seperti peningkatan ekonomi, berubahnya jumlah pendapatan, urbanisasi dan industrialisasi menjadi salah satu penyebab meningkatnya timbulan sampah yang dihasilkan oleh masyarakat (Adipraja & Islamiyah, 2017). Pada TPA Pintu Bosi yang berlokasi di Kabupaten Toba, Provinsi Sumatera Utara. Timbulan sampah pada TPA Pintu Bosi tiap tahunnya selalu meningkat, yaitu sebesar 39.509, 06 ton pada tahun 2021, 40.123,08 ton pada tahun 2022, dan 40.522,11 pada tahun 2023. Data tersebut diperoleh melalui Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). Melalui data tersebut terlihat bahwa data timbulan sampah memang meningkat setiap tahunnya dan timbulan sampah ini diperkerikan akan terus meningkat dari tahun ke tahun.

Timbulan sampah yang terus meningkat pada TPA Pintu Bosi dapat mengakibatkan dampak negatif, seperti pada lingkungan, yaitu pencemaran tanah, udara, air, menimbulkan berbagai penyakit, serta timbulnya bau yang tidak sedap,

dan lain-lain. Oleh karena itu, diperlukan cara agar masalah timbunan sampah dapat dikurangi pada TPA Pintu Bosi. Pada TPA Pintu Bosi sendiri, sistem pengelolaan sampah masih kurang optimal, dikarenakan seluruh sampah yang masuk pada TPA Pintu Bosi dikumpulkan, ditimbun, dan dibiarkan begitu saja. Hingga sekarang timbunan sampah pada TPA Pintu Bosi sudah mencapai 20 m dari bahu jalan. Melalui proses wawancara yang dilakukan dengan pihak pengelola TPA Pintu Bosi, daya tampung TPA Pintu Bosi, yaitu sebanyak 250.000 – 300.000 ton. Jika hal tersebut dibiarkan begitu saja, akan mengakibatkan pembalutakan sampah yang bisa mengganggu masyarakat yang berada di sekitar TPA Pintu Bosi. Untuk mencegah hal tersebut berlangsung terus menerus, perlu diterapkan suatu metode untuk mencari tahu bagaimana cara untuk mengurangi timbunan sampah pada TPA Pintu Bosi dengan menganalisis faktor-faktor penyebab timbunan, mengidentifikasi akar masalah, serta menemukan solusi yang efektif. Oleh karena itu, pada penelitian ini diusulkan untuk menggunakan metode sistem dinamik untuk melakukan identifikasi terkait masalah tersebut.

Sistem dinamik merupakan sebuah metode yang digunakan untuk menganalisis struktur dinamika kerja suatu sistem dan memprediksi kinerja sistem di masa depan dengan tujuan menentukan bagaimana skenario kebijakan yang efektif di masa depan (Sapanli et al., 2023). Terdapat beberapa model sistem dinamik, salah satunya adalah model *stock and flow diagram*. Pada model *stock and flow diagram* akan terlihat variabel-variabel apa yang mempengaruhi suatu *stock*, dimana pada permasalahan yang akan diteliti sekarang merupakan permasalahan timbunan sampah yang menjadi variabel *stock*. Pada metode sistem dinamik dengan model *stock and flow diagram* pada penelitian ini akan terlihat variabel-variabel apa saja yang menjadi faktor penyebab timbunan, mengidentifikasi akar masalah. Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan solusi untuk mengurangi penumpukan sampah di TPA Pintu Bosi.

TINJAUAN PUSTAKA

a. Sampah

Sampah merupakan material yang material sisa dari setiap aktivitas yang dilakukan oleh makhluk hidup yang dilepaskan ke alam, material tersebut terbagi menjadi dua material yang diperlukan lagi dan material yang dapat diolah atau daur ulang. Bentuk dari material tersebut dapat berupa gas, cairan ataupun padat (Sagune, 2009). Pengelompokan sampah berdasarkan jenis yaitu, sampah yang dapat diurai, tidak dapat terurai dan sampah yang berbahaya (B3) (Sahil et al., 2016).

Proses pengurangan sampah, pemisahan, dan pembuangan merupakan cara yang efektif untuk pengolahan sampah. Pengelolaan sampah dapat ditinjau dari pengumpulan dan pemilahan, tempat pengelolaan sampah terpadu (TPST), penggunaan inovasi dan teknologi (Surjandari et al., 2009).

b. Tempat Pembuangan Akhir

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) merupakan lokasi atau sistem yang terstruktur yang sangat penting dalam sistem pengelolaan sampah yang memiliki manfaat dalam menangani limbah sehingga meminimalkan efek lingkungan dari timbunan sampah. Komponen dari TPA dimulai dari pengelolaan, pembuangan

sampah, pembuangan sampah, pengangkutan sampah, penimbangan sampah, dan pencatatan data (Bachtiar *et al.*, 2015).

c. Pengelolaan Sampah

Pengelolaan sampah merupakan suatu kegiatan yang memiliki tahapan yang terstruktur dan berkepanjangan seperti pengurangan dan pengelolaan sampah, proses ini tidak hanya membutuhkan peran dari pengelola sampah tetapi juga masyarakat dan pemerintah (Faizah, 2008). Tujuan dari pengelolaan sampah dibagi berdasarkan jangka pendek mengurangi jumlah sampah, meningkatkan kesehatan masyarakat dan lingkungan yang bersih dan jangka panjang mengubah perilaku masyarakat, mewujudkan kota berkelanjutan nilai ekonomi yang berasal dari sampah (Ismail, 2019).

d. Penduduk

Penduduk merupakan orang yang hidup secara berkelompok di satu wilayah sehingga mengikat oleh aturan yang berlaku (Wardhana *et al.*, 2020). Karakteristik dari penduduk dapat dibedakan berdasarkan demografi, sosial, dan ekonomi, politik dan lingkungan (Suparman *et al.*, 2022). Menurut jurnal Perencanaan Pembangunan Berbasis Kependudukan tujuan dari studi kependudukan yaitu memahami, menganalisis dan memperkirakan perubahan dari struktur penduduk (Kementrian Lingkungan Hidup, 2014).

e. Sistem Dinamik

Pendekatan sistem dinamik dimulai dari penentuan masalah kemudian mengidentifikasi serta pembuatan model yang bersisi variabel-variabel yang berpengaruh (Adipraja & Islamiyah, 2017) model dapat dimodelkan dengan *Stock and Flow Diagram* (SFD). SFD bertujuan untuk mengidentifikasi jumlah timbulan sampah yang masuk ke TPA Pintu Bosi dalam kurun waktu tertentu, kemudoan model dikembangkan dan disimulasikan dengan bantuan aplikasi. Salah satu aplikasi yang dapat digunakan untuk pemodelan SFD adalah *Vensim PLE x64*.

Metode sistem dinamik juga sering digunakan untuk menganalisis sistem yang memiliki banyak variabel yang saling ketergantungan (Hanif *et al.*, 2024). Proses pembuatan odel sistem dinamik pada penelitian ini berfokus untuk mengidentifikasi dan memodelkan faktor -faktor penyebab timbulan sampah pada TPA Pintu Bosi.

f. Kajian Terdahulu

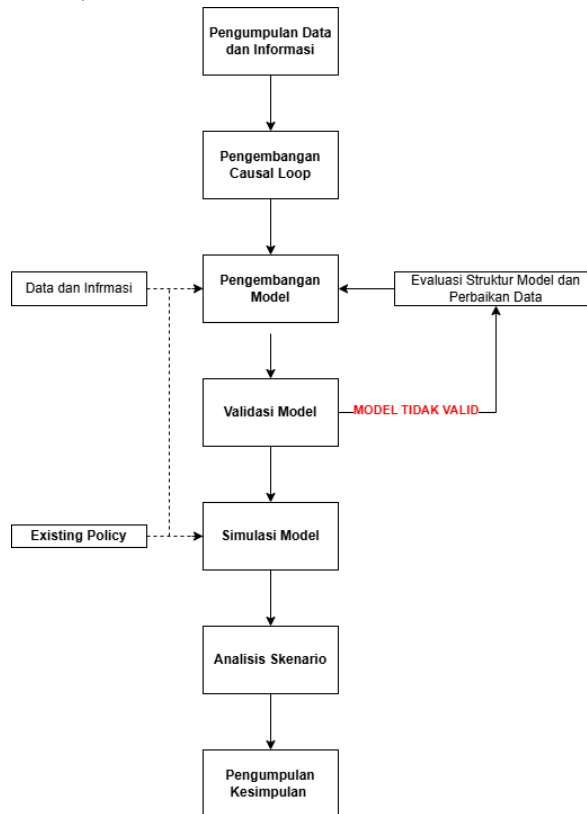
o	Penulis	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
.	(Adipraja & Islamiyah, 2017)	Prediksi Volume Sampah TPAS Talangagung dengan Pendekatan Sistem Dinamik	Prediksi peningkatan volume sampah TPAS Talangagung.	Sistem Dinamik untuk identifikasi dan prediksi volume sampah.	Volume sampah naik dua kali lipat pada 2025 (162 ribu m ² /tahun) dan 2035 (341 ribu m ² /tahun).
.	(Sapulanli <i>et al.</i> ,	Pengelolaan Sampah	Analisis pengelolaan	Literature review,	Skenario optimis

	2023)	Rumah Tangga Berbasais <i>Circular Economy</i> di Tingkat Desa: Pendekatan Sistem Dinamik.	sampah rumah tangga berbasis circular economy di Desa Cibanteng.	purposive sampling, dan Sistem Dinamik.	mengelola 70% sampah, mengurangi emisi CO2 (-39,4 ton/tahun), dan meningkatkan pendapatan rumah tangga.
.	(Chaerul & Kartika, 2021)	Aplikasi Model Sistem Dinamik untuk Evaluasi Skenario Pengelolaan Sampah di Wilayah Pelayanan Tempat Pengolahan dan Pemrosesan Akhir Sampah (TPPAS) Nambo.	Evaluasi skenario pengelolaan sampah di TPPAS Nambo untuk empat kota/kabupaten .	Model Sistem Dinamik dengan 4 skenario: BAU, optimalisasi fasilitas, masterplan, dan Jakstrada.	Skenario o Jakstrada paling optimal, dengan biaya pengolahan per kota bervariasi antara Rp 285.532/ton - Rp 543.345/ton.
.	(Agustia, 2014)	Model Sistem Dinamik Pada Pengembangan Pengelolaan Sampah Kecamatan Gubeng, Kota Surabaya	Menentukan reduksi sampah di Kecamatan Gubeng, Surabaya.	Sistem Dinamik dengan skenario: TPA, Bank Sampah, dan Daur Ulang.	Skenario o Daur Ulang terbaik, reduksi 20,09% sampah pada 2020 dengan penambahan fasilitas komposter dan bank sampah.
.	(Pinha & Sagawa, 2020)	<i>A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management</i>	Solusi manajemen sampah padat melalui sistem dinamik.	Pemodelan Sistem Dinamik dengan identifikasi faktor	Skenario o terbaik ditemukan untuk pengurangan sampah melalui

		<i>and financial analysis</i>		pengelolaan sampah.	strategi pengelolaan.
.	(Hariani & Suprajaka, 2017)	Pemodelan Sistem Dinamis Pengolahan Sampah Secara berkelanjutan di Kelurahan Duri Kupa Jakarta Barat.	Rancang model pengelolaan sampah berkelanjutan di Kelurahan Duri Kupa, Jakarta Barat.	Sistem Dinamik dengan skenario data jumlah sampah dan pengelolaan.	Pengurangan sampah efektif dengan kesadaran masyarakat dan penerapan regulasi.
.	(Surjandari <i>et al.</i> , 2009)	Model Dinamis Pengelolaan Sampah untuk Mengurangi Beban Penumpukan	Model dinamis untuk mengurangi penumpukan sampah di TPA.	Analisis penyebab penumpukan sampah melalui sistem dinamik.	Meningkatkan pemahaman masyarakat terbukti mengurangi volume sampah di TPA.
.	(Nahlawi <i>et al.</i> , 2023)	<i>Sustainable Plastic Waste Management Using a System Dynamics Approach</i>	Rumuska n pengelolaan limbah plastik berkelanjutan.	Sistem Dinamik dengan variabel daur ulang dan produksi plastik.	Daur ulang dan pengurangan penggunaan plastik efektif mengurangi sampah plastik.
.	(Tascón-Hoyos, 2017)	<i>Dynamic Model for Comparing the Performance of Waste Management Strategies over Sustainability Dimensions</i>	Menemukan skenario terbaik untuk pengelolaan sampah berkelanjutan.	Sistem Dinamik dengan aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan.	Aspek lingkungan dan ekonomi lebih baik untuk keberlanjutan dibanding aspek lain.
0.	(Hanif <i>et al.</i> , 2024)	Penerapan Model Sistem Dinamis Pada Sistem Pengelolaan	Merancang model dinamis pengelolaan sampah di TPAS	Sistem Dinamik dengan skenario simulasi dan identifikasi	Skenario kedua lebih baik, dengan 13,97 juta ton sampah dibanding

		Sampah di TPAS Cilowong, Kota Serang	Cilowong, Kota Serang.	masalah.	16,04 juta ton pada 2035.
--	--	--------------------------------------	------------------------	----------	---------------------------

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Metode Penelitian

Pengumpulan data dan informasi melalui studi literatur dan observasi secara langsung, berupa data dari instansi pemerintahan dan hasil penelitian terdahulu. Data tersebut berfungsi untuk menyusun model *Causal Loop Diagram*. Data yang didapat pada penelitian ini ialah pertambahan jumlah laju kelahiran, rualisasi, urbanisasi, depopulasi, jumlah pengguna sampah plastik pertahunnya, jumlah sampah yang tidak plastik, jumlah sampah organik dan non organik serta volume peningkatan sampah per tahunnya. Data berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik.

Pengembangan *Causal Loop*, memiliki arti merancang model setiap variabel yang berhubungan sehingga terjadi hubungan sebab akibat setiap variabelnya. Pada penelitian “Pengolahan Sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Pintu Bosi Menggunakan Metode Sistem Dinamik dengan Model *Stock And Flow Diagram*” pengembangan causal loop memiliki tujuan untuk memahami faktor – faktor yang memiliki hubungan mempengaruhi satu dengan yang lainnya sehingga mempengaruhi volume sampah.

Pengembangan model, setelah pembuatan causal loop, kemudian model tersebut dikembangkan. Model tersebut dinamakan sistem dinamik, dimana model tersebut menggambarkan hubungan antara variabel secara lebih detail, model

tersebut dilakukan perhitungan kuantitatif sehingga diperoleh hasil yang lebih akurat mengenai hubungan antar variabel. Pada penelitian yang dilakukan oleh Adipraja & Islamiyah (2017), model yang dibangun berdasarkan data yang telah didapatkan sebelumnya.

Evaluasi struktur model dan perbaikan data, tahapan ini dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dibuat dan dikembangkan sudah sesuai dengan keadaan yang sebenarnya dan data yang didapatkan. Jika model yang dibuat valid maka dilanjutkan ke tahapan berikutnya, tetapi jika sebaliknya, maka dilakukan perbaikan terhadap model tersebut. Tahapan ini sangat penting bagi penelitian ini, dikarenakan hasil prediksi volume sampah harus sesuai dengan data yang telah didapatkan dan realistis. Validasi model pada tahapan ini memastikan bahwa model bekerja sesuai dengan tujuan awal dan hasil yang didapatkan juga akurat. Pada penelitian ini, proses validasi dilakukan dengan perbandingan prediksi dengan data yang telah didapatkan.

Simulasi model, pada proses ini sudah ditentukan model yang akan digunakan sehingga model tersebut dapat dilakukan simulasi dengan berbagai skenario yang telah dibuat. Pada penelitian ini, dilakukan prediksi volume sampah berdasarkan pertumbuhan penduduk, dan variabel lainnya. Analisis Skenario, setelah simulasi dilakukan, dilanjutkan dengan tahapan analisis. Tahapan analisis dimulai memahami skenario yang mempengaruhi volume sampah. Pengambilan Kesimpulan, berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan berupa rekomendasi yang dapat dilakukan untuk menekan angka pertumbuhan volume sampah.

PENGUMPULAN DAN ANALISIS DATA

a. Pengumpulan data

Pada pengumpulan data yang dikumpulkan oleh peneliti menggunakan studi literatur dan mengutip dari data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). Didapatkan data berupa data jumlah sampah yang masuk, jenis sampah yang masuk, jumlah sampah yang terkelola serta timbulan sampah pada TPA Pintu Bosi. Berikut merupakan data-data yang sudah dikumpulkan untuk membantu penelitian.

Tabel 1. Jumlah Sampah yang Masuk ke TPA Pintu Bosi

SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional			
Tahun	Sampahmasuk (ton/thn)	Sampahmasuk Landfill (ton/thn)	Pencatatan
2023	12.647,25	12.647,25	Manual Book
2022	10.840,50	10.840,50	Manual Book
2021	9.855,00	9.855,00	Manual Book

Tabel 2. Capaian Sampah yang Terkelola di TPA Pintu Bosi

SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional									
Tahun	Kabupaten/ Kota	Timbulan Sampah Tahunan (ton/tahun) (A)	Pengurangan Sampah Tahunan (ton/tahun)(B)	%Pengu- rangan Sampah (B/A)	Penangan- an Sampah Tahunan (ton/tahun) (C)	%Penan- ganan Sampah (C/A)	Sampah Terkelola Tahunan (ton/tahun) (B+C)	%Sampah Terkelola (B+C)/A	Daur ulang Sampah Tahunan (ton/tahun) (D)
2023	Kab. Toba	40.522,11	1.419,12	3,50	15.056,25	37,16	16.475,37	40,66	334,10
2022	Kab. Toba	40.123,08	4.405,66	10,98	14.092,65	35,12	18.498,31	46,10	279,39
2021	Kab. Toba	39.509,06	2.267,11	5,74	11.541,30	29,21	13.808,41	34,95	138,17

Tabel 3. Timbulan Sampah di TPA Pintu Bosi

SIPSN - Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional				
Tahun	Provinsi	Kabupaten /Kota	Timb- ulan Sampah Harian(ton)	Timbul- an Sampah Tahunan(ton)
2021	Su- matera Utara	Kab. Toba	108,24	39.509,06
2022	Su- matera Utara	Kab. Toba	109,93	40.123,08
2023	Su- matera Utara	Kab. Toba	111,02	40.522,11

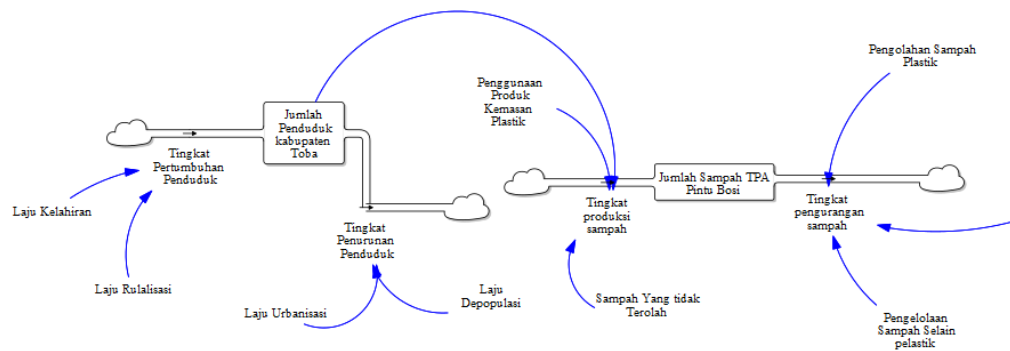
Data-data di atas merupakan data yang diperlukan untuk mengetahui bagaimana bentuk pengaruh dari tiap variabel-variabel yang mengakibatkan timbulan sampah pada TPA Pintu Bosi. Data tersebut akan digunakan pada penggambaran model SFD untuk variabel yang sesuai dengan data. Data yang digunakan berupa rata-rata tiap tahun dalam kurun waktu tiga tahun.

b. Analisis Data

1) Pengembangan *Causal Loop Diagram*

Tahap awal dalam penelitian ini difokuskan pada pengembangan model sistem dinamik untuk memahami hubungan kompleks antara variabel-variabel yang mempengaruhi timbulan sampah di TPA Pintu Bosi. Proses ini diawali dengan pembuatan *Causal Loop Diagram* (CLD) sebagai kerangka konseptual yang memetakan keterkaitan antar variabel yang mempengaruhi dinamika peningkatan sampah. Variabel-variabel tersebut meliputi jumlah penduduk, laju urbanisasi dan ruralisasi, produksi sampah plastik, pengelolaan sampah oleh masyarakat, dan kapasitas TPA. Data yang digunakan untuk membangun model awal diperoleh dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) serta hasil observasi langsung di TPA Pintu Bosi. Data ini mencakup peningkatan jumlah timbulan sampah tahunan, komposisi sampah organik dan anorganik, serta pengurangan sampah melalui upaya daur ulang. Selain itu, data pertumbuhan penduduk seperti laju kelahiran, urbanisasi, dan perpindahan penduduk juga diintegrasikan sebagai variabel penting yang mempengaruhi volume sampah.

Model awal ini dibuat dengan tujuan untuk memahami interaksi dinamis antar faktor penyebab sampah, terutama akibat peningkatan aktivitas masyarakat dan keterbatasan pengelolaan sampah di TPA. Dalam proses ini, variabel-variabel tersebut diidentifikasi sebagai faktor stok dan aliran (flow) yang saling mempengaruhi. Sebagai contoh, peningkatan jumlah penduduk akan menyebabkan peningkatan produksi sampah harian yang berdampak langsung pada kapasitas tampung TPA. Jika tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas pengelolaan, maka tumpukan sampah akan terus meningkat dan berpotensi menimbulkan dampak lingkungan yang serius. Gambar model awal ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang hubungan sebab-akibat dari setiap variabel yang berkontribusi dalam sistem, serta menjadi dasar pengembangan *Stock and Flow Diagram* (SFD) yang lebih kuantitatif.



Gambar 2. Model Awal SFD TPA Pintu Bosi

Gambar penggambaran model awal menggambarkan hubungan antar variabel utama yang mempengaruhi sistem pengelolaan sampah di TPA Pintu Bosi. Model ini menunjukkan keterkaitan antara faktor-faktor produksi sampah dengan kapasitas pengelolaan dan dampaknya terhadap lingkungan.

2) Validasi Model

Validasi merupakan salah satu tahapan yang harus dilakukan pada metode sistem dinamik, pada tahapan validasi model ini dilakukan untuk mengetahui bahwa model yang telah dirancang sudah layak untuk digunakan ditinjau dari segi model yang telah dirancang harus menampilkan kejadian yang sebenarnya agar proses pengidentifikasian, pembuatan skenario lebih spesifik. Hal yang dilakukan pada validasi model ini melalui perhitungan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (Petropoulos *et al.*, 2022). MAPE merupakan tolak ukur dari peramalan yang dirancang dengan mengukur persentase kesalahan dalam peramalan. Fungsi dari MAPE sebagai bahan evaluasi bertujuan untuk memvalidasi model (Petropoulos *et al.*, 2022). Ketentuan agar mendapatkan validasi yang terbaik dengan nilai MAPE kurang dari 10% dikategorikan bahwa model yang telah dirancang memiliki akurasi yang tinggi (Sugawara & Nikaido, 2014). Pengujian MAPE ini dengan menganalisis presentasi perbedaan data aktual volume sampah di TPA Pintu Bosi dengan data yang telah dirancang melalui aplikasi Vensim PLE dari tahun 2021 – 2023 melalui fungsi:

$$MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{\left(\frac{\epsilon_t}{Y_t} \times 100\%\right)}{n}$$

Keterangan:

ϵ_t = Selisih hasil proyeksi timbulan sampah dan data aktual timbulan sampah periode 2021=2023

Y_t = Data aktual timbulan sampah 2021 – 2023

n = Banyak data yang diuji

Melalui fungsi tersebut dilakukan perhitungan menggunakan *tools* microsoft excel, berikut merupakan hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. Validasi Data

	Tahun	Data Proyeksi	Data Aktual	MAPE
1	202	39445	39509,06	4%
2	202	41637	40123,08	
3	202	43829	40522,11	

Berdasarkan perhitungan tersebut hasil MAPE yang didapatkan sebesar 4% dan dapat diambil kesimpulan bahwa model tersebut baik untuk divalidasi dan kategori sangat baik dan sangat diterima yang berarti sistem sesuai dengan keadaan yang sebenarnya.

3) Simulasi Model

Berdasarkan *Causal Loop Diagram* (CLD) yang ditampilkan, model simulasi ini menggambarkan hubungan kausal antara faktor-faktor yang mempengaruhi jumlah sampah plastik di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dan upaya pengelolannya. Diagram ini terdiri dari beberapa variabel utama, seperti tingkat pertumbuhan penduduk, penggunaan produk kemasan plastik, tingkat daur ulang sampah, dan partisipasi masyarakat dalam mengelola sampah. Berikut penjelasan simulasi model yang dapat digambarkan dalam *Causal Loop Diagram* (CLD).

- Tingkat pertumbuhan penduduk mendorong peningkatan jumlah penggunaan produk kemasan plastik, yang pada gilirannya meningkatkan jumlah sampah plastik yang tidak terolah. Peningkatan jumlah sampah plastik ini memperburuk jumlah sampah di TPA. Semakin tinggi jumlah sampah plastik, maka semakin rendah tingkat pengelolaan sampah yang efektif jika tidak diimbangi dengan peningkatan upaya daur ulang atau edukasi masyarakat.
- Terdapat upaya positif untuk mengurangi jumlah sampah melalui pengelolaan sampah plastik, seperti peningkatan tingkat daur ulang dan edukasi masyarakat terhadap pengelolaan sampah. Jika edukasi meningkat, maka partisipasi masyarakat dalam memilah dan mendaur ulang sampah juga akan meningkat. Hal ini membantu mengurangi jumlah sampah yang sampai ke TPA.
- Peningkatan pengelolaan sampah plastik dapat memengaruhi tingkat penanganan sampah dengan lebih baik, yang berpotensi mengurangi sampah

yang tidak terolah. Namun, jika tidak ada perubahan dalam penggunaan produk plastik atau peningkatan kapasitas pengelolaan sampah, maka masalah sampah plastik akan tetap berlanjut seiring dengan pertumbuhan penduduk.

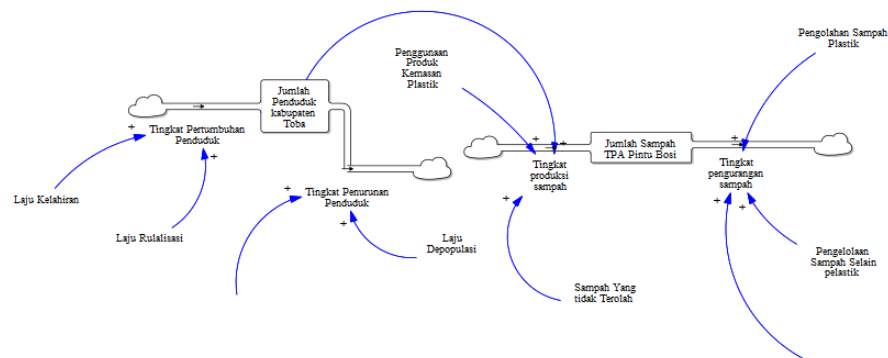
Secara keseluruhan, simulasi ini menyoroti adanya lingkaran penguatan (*reinforcing loop*) dan keseimbangan (*balancing loop*). Lingkaran penguatan menunjukkan bagaimana peningkatan jumlah penduduk dan penggunaan plastik dapat memperparah masalah sampah. Sementara itu, lingkaran keseimbangan muncul melalui upaya pengelolaan sampah dan edukasi masyarakat untuk mengurangi dampak negatif dari peningkatan jumlah sampah plastik. Model ini memberikan gambaran tentang pentingnya strategi berkelanjutan yang mencakup edukasi, pengelolaan sampah yang efektif, dan pengurangan penggunaan produk plastik.

4) Analisis Skenario

Tahapan selanjutnya adalah pembentukan skenario kebijakan yang bertujuan mengevaluasi berbagai solusi potensial dalam mengatasi permasalahan sampah. Skenario ini dirancang berdasarkan hasil analisis hubungan antar variabel dalam CLD dan model awal, dengan mempertimbangkan kondisi riil TPA Pintu Bosi. Pembentukan skenario melibatkan beberapa aspek penting, yaitu:

- **Peningkatan Kapasitas TPA:** Skenario ini berfokus pada peningkatan kapasitas pengelolaan sampah di TPA melalui pembangunan infrastruktur baru atau peningkatan efisiensi fasilitas pengelolaan yang ada. Hal ini penting untuk menampung volume sampah yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk.
- **Program Daur Ulang Sampah:** Skenario ini melibatkan peningkatan partisipasi masyarakat dalam pemilahan sampah dan pengolahan sampah anorganik, khususnya sampah plastik. Dengan adanya program daur ulang, timbunan sampah yang masuk ke TPA dapat dikurangi secara signifikan.
- **Pengurangan Konsumsi Plastik:** Skenario ini melibatkan edukasi dan regulasi untuk mengurangi konsumsi produk berbahan plastik di tingkat rumah tangga dan industri.
- **Peningkatan Peran Masyarakat:** Skenario ini menekankan pentingnya keterlibatan aktif masyarakat dalam pengelolaan sampah, seperti melalui program Bank Sampah atau teknologi pengolahan sampah rumah tangga.

Dengan skenario ini, penelitian bertujuan untuk memahami dampak dari setiap kebijakan yang diterapkan terhadap volume timbunan sampah, kapasitas pengelolaan TPA, serta pengurangan pencemaran lingkungan.

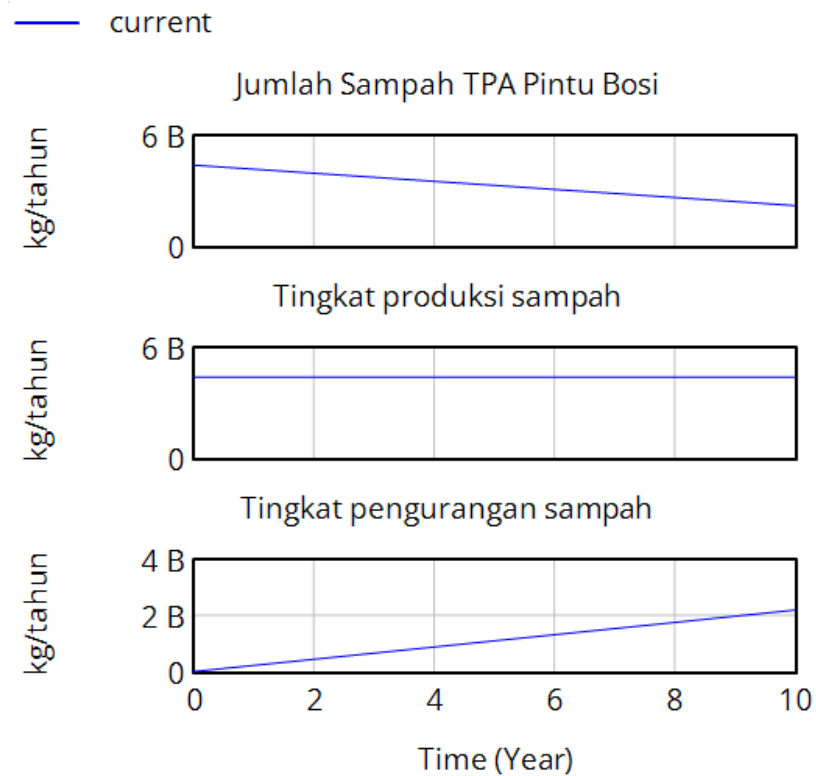


Gambar 3. Skenario SFD TPA Pintu Bosi

Gambar skenario SFD TPA Pintu Bosi menyajikan hasil simulasi dari berbagai kebijakan yang telah dirancang. Hasil ini memberikan gambaran tentang bagaimana setiap skenario dapat mengurangi timbunan sampah dan meningkatkan efisiensi sistem pengelolaan sampah di TPA Pintu Bosi. Beberapa temuan utama dari simulasi skenario antara lain:

- Skenario Peningkatan Kapasitas TPA: Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas TPA dapat menampung volume sampah yang lebih besar dalam jangka pendek, namun tidak menyelesaikan akar masalah peningkatan produksi sampah.
- Skenario Program Daur Ulang Sampah: Skenario ini menunjukkan hasil yang signifikan dalam mengurangi timbunan sampah melalui peningkatan jumlah sampah yang didaur ulang. Program daur ulang memiliki dampak positif terhadap lingkungan dan dapat meningkatkan pendapatan masyarakat melalui pemanfaatan sampah sebagai sumber daya ekonomi.
- Skenario Pengurangan Konsumsi Plastik: Dengan pengurangan konsumsi plastik, volume sampah plastik yang masuk ke TPA dapat ditekan, sehingga mengurangi beban pengelolaan sampah anorganik.
- Skenario Peningkatan Peran Masyarakat: Skenario ini menunjukkan bahwa partisipasi aktif masyarakat dalam pemilahan dan pengelolaan sampah dapat mengurangi jumlah sampah yang masuk ke TPA. Hal ini juga meningkatkan kesadaran lingkungan di kalangan masyarakat.

Secara keseluruhan, simulasi skenario ini memberikan dasar untuk merekomendasikan kebijakan yang paling efektif dalam menekan angka timbunan sampah dan meningkatkan pengelolaan sampah secara berkelanjutan. Dengan menerapkan kombinasi skenario, seperti peningkatan kapasitas TPA, program daur ulang, dan pengurangan konsumsi plastik, diharapkan dapat mengatasi permasalahan sampah di TPA Pintu Bosi secara holistik.



Gambar 4. Grafik SFD TPA Pintu Bosi

Grafik ini menunjukkan kondisi pengelolaan sampah di TPA Pintu Bosi selama periode 10 tahun ke depan. Pada grafik pertama, jumlah sampah di TPA mengalami penurunan secara bertahap dari sekitar 6 miliar kg/tahun hingga mendekati 0 di akhir periode, yang menunjukkan adanya upaya pengurangan atau pemindahan sampah yang efektif. Sementara itu, grafik kedua menunjukkan bahwa tingkat produksi sampah tetap stabil di angka 6 miliar kg/tahun, menandakan bahwa laju produksi sampah tidak mengalami perubahan signifikan akibat pola konsumsi dan pertumbuhan penduduk yang konstan. Di sisi lain, grafik ketiga memperlihatkan adanya peningkatan tingkat pengurangan sampah dari 0 menjadi sekitar 2-3 miliar kg/tahun selama periode yang sama, yang mencerminkan efektivitas strategi pengelolaan sampah seperti program daur ulang, pengolahan sampah, dan partisipasi aktif masyarakat.

Secara keseluruhan, meskipun tingkat produksi sampah tetap stabil, peningkatan pengurangan sampah berkontribusi signifikan terhadap penurunan jumlah timbunan sampah di TPA, sehingga menekankan pentingnya penerapan kebijakan dan upaya pengelolaan sampah yang berkelanjutan untuk mencapai sistem yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menangani permasalahan pengelolaan sampah di TPA Pintu Bosi, Kabupaten Toba, yang menghadapi peningkatan signifikan dalam timbunan sampah setiap tahunnya. Data menunjukkan bahwa jumlah sampah di TPA ini terus bertambah, mencapai lebih dari 40.000 ton pada 2023. Sistem pengelolaan yang ada saat ini belum optimal, di mana seluruh sampah

hanya ditumpuk tanpa pengolahan lebih lanjut, sehingga menimbulkan berbagai masalah lingkungan seperti pencemaran tanah, air, udara, dan bau yang tidak sedap, serta berisiko mengganggu kehidupan masyarakat sekitar. Untuk mengatasi permasalahan ini, penelitian menggunakan pendekatan sistem dinamik dengan model *Stock and Flow Diagram*. Metode ini bertujuan untuk memetakan hubungan antar variabel, seperti pertumbuhan penduduk, urbanisasi, produksi sampah plastik, dan kapasitas pengelolaan TPA, guna memahami faktor penyebab utama peningkatan timbunan sampah. Model ini divalidasi menggunakan data aktual dengan tingkat akurasi tinggi (MAPE sebesar 4%), sehingga dapat diandalkan untuk simulasi dan analisis skenario.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa beberapa strategi, seperti peningkatan kapasitas TPA, pengembangan program daur ulang, pengurangan konsumsi plastik, dan peningkatan partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah, memiliki dampak signifikan terhadap pengurangan timbunan sampah. Misalnya, program daur ulang mampu mengurangi jumlah sampah yang masuk ke TPA sekaligus memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat. Selain itu, pengurangan konsumsi plastik melalui edukasi dan regulasi menunjukkan potensi besar dalam menekan produksi sampah anorganik. Kombinasi dari kebijakan yang terintegrasi dan berkelanjutan, seperti peningkatan infrastruktur, pengelolaan berbasis masyarakat, dan pendekatan edukasi, sangat diperlukan untuk mengatasi permasalahan sampah di TPA Pintu Bosi secara holistik. Langkah-langkah ini diharapkan tidak hanya mengurangi beban lingkungan tetapi juga menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih efektif dan ramah lingkungan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adipraja, P. F. E., & Islamiyah, M. (2017). Prediksi Volume Sampah TPAS Talangagung dengan Pendekatan Sistem Dinamik. *STIKI Informatika Jurnal*.
- Agustia, Y. P. (2014). Model Sistem Dinamik Pada Pengembangan Pengelolaan Sampah Kecamatan Gubeng , Kota Surabaya. *Reduksi Sampah Kecamatan Gubeng Kota Surabaya*, 65–74.
- Bachtiar, H., Hanafi, I., Rozikin, M., Publik, J. A., Administrasi, F. I., & Brawijaya, U. (2015). PENGEMBANGAN BANK SAMPAH SEBAGAI BENTUK PARTISIPASI MASYARAKAT DALAM PENGELOLAAN SAMPAH (Studi Pada Koperasi Bank Sampah Malang). *Jurnal Administrasi Publik (JAP)*, 3(1), 128–133.
- Chaerul, M., & Kartika, I. (2021). Aplikasi Model Sistem Dinamik untuk Evaluasi Skenario Pengelolaan Sampah Di Wilayah Pelayanan Tempat Pengolahan dan Pemrosesan Akhir Sampah (TPPAS) Nambo. *Jurnal Permukiman*, 16(2), 101. <https://doi.org/10.31815/jp.2021.16.101-115>
- Faizah. (2008). Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Berbasis Masyarakat. *Skripsi*, 1–154.
- Hanif, M., Tri, R. B., Wibowo, J., & Shofa, M. J. (2024). Penerapan Model Sistem Dinamis Pada Sistem Pengelolaan Sampah Di TPAS Cilowong , Kota Serang *Application of The Dynamic System Model In Waste Management In The Cilowong Landfills , Serang City*. 88–98.
- Hariani, & Suprajaka. (2017). Pemodelan Sistem Dinamis Pengolahan Sampah

- Secara. *Jurna Planesa*, 8(November), 73–81.
- Ismail, Y. (2019). Pengelolaan Sampah Berbasis Masyarakat. *ACADEMICS IN ACTION Journal of Community Empowerment*, 1(1), 50. <https://doi.org/10.33021/aia.v1i1.742>
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2014). Pedoman Penentuan Daya Dukung dan Daya Tampung Lingkungan Hidup. *Deputi Bidang Tata Lingkungan Kementerian Lingkungan Hidup*, 1–47.
- Nahlawi, M. Al, Al-shihabi, S., & Aydin, R. (2023). *Sustainable Plastic Waste Management Using a System Dynamics Approach*. 792–802. <https://doi.org/10.46254/na07.20220208>
- Petropoulos, F., Apiletti, D., Assimakopoulos, V., Babai, M. Z., Barrow, D. K., Ben Taieb, S., Bergmeir, C., Bessa, R. J., Bijak, J., Boylan, J. E., Browell, J., Carnevale, C., Castle, J. L., Cirillo, P., Clements, M. P., Cordeiro, C., Cyrino Oliveira, F. L., De Baets, S., Dokumentov, A., ... Ziel, F. (2022). Forecasting: theory and practice. *International Journal of Forecasting*, 38(3), 705–871. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.001>
- Pinha, A. C. H., & Sagawa, J. K. (2020). A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122350. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122350>
- Sagune, J. M. (2009). *FAKTOR PEMBENTUK KAPASITAS INDIVIDU DALAM KELEMBAGAAN PENGELOLAAN PERSAMPAHAN DI KOTA TAHUNA KABUPATEN SANGIHE*. 2012.
- Sahil, J., Muhdar, M., Rohman, F., & Syamsuri, I. (2016). Sistem Pengelolaan dan Upaya Penanggulangan Sampah Di Kelurahan Dufa Dufa Kota Ternate. *BIOeduKASI*, 4(2), 478–487.
- Sapanli, K., Putro, F. A. D., Arifin, S. D., Putra, A. H., Andamari, H. A., & Anggraini, U. (2023). Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Berbasis Circular Economy di Tingkat Desa: Pendekatan Sistem Dinamik. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 11(2), 141–155. <https://doi.org/10.14710/jwl.11.2.141-155>
- Sugawara, E., & Nikaido, H. (2014). Forecasting: Principles & Practice. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 58(12), 7250–7257. robjhyndman.com/uwa%5Cnhttp://robjhyndman.com/papers/forecasting-age-specific-breast-cancer-mortality-using-functional-data-models/
- Suparman, S., Tadulako, U., Muzakir, M., Tadulako, U., Wahyuningsih, W., & Tadulako, U. (2022). *Pembangunan kependudukan: teori, konsep dan model empiris* (Issue June).
- Surjandari, I., Hidayatno, A., & Supriatna, A. (2009). Model Dinamis Pengelolaan Sampah Untuk Mengurangi Beban Penumpukan. *Jurnal Teknik Industri*, 11(2), 134–147. <https://doi.org/10.9744/jti.11.2.134-147>
- Tascón-Hoyos, D. (2017). Dynamic Model for Comparing the Performance of Waste Management Strategies over Sustainability Dimensions. *35th International Conference of the System Dynamics Society and 60th Anniversary of System Dynamics Celebration*, 1–27.
- Wardhana, A., Kharisma, B., & Noven, S. A. (2020). Dinamika Penduduk Dan Pertumbuhan Ekonomi Di Indonesia. *Buletin Studi Ekonomi*, February, 22. <https://doi.org/10.24843/bse.2020.v25.i01.p02>

LAMPIRAN

Daftar Rumus dan Units pada Vensim

o	Variabel	Tipe/Jenis	Unit	Formulasi
1	Jumlah Penduduk Kabupaten Toba	Level	Orang	Integ (Tingkat Pertumbuhan penduduk – Tingkat Penurunan Penduduk, 219.148)
	Jumlah Sampah TPA Pintu Bosi	Auxiliary	Kg/Tahun	Tingkat Produksi Sampah – Tingkat Pengurangan Sampah
	Masyarakat yang mengolah sampah ²	Level	Orang	Integ (Jumlah masyarakat yang sadar, 1.000)
	Tingkat Pertumbuhan Penduduk	Auxiliary	Orang/tahun	Laju kelahiran + Laju Rulalisasi
	Laju Kelahiran	Constant	Orang/tahun	6.249
	Laju Rulalisasi	Constant	Orang/tahun	2.1
	Tingkat penurunan penduduk	Auxiliary	Orang/tahun	Laju Depopulasi + Laju urbanisasi
	Laju urbanisasi	Constant	Orang/tahun	9.8
	Laju depopulasi	Constant	Orang/tahun	1.36
0	Penggunaan produk kemasan plastik	Constant	Kg/orang/tahun	1.500
1	Tingkat produksi sampah	Auxiliary	Kg/tahun	Jumlah penduduk kabupaten toba * (Sampah yang tidak terolah + Penggunaan produk kemasan plastik)

2	Sampah yang tidak terolah	Constant	Kg/orang/tahun	5.000
3	Tingkat pengurangan sampah	Auxiliary	n Kg/tahun	Masyarakat yang mengolah sampah ² + pengelolaan sampah selain plastik + pengolahan sampah plastik
4	Pengolahan sampah plastik	Constant	n Kg/tahun	10000
5	Pengelolaan sampah selain plastik	Constant	n Kg/tahun	5.000
6	Jumlah masyarakat yang sadar	Auxiliary	Orang/(Program*tahun)	Masyarakat yang mengolah sampah
7	Masyarakat yang mengolah sampah	Auxiliary	Orang/(Program*tahun)	Edukasi terhadap masyarakat pengolahan sampah * Jumlah penduduk kabupaten toba * 0.0001
8	Edukasi terhadap masyarakat pengolahan sampah	Auxiliary	n Rp/tahun	Jumlah dana untuk mengolah sampah
9	Jumlah dana untuk mengolah sampah	Constant	n Rp/tahun	10.000.000