

DOI <http://dx.doi.org/10.36722/sst.v10i1.3316>

# Evaluasi Pengelolaan Sampah Menggunakan Pemodelan Sistem Dinamis di Kabupaten Ponorogo

Lu'lu' Luthfiyana Labibah<sup>1</sup>, Muhammad Almaududi Pulungan<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Teknik Industri, Fakultas Rekayasa Industri, Universitas Telkom  
Jl. Telekomunikasi, Kota Bandung, 40257.Penulis untuk Korespondensi/E-mail: [almaududi@telkomuniversity.ac.id](mailto:almaududi@telkomuniversity.ac.id)

**Abstract** – Existing waste management policy in Ponorogo Regency has not been able to achieve the expected target. Understanding the dynamics of the process is necessary to evaluate the current policy for further improvement. Therefore, this study aims to develop a system dynamic model to evaluate the waste management performance in Ponorogo Regency. This study uses Dynamic System Simulation Design to model the waste management through Causal Loop Diagram (CLD) and Stock Flow Diagram (SFD). This research relies on primary data and secondary data, to develop a model that includes 50 variables across three subsystems: Waste Generation, Waste Management, and Waste Management Costs. The simulation results show four waste management scenarios: Business as Usual (BaU), Education Improvement, Facility Improvement, and a Moderate Combined Education-Facility. The Moderate Combined scenario is selected as the best recommendation, which is projected to achieve 94% waste management by 2026, with high investment level but positive long-term impacts. In addition, simultaneous improvements in facilities and public education are necessary to effectively address the waste management issues in Ponorogo, with a focus on enhancing infrastructure and increasing public participation.

**Abstrak** - Kebijakan pengelolaan sampah yang ada di Kabupaten Ponorogo belum mampu mencapai target yang diharapkan. Memahami dinamika proses diperlukan untuk mengevaluasi kebijakan yang ada saat ini untuk perbaikan lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sistem dinamis kinerja pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo. Penelitian ini menggunakan Desain Simulasi Sistem Dinamis untuk memodelkan pengelolaan sampah melalui Causal Loop Diagram (CLD) dan Stock Flow Diagram (SFD). Penelitian ini mengandalkan data primer dan data sekunder untuk memodelkan pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo. Melalui pengumpulan data primer dan sekunder, penelitian ini merancang model yang mencakup 50 variabel dalam tiga subsistem: Timbulan Sampah, Pengelolaan Sampah, dan Biaya Pengelolaan Sampah. Hasil simulasi menunjukkan empat skenario pengelolaan sampah: Business as Usual (BaU), Peningkatan Edukasi, Peningkatan Fasilitas, dan Gabungan Edukasi-Fasilitas. Skenario Gabungan Moderat dipilih sebagai rekomendasi terbaik, yang diproyeksikan mencapai 94% pengelolaan sampah pada tahun 2026, dengan investasi tinggi tetapi dampak positif jangka panjang. Kesimpulannya, peningkatan fasilitas dan edukasi masyarakat secara bersamaan diperlukan untuk mengatasi permasalahan pengelolaan sampah di Ponorogo secara efektif, dengan fokus pada peningkatan infrastruktur dan partisipasi masyarakat.

**Keywords** - Causal Loop Diagram, Simulation, Stock Flow Diagram, Waste Management.

## PENDAHULUAN

Seiring dengan peningkatan populasi dan konsumsi manusia, jumlah sampah terus mengalami peningkatan dan telah menjadi masalah di banyak negara, termasuk Indonesia [1].

Berdasarkan data yang dihimpun Badan Pusat Statistik (BPS), pada tahun 2023 jumlah penduduk Indonesia mengalami peningkatan sebesar 1,06% dari tahun 2022 yaitu sebanyak 278,69 juta penduduk pada pertengahan tahun. Hal ini sejalan

dengan meningkatnya jumlah timbunan sampah di Indonesia.

Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Indonesia menghasilkan 37,37 juta ton timbunan sampah sepanjang 2022 [2], namun data SIPSN KLHK ini belum menggambarkan volume total sampah nasional. Hal ini disebabkan data timbunan sampah yang tercatat pada tahun 2022 hanya berasal dari 321 kabupaten/kota, sementara Indonesia memiliki total 514 kabupaten/kota. Oleh karena itu, jumlah timbunan sampah yang sebenarnya bisa jauh lebih besar dari yang dilaporkan.

Masalah sampah di Indonesia menjadi isu serius karena peningkatan jumlah sampah tidak sebanding dengan kualitas pengelolannya [3]. Tantangan yang dihadapi meliputi biaya, sumber daya manusia, sarana dan prasarana, penegakan hukum serta partisipasi masyarakat [4]. Tingkat ketidakpedulian terhadap pengelolaan sampah terlihat dalam Indeks Perilaku Ketidakpedulian Lingkungan Hidup (IPKLH) dengan skor 0,72, terutama di Jawa Timur dan Jawa Tengah yang mencapai 0,75 [5].

Penelitian Jambeck [6] menyatakan Indonesia sebagai negara kedua terbesar penyumbang sampah plastik ke laut setelah Tiongkok, yang berpotensi menyebabkan pencemaran air. Data KLHK tahun 2022 menunjukkan bahwa 65,83% sampah di Indonesia masih dibuang ke TPA dan berpotensi menyebabkan pencemaran tanah [7]. Metode pembuangan sampah terbuka di TPA dan pembakaran sampah juga menyumbang emisi gas rumah kaca, menyebabkan pencemaran udara [8].

Pemerintah Republik Indonesia melalui Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional (Jakstranas) Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga menetapkan target 100% pengelolaan sampah dengan rincian pengurangan sampah sebesar 30% dan penanganan sampah sebesar 70% pada akhir tahun 2025. Pemerintah provinsi dan pemerintah kabupaten/kota berkewajiban menyusun Kebijakan dan Strategi Daerah (Jakstrada) bidang persampahan di daerahnya masing-masing dengan berpedoman pada Jakstranas Persampahan, tak terkecuali Kabupaten Ponorogo.

Kabupaten Ponorogo merupakan wilayah administratif yang terletak di Jawa Timur serta

mempunyai wilayah seluas 1.371,78 km<sup>2</sup>. Wilayah ini berbatasan dengan Kabupaten Madiun, Magetan dan Nganjuk di sebelah utara, Kabupaten Tulungagung dan Trenggalek di sebelah timur, Kabupaten Pacitan di sebelah selatan, serta Kabupaten Pacitan dan Wonogiri (Jawa Tengah) di sebelah barat [9]. Melalui Peraturan Bupati Ponorogo Nomor 78 Tahun 2018 Tentang Kebijakan dan Strategi Kabupaten Ponorogo Dalam Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, pemerintah daerah menetapkan target dalam pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo.

Berdasarkan informasi pada situs SIPSN, dalam empat tahun terakhir, Kabupaten Ponorogo masih belum dapat mencapai target yang ditetapkan. Pada tahun 2023, target yang ditetapkan pemerintah yaitu pengelolaan sampah sebesar 99%. Sedangkan realisasi pengelolaan sampah hanya sebesar 84,53% [2]. Meskipun mengalami peningkatan dari 2 tahun sebelumnya, tetapi angka tersebut masih perlu ditingkatkan.

Model simulasi sistem dinamis sebagai alat yang relevan untuk analisis skenario dapat membantu manajer dalam pengambilan keputusan dan penerapan kebijakan pengelolaan sampah padat [10]. Simulasi sistem dinamis memungkinkan analisis perilaku sistem menyeluruh, mempertimbangkan elemen-elemen dalam sistem yang saling berinteraksi. Simulasi sistem dinamis mampu mengeksplorasi berbagai variabel dan kompleksitas sistem, memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat serta responsif terhadap perubahan lingkungan yang dinamis [11]. Kollikkathara *et al.* [10] dalam penelitiannya menyebutkan, karena perencanaan pengelolaan sampah padat sangat berurusan dengan berbagai komponen yang saling berhubungan, maka memahami sifat dinamis interaksi komponennya menjadi semakin penting.

Penelitian terdahulu telah berhasil memanfaatkan pendekatan sistem dinamis untuk mengoptimalkan pelayanan pengelolaan sampah di Kota Depok, yang menghasilkan rekomendasi kebijakan penting bagi pemerintah daerah dalam mereduksi sampah yang dikirim ke TPA [12]. Penelitian lain menggunakan pendekatan yang sama untuk menyusun kebijakan pengelolaan sampah rumah tangga berbasis ekonomi sirkular yang berkelanjutan di Desa Cibanteng, dan menghasilkan rekomendasi skenario dengan sampah terkelola mencapai 70%, pengurangan timbunan sampah rumah tangga, pengurangan emisi dan peningkatan pendapatan rumah tangga. Selain itu,

penelitian lain juga menggunakan sistem dinamis untuk mengurangi beban penumpukan sampah di TPA, dengan rekomendasi skenario pengurangan sampah sebesar 48,336% dan perpanjangan umur zona *landfill* hingga 18 tahun [13]. Dengan merujuk indikasi keberhasilan tersebut, penelitian ini bermaksud menggunakan metode sistem dinamis untuk memahami proses dinamis dari pengelolaan sampah dengan fokus untuk meningkatkan capaian pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo. Masyarakat di Kabupaten Ponorogo umumnya masih mengolah sampah rumah tangganya dengan cara dibakar, dan sarana Lokasi pengolahan sampah juga masih terbatas dan distribusinya belum merata di seluruh wilayah.

## METODE

### Desain, tempat dan waktu

Penelitian ini menggunakan Desain Simulasi Sistem Dinamis untuk memodelkan pengelolaan sampah melalui *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock Flow Diagram* (SFD). Validasi dilakukan dengan membandingkan data simulasi dan data historis menggunakan Uji *Mean Comparison* dan *Error Variance*. Tempat penelitian adalah Kabupaten Ponorogo, dengan data primer yang diperoleh melalui wawancara dengan Kepala Pengelolaan Sampah Dinas Lingkungan Hidup, serta data sekunder dari SIPSN dan BPS. Penelitian berlangsung dari Maret 2024 hingga Agustus 2024.

### Pengambilan Data

Penelitian ini mengandalkan data primer dan data sekunder untuk memodelkan pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo. Data primer dikumpulkan melalui wawancara dengan Kepala Bagian Pengelolaan Sampah Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Ponorogo, yang memberikan informasi terkait kebijakan dan kondisi pengelolaan sampah di wilayah tersebut. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari Sistem Informasi Pengolahan Sampah (SIPSN) tahun 2024 dan Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2019 hingga tahun 2023, serta hasil riset penelitian sebelumnya.

### Pengolahan dan Analisis data

Simulasi sistem dinamis digunakan untuk membangun simulasi guna meningkatkan capaian pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo. Tahap awal perancangan model sistem dinamis yaitu mendefinisikan masalah yang akan diselesaikan. Kemudian merancang struktur utama model dengan *Causal Loop Diagram* (CLD), yang

menggambarkan hubungan sebab-akibat antar komponen sistem. Selanjutnya *Stock Flow Diagram* (SFD) dibuat berdasarkan CLD yg telah dibuat sebelumnya. Perancangan SFD melalui proses memasukkan data dan informasi ke dalam sistem simbol dinamika seperti *level*, *rate* dan *auxiliary*. Kemudian model dievaluasi dan diuji melalui tahap validasi dengan membandingkan data simulasi dengan data historis. Validasi dilakukan menggunakan dua uji, yaitu *mean comparison* dan *error variance* [14]. *Mean Comparison*, untuk melihat persentase *error* dalam *mean*, dilakukan dengan rumus (1).

$$E_1 = \frac{|\bar{S}-\bar{A}|}{\bar{A}} \quad (1)$$

Dimana,

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (2)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (3)$$

Keterangan:

$\bar{A}$  = Nilai rata-rata data

$\bar{S}$  = Nilai rata-rata hasil simulasi

N = Jumlah Data / Periode

Model dianggap valid jika  $E_1 \leq 5\%$

% *Error Variance*, pada persamaan (1) untuk melihat persentase *error* dalam variasi.

$$E_2 = \frac{|S_S - S_A|}{S_A} \quad (4)$$

Dimana,

$$S_S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (S_i - \bar{S})^2} \quad (5)$$

$$S_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (A_i - \bar{A})^2} \quad (6)$$

Keterangan:

$S_S$  = Standar Deviasi Model

$S_A$  = Standar Deviasi Data

N = Jumlah Data / Periode

Model dianggap valid jika  $E_2 \leq 30\%$

Setelah model dianggap valid, kemudian dirancang skenario-skenario alternatif untuk meningkatkan capaian pengelolaan sampah. Hasil dari simulasi tersebut kemudian dianalisis untuk menentukan skenario terbaik rekomendasi kebijakan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

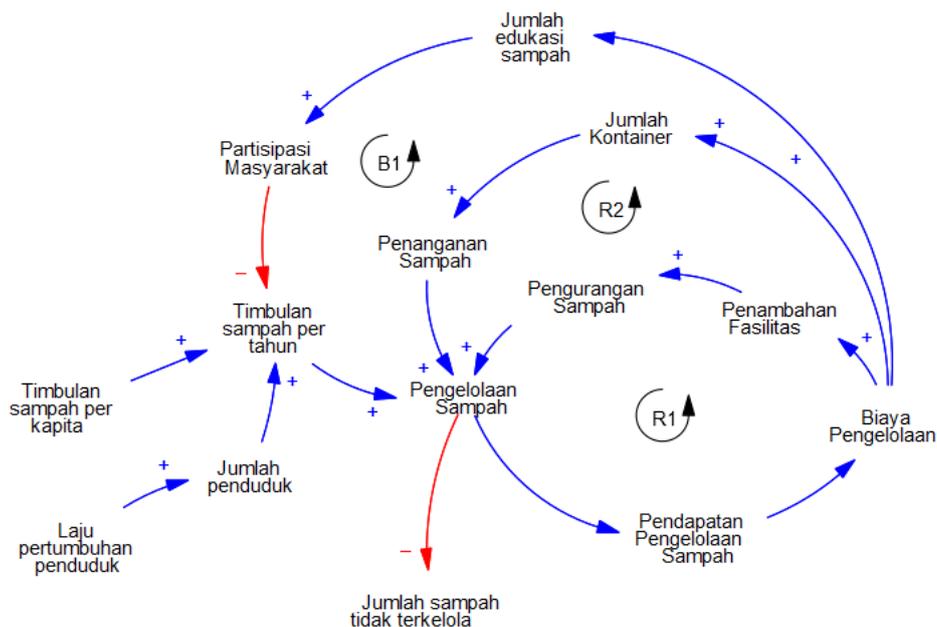
### Perancangan Model Simulasi

Dalam sistem pengelolaan sampah, sampah timbul dari aktivitas manusia. Dengan semakin banyak manusia yang tinggal di suatu daerah, semakin banyak juga timbulan sampahnya. Meningkatnya timbulan sampah harus diiringi dengan kebijakan pengelolaan sampah yang kuat untuk meminimalkan risiko buruk yang disebabkan oleh sampah. Kebijakan yang dirancang terdiri dari edukasi masyarakat yang bertujuan untuk meningkatkan pemahaman masyarakat mengenai pengelolaan sampah serta kebijakan dalam peningkatan fasilitas pengelolaan sampah. Dengan merancang strategi yang efektif, khususnya strategi mengenai edukasi masyarakat serta pengembangan fasilitas pengelolaan sampah, kebijakan yang ditetapkan sebaiknya dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas pengelolaan sampah. Pengelolaan sampah terdiri dari pengolahan sampah yang menghasilkan nilai jual, sehingga meningkatkan pendapatan pengelolaan sampah. Dengan mempertimbangkan biaya tambahan yang harus dikeluarkan, pendapatan yang diperoleh serta peningkatan capaian pengelolaan sampah, perancangan model simulasi sistem dinamis diharapkan menghasilkan rekomendasi strategi yang dapat diterapkan

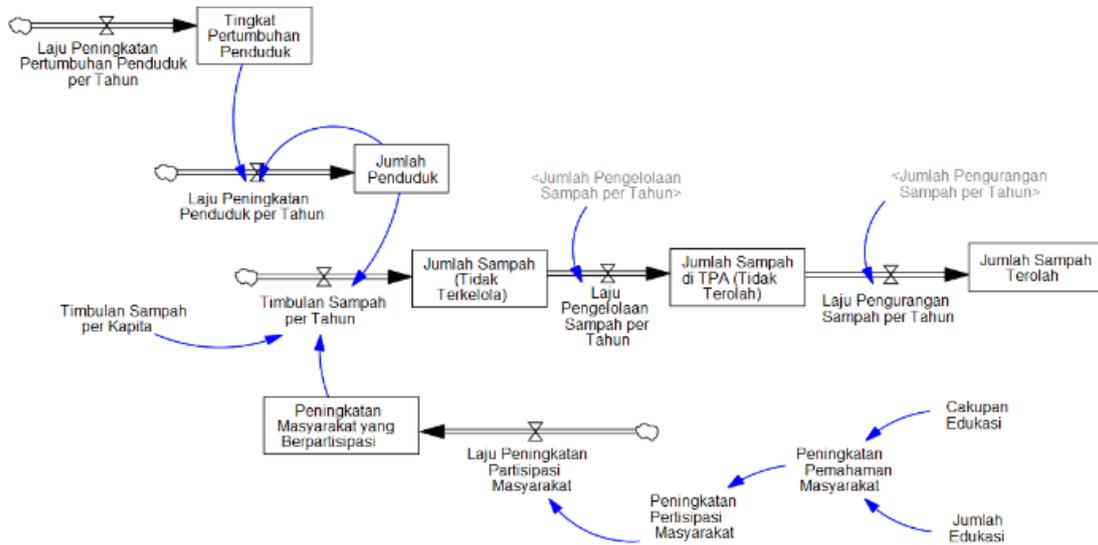
Pemerintah Kabupaten Ponorogo dalam pengelolaan sampahnya.

*Causal loop diagram* pada Gambar 1, menggambarkan hubungan antara berbagai faktor dalam sistem pengelolaan sampah. Ketika jumlah penduduk bertambah, timbulan sampah juga cenderung meningkat. Timbulan sampah yang meningkat memerlukan peningkatan dalam pengelolaan sampah. Jika pengelolaan sampah tidak memadai, jumlah sampah yang tidak terkelola akan meningkat. Jika sampah tidak dikelola dengan baik, dapat mengurangi keefektifan pengelolaan sampah, yang pada gilirannya dapat menyebabkan peningkatan masalah sampah di masyarakat.

*Reinforcing loops* (R1 dan R2) menunjukkan, untuk meningkatkan pengelolaan sampah, diperlukan penambahan fasilitas dan kontainer. Dengan meningkatnya fasilitas dan kontainer, biaya pengelolaan sampah juga meningkat tetapi membantu dalam meningkatkan pengelolaan sampah dan mengurangi jumlah sampah yang tidak terkelola. Peningkatan biaya ini juga diimbangi dengan peningkatan pendapatan dari pengelolaan sampah yang juga meningkat. Sedangkan *Balancing loop* (B1) berfungsi untuk menstabilkan sistem dengan mengurangi timbulan sampah melalui peningkatan partisipasi masyarakat.



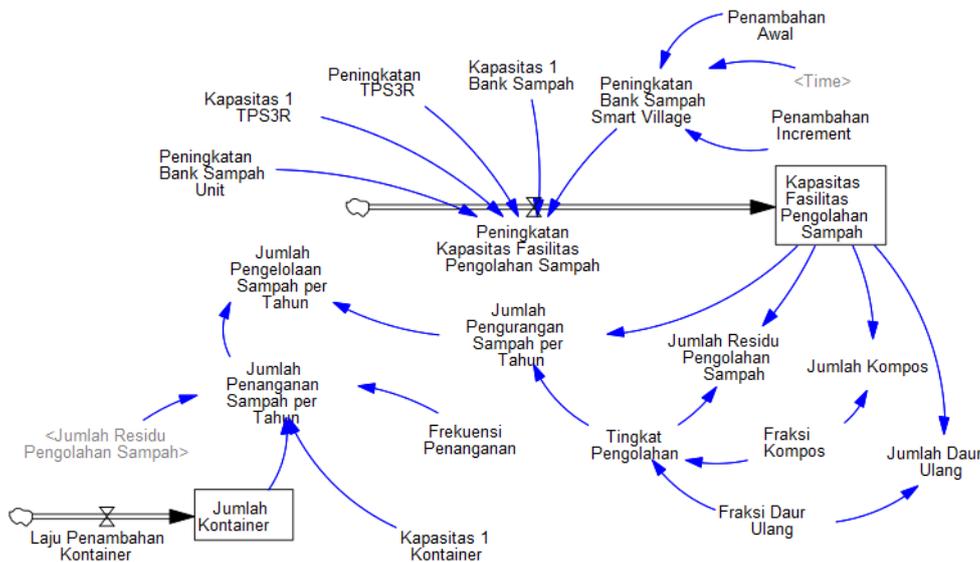
Gambar 1. Causal Loop Diagram Sistem Pengelolaan Sampah



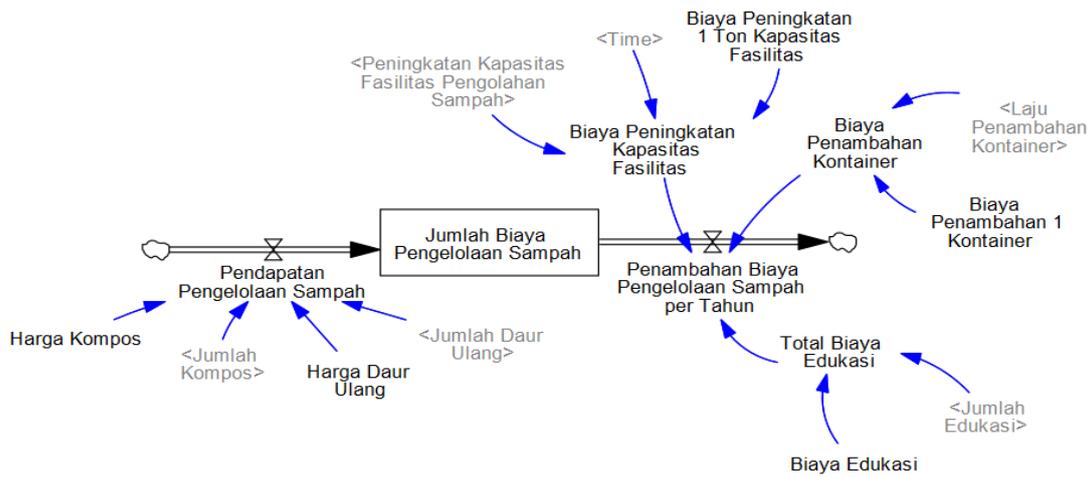
Gambar 2. Stock Flow Diagram Subsistem Timbulan Sampah

Stock Flow Diagram (SFD) timbulan sampah pada Gambar 2, menggambarkan dinamika pengelolaan sampah yang dipengaruhi oleh pertumbuhan penduduk, dengan stock utama meliputi jumlah penduduk, timbulan sampah, sampah terkelola, sampah tidak terkelola, sampah terolah dan sampah yang dibawa ke TPA. Flow dalam diagram ini mencakup laju peningkatan populasi, timbulan sampah, pengelolaan sampah dan pengurangan sampah per tahun. Pertumbuhan populasi meningkatkan timbulan sampah berdasarkan jumlah penduduk dan sampah per kapita. SFD ini memberikan pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi timbulan sampah, seperti pertumbuhan penduduk dan partisipasi masyarakat serta membantu merumuskan strategi pengelolaan yang lebih efektif, dengan fokus pada edukasi dan keterlibatan masyarakat.

Stock Flow Diagram subsistem pengelolaan sampah pada Gambar 3, menggambarkan dinamika pengelolaan sampah yang dipengaruhi oleh pengurangan dan penanganan sampah. Pengurangan sampah terkait dengan peningkatan kapasitas fasilitas pengolahan seperti Tempat Pengolahan Sampah Reuse, Reduce, dan Recycle (TPS3R) dan bank sampah, yang meningkatkan jumlah pengolahan sampah, residu pengolahan, produksi kompos dan daur ulang. Penanganan sampah dipengaruhi oleh jumlah kontainer dan frekuensi pengangkutan sampah. Peningkatan kapasitas fasilitas ini mengurangi residu yang tidak terkelola dan meningkatkan penanganan sampah, mendorong strategi pengelolaan sampah yang lebih efektif, berkelanjutan dan ramah lingkungan.



Gambar 3. Stock Flow Diagram Subsistem Pengelolaan Sampah



Gambar 4. Stock Flow Diagram Subsystem Biaya Pengelolaan Sampah

Gambar 4 menggambarkan interaksi antar variabel yang mempengaruhi biaya pengelolaan sampah, seperti biaya peningkatan kapasitas fasilitas, penambahan kontainer dan biaya edukasi, yang semuanya berkontribusi terhadap total biaya pengelolaan sampah per tahun. Peningkatan kapasitas dan kontainer menaikkan biaya, namun pendapatan dari penjualan kompos dan daur ulang dapat membantu menutupi sebagian biaya tersebut. Diagram ini memodelkan bagaimana intervensi, seperti peningkatan fasilitas dan edukasi, mempengaruhi biaya, dengan hasil akhirnya berupa estimasi total tambahan biaya pengelolaan sampah.

Pengujian validasi dilakukan pada variabel jumlah penduduk, timbulan sampah, pengelolaan sampah per tahun, pengurangan sampah per tahun serta penanganan sampah per tahun. Validasi dilakukan dengan membandingkan data asli dengan data simulasi tahun 2020 sampai 2023 karena keterbatasan data yang terdokumentasi. Hasil pengujian validasi model pada setiap variabel ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Validasi Model

Variabel	Mean Comparison	Error Variance	Keterangan
Jumlah Penduduk	0.18%	11.92%	Valid
Timbulan Sampah	0.09%	4.83%	Valid
Pengelolaan Sampah	2.45%	7.63%	Valid
Pengurangan Sampah	2.32%	24.94%	Valid
Penanganan Sampah	0.30%	11.57%	Valid

### Pembahasan

Model dasar dirancang melalui serangkaian proses mulai dari identifikasi masalah, penentuan hipotesis dinamis dan formulasi model melalui diagram *causal loop* dan diagram *stock flow* untuk menggambarkan sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo. Setelah model berhasil dirancang, selanjutnya dilakukan proses verifikasi dan validasi. Proses verifikasi dilakukan melalui literatur penelitian terdahulu serta melalui *Software Vensim* untuk memastikan model sudah sesuai dengan logika sistem dan model dapat dijalankan untuk simulasi.

Hasil verifikasi diperoleh bahwa model yang dirancang sudah memiliki struktur yang relevan dengan permasalahan dan telah memenuhi logika sistem serta dapat dijalankan untuk simulasi. Validasi model dilakukan dengan 2 pengujian *behavior validity*, yaitu *mean comparison* dan *error variance*. Model dikatakan valid apabila dalam uji perbandingan rata-rata (*mean comparison*)  $E1 \leq 5\%$  dan dalam uji perbandingan variasi amplitudo (*error variance*) apabila  $E2 \leq 30\%$  [14]. Pengujian validasi dilakukan pada variabel jumlah penduduk, timbulan sampah, pengelolaan sampah per tahun, pengurangan sampah per tahun serta penanganan sampah per tahun. Hasil *behavior validity* diperoleh, nilai error pada *mean comparison* kurang dari 5% dan nilai error pada *error variance* kurang dari 30% untuk seluruh variabel yang diuji, sehingga model yang dirancang sudah valid.

Hasil simulasi model dasar yang disajikan pada Tabel 2, menjelaskan bahwa dengan strategi dan kondisi eksisting pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo, target 100% pengelolaan sampah baru akan tercapai di tahun 2031. Alternatif-alternatif skenario terdiri dari 4 skenario, yaitu skenario

*Business as Usual* (BaU), skenario peningkatan edukasi, skenario peningkatan fasilitas, serta skenario gabungan peningkatan edukasi dan fasilitas. Skenario tersebut terbagi lagi menjadi skenario pesimis, moderat dan optimis.

Setiap skenario memperlihatkan hubungan antara peningkatan investasi dan pengelolaan sampah, skenario dengan biaya investasi lebih tinggi cenderung menghasilkan persentase pengelolaan yang lebih tinggi, meskipun profit bervariasi tergantung pada pendekatan yang dipilih. Pemilihan skenario yang paling baik tergantung pada prioritas antara masing-masing faktor.

Berdasarkan segi waktu pencapaian dan persentase pengelolaan, skenario edukasi optimis, gabungan moderat, dan gabungan optimis mencapai target tercepat pada 2026. Dengan waktu pencapaian yang sama, skenario gabungan optimis mencapai target persentase pengelolaan tertinggi sebesar 98%. kemudian gabungan moderat sebesar 94% dan edukasi optimis sebesar 93%. Hal ini sejalan dengan biaya investasi yang perlu dikeluarkan, dimana skenario gabungan optimis membutuhkan biaya investasi yang paling besar, kemudian gabungan moderat dan edukasi optimis dengan biaya investasi masing-masing 229,83%, 178,73%, dan 134,12%. Profit yang diperoleh dari ketiga skenario tersebut berkebalikan dengan biaya investasi dan persentase pengelolaan, dimana skenario edukasi optimis memberikan profit yang paling besar, yaitu 79,59%. kemudian skenario gabungan moderat sebesar 60,4%, dan yang paling kecil skenario gabungan optimis sebesar 35,51%.

Berdasarkan persentase pengelolaan yang dicapai pada tahun 2025, skenario gabungan optimis merupakan skenario terbaik dengan persentase pengelolaan tertinggi sebesar 98%, namun hal ini sejalan dengan peningkatan biaya investasi yang tinggi sebesar 229,83% sedangkan profitnya yang paling kecil hanya 35,51%. Skenario ini merupakan pilihan yang baik jika prioritas yang ingin dicapai yaitu persentase pengelolaan yang tinggi, dengan tidak mempertimbangkan biaya yang dikeluarkan atau keuntungan yang diperoleh.

Berdasarkan segi profit, skenario fasilitas optimis menghasilkan profit tertinggi sebesar 108.42 satuan dengan biaya investasi sebesar 195.71 satuan serta mencapai persentase pengelolaan sampah sebesar 94% pada tahun 2027. Skenario ini adalah pilihan yang seimbang antara pengelolaan yang baik, waktu pencapaian yang relatif cepat dan profit yang tinggi. Berdasarkan segi biaya investasi, jika efisiensi investasi menjadi prioritas utama, skenario BaU memiliki biaya investasi paling rendah (100%), tetapi pengelolaan sampah hanya mencapai 90% dan target baru tercapai pada 2031, yang cukup lama dibandingkan skenario lain.

Jika mempertimbangkan 4 faktor secara bersamaan, yang berfokus pada keseimbangan antara peningkatan pengelolaan sampah yang signifikan dengan biaya investasi yang wajar, maka gabungan moderat adalah pilihan yang lebih baik. Skenario ini mampu mencapai 94% pengelolaan pada tahun 2026 dengan investasi yang lebih rendah (178,73%) dibandingkan Fasilitas Optimis yang memiliki capaian target yang sama, serta menghasilkan profit yang cukup (60,4%).

Tabel 2. Hasil Simulasi Alternatif Skenario

Skenario	Tahun tercapai	Pengelolaan 2025 %	Biaya Investasi %	Profit %
BaU	2031	90	100	100
Edukasi Pesimis	2029	91	107,18	96,3
Edukasi Moderat	2027	93	116,16	91,27
Edukasi Optimis	2026	93	134,12	79,59
Fasilitas Pesimis	2028	91	132,15	102,44
Fasilitas Moderat	2027	92	163,57	104,76
Fasilitas Optimis	2027	94	195,71	108,42
Gabungan Pesimis	2027	92	139,33	80,46
Gabungan Moderat	2026	94	178,73	60,4
Gabungan Optimis	2026	98	229,83	35,51

Skenario Gabungan Peningkatan Edukasi dan Fasilitas Moderat menunjukkan beberapa kelebihan yang signifikan bagi Kabupaten Ponorogo dalam upaya pengelolaan sampah. Kelebihan utama dari skenario ini adalah keseimbangan antara efektivitas dan efisiensi biaya. Dengan target pengelolaan sampah mencapai 94% pada tahun 2026, skenario ini menawarkan peningkatan signifikan dalam waktu relatif singkat. Kombinasi antara peningkatan fasilitas pengelolaan sampah dan edukasi masyarakat memberikan pendekatan komprehensif yang memperkuat kapasitas infrastruktur sekaligus mendorong partisipasi aktif masyarakat. Investasi yang dibutuhkan, meskipun signifikan (178,73%), masih lebih rendah dibandingkan beberapa skenario lain, seperti skenario peningkatan fasilitas optimis, yang membuatnya lebih efisien dari segi biaya.

Tantangan yang dihadapi adalah kebutuhan koordinasi yang kompleks antara pembangunan fasilitas dan program edukasi masyarakat. Kabupaten Ponorogo harus mampu mengelola sumber daya manusia, anggaran, serta waktu dengan baik agar kedua elemen ini dapat berjalan seiringan. Edukasi masyarakat yang berkelanjutan juga penting agar perubahan perilaku dalam pengelolaan sampah dapat berlangsung jangka panjang. Tanpa pemahaman dan partisipasi penuh masyarakat, investasi dalam fasilitas mungkin tidak akan memberikan hasil optimal.

Tantangan lain adalah ketersediaan dana dan dukungan kebijakan. Meskipun investasi pada skenario ini lebih rendah dibandingkan beberapa opsi lain, tetap diperlukan anggaran besar. Maka dari itu, Kabupaten Ponorogo perlu menjalin kemitraan dengan pemerintah pusat, sektor swasta atau organisasi internasional untuk pendanaan. Tanpa dukungan finansial dan kebijakan yang kuat, pelaksanaan skenario ini dapat mengalami kendala, sehingga pengelolaan sampah tidak berjalan optimal.

### KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memodelkan sistem dinamis kinerja pengelolaan sampah di Kabupaten Ponorogo, yang terbagi menjadi 3 subsistem utama: timbulan sampah, pengelolaan sampah, dan biaya pengelolaan. Hasil validasi menunjukkan tingkat *error* yang rendah, menjadikan model ini dapat digunakan untuk simulasi sistem nyata.

Terdapat 10 skenario yang dievaluasi, dengan rekomendasi terbaik adalah skenario gabungan peningkatan edukasi dan fasilitas moderat. Skenario ini dipilih karena mencapai target pengelolaan sampah 94% pada tahun 2026, dengan biaya investasi 178,73% dan profit 60,4%. Skenario ini menawarkan keseimbangan optimal antara efektivitas pengelolaan sampah, biaya, dan profit, serta cocok diterapkan di Ponorogo.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Pada bagian ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada narasumber atau penyandang dana riset dan/atau pihak lain yang berperan penting dalam penulisan artikel ini.

### REFERENSI

- [1] D. Simarankir, "Implikasi Hukum Lingkungan terhadap Pengelolaan Limbah Plastik dengan Recycle Waste: Studi Kasus Gunung Sampah TPST Bantargebang.," *Aliansi: Jurnal Hukum, Pendidikan dan Sosial Humaniora*, vol. 1, no. 5, 2024.
- [2] "Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional," Kementerian, September 2024. [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>. [Accessed September 2024].
- [3] Y. Hendra, "Perbandingan sistem pengelolaan sampah di Indonesia dan Korea Selatan: kajian 5 aspek pengelolaan sampah.," *Aspirasi: Jurnal Masalah-masalah Sosial*, vol. 7, no. 1, pp. 77-91, 2016.
- [4] A. E. Kusuma, "Efektivitas Penegakan Hukum Dalam Bidang Pengelolaan Sampah Pada Kawasan Wisata Religi Banten Lama Berdasarkan Peraturan Daerah Kota Serang Nomor 7 Tahun 2021 Tentang Pengelolaan Sampah.," di *Prosiding Seminar Nasional Komunikasi, Administrasi Negara dan Hukum*, 2023.
- [5] Badan Pusat Statistik, Laporan Indeks Perilaku Ketidakpedulian Lingkungan Hidup Indonesia 2018, 2018.
- [6] J. R. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and K. L. Law, "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768-771, 2015.

- [7] “Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan,” Kementerian, 8 Juni 2023. [Online]. Available: <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/7218/dirjen-pslb3-harus-ada-upaya-komprehensif-dari-hulu-ke-hilir-menuntaskan-persoalan-sampah>. [Accessed Juli 2024].
- [8] J. Wahyudi, “Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari pembakaran terbuka sampah rumah tangga menggunakan model IPCC,” *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan Dan IPTEK*, vol. 1, no. 15, pp. 65-76, 2019.
- [9] Badan Pusat Statistik, Statistik Daerah Kabupaten Ponorogo 2023, 2023.
- [10] A. C. H. Pinha and J. K. Sagawa, “A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis,” *Journal of Cleaner Production*, p. 269, 2020.
- [11] L. R. Andhika, “Model sistem dinamis: Simulasi formulasi kebijakan publik [Dynamic system model: Simulation method in formulation public policy],” *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*, vol. 10, no. 1, pp. 73-86, 2019.
- [12] K. Sapanli, F. A. D. Putro, S. D. Arifin, A. H. A. H. A. Putra and U. Anggraini, “Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Berbasis Circular Economy di Tingkat Desa: Pendekatan Sistem Dinamik,” *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, vol. 11, no. 2, 2023.
- [13] T. Parmawati, E. Hernawan and S. Listyarini, “Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah Di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Kabupaten Tana Tidung Dengan Pendekatan System Dynamic: Modeling of the Waste Management System at the Final Processing Site (TPA) in Tana Tidung Regency Using a System Dynamic Approach,” *Media Ilmiah Teknik Lingkungan (MITL)*, vol. 8, no. 1, pp. 17-24, 2023.
- [14] 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, 1989.