© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1386-1398 *ISSN 1829-8907*

Analisis Kebijakan Terintegrasi Pengelolaan Sampah Terhadap Eksistensi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPAS) Manggar Menggunakan Pendekatan Sistem Dinamis

Patricia Ratu Glorya Sinaga*, Muhamad Imron Zamzani, Christopher Davito Prabandewa Hertadi, Faishal Arham Pratikno, dan Ahmad Jamil

Program Studi Teknik Industri, Jurusan Teknologi Industri, Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia; e-mail: ciasinaga14@gmail.com

ABSTRAK

Peningkatan timbulan sampah akibat pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi di Kota Balikpapan memberikan tekanan terhadap kapasitas Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPAS) Manggar. Kondisi ini berpotensi mengurangi umur layanan TPAS apabila tidak diimbangi dengan kebijakan pengelolaan sampah yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi eksistensi TPAS Manggar, membangun model sistem dinamis untuk memprediksi kondisi TPAS dalam berbagai skenario kebijakan pengelolaan sampah, serta memberikan rekomendasi strategi kebijakan yang efektif untuk mempertahankan eksistensi TPAS Manggar. Metode yang digunakan adalah sistem dinamis melalui penyusunan *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock Flow Diagram* (SFD) menggunakan perangkat lunak Vensim dan STELLA. Model disimulasikan pada periode 2022-2045 berdasarkan data historis pengelolaan sampah Kota Balikpapan. Hasil simulasi kondisi *existing* menunjukkan bahwa kapasitas maksimum lahan urug TPAS Manggar sebesar 2.104.413 ton diperkirakan terlampaui pada tahun 2029. Selanjutnya dikembangkan empat skenario kebijakan, yaitu optimalisasi pemilahan dan pengolahan sampah, pengelolaan terintegrasi, pengelolaan berbasis teknologi lanjut, dan skenario kombinasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario kombinasi memberikan kinerja paling optimal di antara skenario yang diuji karena mampu mempertahankan kapasitas lahan urug hingga tahun 2045 dengan jumlah sampah di lahan urug sebesar 480.773,96 ton atau 22,85% dari kapasitas maksimum TPAS. Selain itu, skenario ini tetap menghasilkan potensi gas metana sebesar 5.288.376,42 m^3 yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif bagi masyarakat sekitar apabila dilengkapi sistem penangkapan gas yang memadai. Oleh karena itu, skenario kombinasi direkomendasikan sebagai strategi pengelolaan sampah yang paling efektif untuk mendukung keberlanjutan operasional TPAS Manggar.

***Kata kunci*:** Kebijakan Pengelolaan Sampah, Pengelolaan Sampah Terintegrasi, Sistem Dinamis, *Sanitary Landfill*, TPAS Manggar

ABSTRACT

The increasing generation of municipal solid waste due to population growth and economic activities in Balikpapan City has placed significant pressure on the capacity of the Manggar Final Disposal Site (TPAS Manggar). This condition may reduce the landfill's service life if not supported by effective waste management policies. This study aims to identify the factors influencing the sustainability of TPAS Manggar, develop a system dynamics model to predict its performance under various waste management policy scenarios, and recommend the most effective policy strategy to maintain its long-term sustainability. The study employed a system dynamics approach through the development of a Causal Loop Diagram (CLD) and a Stock Flow Diagram (SFD) using Vensim and STELLA software. The model was simulated for the period 2022-2045 based on historical waste management data from Balikpapan City. The simulation results of the existing condition indicate that the maximum landfill capacity of 2,104,413 tons is projected to be exceeded by 2029. Four policy scenarios were then developed: optimization of waste sorting and processing, integrated waste management, advanced technology-based waste management, and a combined scenario. The simulation results demonstrate that the combined scenario achieved the most optimal performance among the scenarios tested, as it is capable of maintaining landfill capacity until 2045, with accumulated waste reaching only 480,773.96 tons or 22.85% of the maximum landfill capacity. Furthermore, this scenario continues to generate a potential of 5,288,376.42 m^3 of methane gas that could be utilized as an alternative energy source for surrounding communities, provided an adequate gas capture system is in place. Therefore, the combined scenario is recommended as the most effective waste management strategy to support the long-term sustainability of TPAS Manggar.

***Keywords*:** Waste Management Policy, Integrated Waste Management, System Dynamics, Sanitary Landfill, TPAS Manggar

***Citation*:** Sinaga, P. R. G., Zamzani, M. I., Hertadi, C. D. P., Praktino, F. A., dan Jamil, A. (2026). Analisis Kebijakan Terintegrasi Pengelolaan Sampah Terhadap Eksistensi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPAS) Manggar Menggunakan Pendekatan Sistem Dinamis. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1386-1398, doi:10.14710/jil.24.6.1386-1398

1. PENDAHULUAN

Timbulan sampah perkotaan dunia diproyeksikan meningkat 56% hingga mencapai 3,4 miliar ton pada tahun 2050 apabila tidak ada mitigasi yang memadai (UNEP, 2024). Isu ini sejalan dengan target Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya SDG 11 dan SDG 12, serta Peraturan Presiden No. 83 Tahun 2018 yang menargetkan penanganan sampah nasional sebesar 70% pada 2025. Namun demikian, capaian pengelolaan sampah nasional masih jauh dari target tersebut, dengan tingkat pengelolaan baru berkisar 32,58% dan sisanya mencemari sungai, laut, dan lahan terbuka (Espos, 2025; KLHK, 2024).

Kota Balikpapan memiliki posisi strategis dalam perkembangan Ibu Kota Nusantara (IKN) karena berperan sebagai salah satu pusat konektivitas dan aktivitas pendukung kawasan IKN. Dokumen perencanaan IKN menempatkan Bandara Balikpapan sebagai salah satu gateway penting yang mendukung mobilitas menuju IKN, sementara pengembangan kawasan IKN juga diarahkan untuk terintegrasi dengan Balikpapan dan Samarinda dalam suatu ekosistem pertumbuhan ekonomi. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan mobilitas penduduk, aktivitas perdagangan dan jasa, serta aktivitas ekonomi di Balikpapan. Namun, peningkatan aktivitas tersebut tidak serta-merta dapat dinyatakan sebagai penyebab langsung peningkatan timbulan sampah, sehingga penelitian ini menempatkan pembangunan IKN sebagai faktor eksternal yang berpotensi memperkuat tekanan demografis dan ekonomi terhadap sistem pengelolaan sampah Kota Balikpapan.

Tekanan tersebut terlihat dari tren historis timbulan sampah Kota Balikpapan yang meningkat dari 167.397,98 ton per tahun pada 2019 menjadi 197.352,80 ton per tahun pada 2024, atau meningkat sebesar 17,89%. Pada 2025, timbulan sampah kembali meningkat menjadi 201.730,54 ton per tahun. Peningkatan tersebut berlangsung seiring dengan pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi kota. Data BPS juga menunjukkan bahwa perekonomian Kota Balikpapan pada 2024 mencapai Rp153,57 triliun dengan pertumbuhan sebesar 3,23%. Dengan demikian, pembangunan IKN dalam penelitian ini dipandang sebagai konteks eksternal yang dapat memperkuat dinamika penduduk dan aktivitas ekonomi, sedangkan hubungan kuantitatif yang dimodelkan secara langsung dalam sistem adalah pengaruh pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi terhadap timbulan sampah (BPS, 2025).

Berdasarkan kondisi tersebut, peningkatan timbulan sampah menjadi salah satu faktor yang dapat memperbesar tekanan terhadap kapasitas pengelolaan sampah dan TPAS Manggar. TPAS Manggar merupakan fasilitas pemrosesan akhir utama Kota Balikpapan yang telah beroperasi sejak tahun 2002 dengan sistem *sanitary landfill* dan memiliki tujuh zona *landfill*, dengan zona 1–5 telah ditutup, zona 6 masih aktif, dan zona 7 dalam tahap persiapan (Angelina, 2025; Khoirudin, 2022).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan sistem dinamis efektif untuk mengevaluasi skenario pengelolaan sampah, seperti peningkatan kapasitas fasilitas dan kebijakan pengurangan timbulan (Artika & Chaerul, 2020), maupun penerapan circular economy berbasis pemilahan organik-anorganik di tingkat desa (Sapanli dkk., 2023). Akan tetapi, kajian tersebut belum secara khusus mengaitkan kebijakan pengelolaan berdasarkan jenis sampah dengan keberlanjutan operasional Tempat Pemrosesan Akhir di kawasan yang tertekan pertumbuhan populasi dan aktivitas ekonomi seperti Balikpapan akibat pembangunan IKN. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi berbagai faktor yang saling berinteraksi ke dalam satu model sistem dinamis, meliputi pertumbuhan penduduk, aktivitas ekonomi, timbulan sampah, tingkat pemilahan, kapasitas fasilitas pengolahan, keterlibatan *Extended Producer Responsibility* (EPR) dan pihak swasta, penerapan teknologi insinerator, serta kapasitas lahan urug dan produksi gas metana, sehingga pengaruh gabungan dari berbagai kebijakan tersebut terhadap keberlanjutan TPAS dapat dievaluasi secara menyeluruh, suatu integrasi yang belum banyak dijumpai pada penelitian sistem dinamis pengelolaan sampah sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada satu atau dua aspek intervensi. Pendekatan sistem dinamis dipilih karena permasalahan pengelolaan sampah dan keberlanjutan TPAS Manggar memiliki karakteristik dinamis, saling bergantung, dan melibatkan hubungan umpan balik antarvariabel. Pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi dapat meningkatkan timbulan sampah, sedangkan peningkatan pemilahan, kapasitas pengolahan, keterlibatan EPR dan pihak swasta, serta penerapan teknologi pengolahan dapat mengurangi jumlah sampah yang berakhir di lahan urug. Perubahan tersebut selanjutnya memengaruhi kapasitas TPAS dan kondisi pengelolaan sampah pada periode berikutnya, sehingga dampak suatu kebijakan tidak hanya bersifat langsung, tetapi dapat berkembang dari waktu ke waktu. Karakteristik tersebut membuat pendekatan sistem dinamis lebih sesuai dibandingkan pendekatan statis atau metode pengambilan keputusan yang terutama berfokus pada penentuan prioritas alternatif, karena sistem dinamis dapat merepresentasikan hubungan sebab-akibat, umpan balik, akumulasi, serta perubahan perilaku sistem dari waktu ke waktu. Selain itu, pendekatan ini memungkinkan beberapa alternatif kebijakan disimulasikan pada struktur sistem yang sama sehingga dampaknya terhadap jumlah sampah yang masuk ke TPAS, akumulasi sampah di lahan urug, dan keberlanjutan operasional TPAS dapat dibandingkan secara kuantitatif.

Dalam penelitian ini, karakteristik tersebut direpresentasikan melalui *Causal Loop Diagram* (CLD) untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat dan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

mekanisme umpan balik, kemudian diterjemahkan ke dalam *Stock Flow Diagram* (SFD) untuk merepresentasikan akumulasi sampah dan perubahan kapasitas lahan urug. Model selanjutnya digunakan untuk menguji empat skenario kebijakan pada periode 2022–2045.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan (1) mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi eksistensi TPAS Manggar, (2) membangun model sistem dinamis untuk memprediksi kondisi TPAS pada berbagai skenario kebijakan pengelolaan sampah periode 2022-2045, dan (3) merumuskan rekomendasi strategi kebijakan yang paling efektif untuk mempertahankan eksistensi TPAS Manggar.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan sistem dinamis untuk memodelkan keterkaitan antara kebijakan pengelolaan sampah dan keberlanjutan kapasitas TPAS Manggar pada periode 2022-2045. Tahap pendahuluan meliputi observasi lapangan di TPAS Manggar, identifikasi masalah, studi literatur, serta identifikasi variabel utama seperti timbulan sampah, pertumbuhan penduduk, tingkat pemilahan, kapasitas fasilitas pengolahan, dan kapasitas lahan urug. Data primer diperoleh melalui observasi dan wawancara dengan UPTD Manggar dan DLH Kota Balikpapan, sedangkan data sekunder bersumber dari SIPSN, BPS, dan dokumen kebijakan terkait. Variabel penelitian yang digunakan pada penelktian ini ditampilkan pada Tabel 1.

Model konseptual disusun dalam bentuk *Causal Loop Diagram* (CLD) untuk memetakan hubungan sebab-akibat antarvariabel yang membentuk reinforcing loop maupun balancing loop dalam sistem pengelolaan sampah. Model kuantitatif kemudian disusun sebagai *Stock Flow Diagram* (SFD) yang terdiri atas tiga submodel utama, yaitu submodel timbulan sampah, submodel teknis operasional pengolahan sampah, dan submodel Tempat Pemrosesan Akhir dan lahan urug, yang diimplementasikan pada perangkat lunak STELLA.

Model kemudian diverifikasi melalui fitur *Check Units* untuk memastikan konsistensi satuan antarvariabel, serta divalidasi dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data aktual periode 2022-2025 menggunakan uji *Mean Comparison* (E1) dan *Error Variance* (E2) persamaannya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rumus Validasi Hasil Simulasi

Mean Comparison
$E1 = \frac{\lvert \bar{S} - \bar{A} \rvert}{\bar{A}}$
Keterangan:
$\bar{S}$ = Nilai rata-rata hasil simulasi
$\bar{A}$ = Nilai rata-rata data
Model dianggap valid apabila $E1 \leq 5\%$
Error Variance
$E2 = \frac{\lvert Ss - Sa \rvert}{Sa}$
Keterangan:
Ss = Standar deviasi hasil simulasi
Sa = Standar deviasi data
Model dianggap valid apabila $E2 \leq 30\%$

Sumber: Artika & Chaerul, 2020

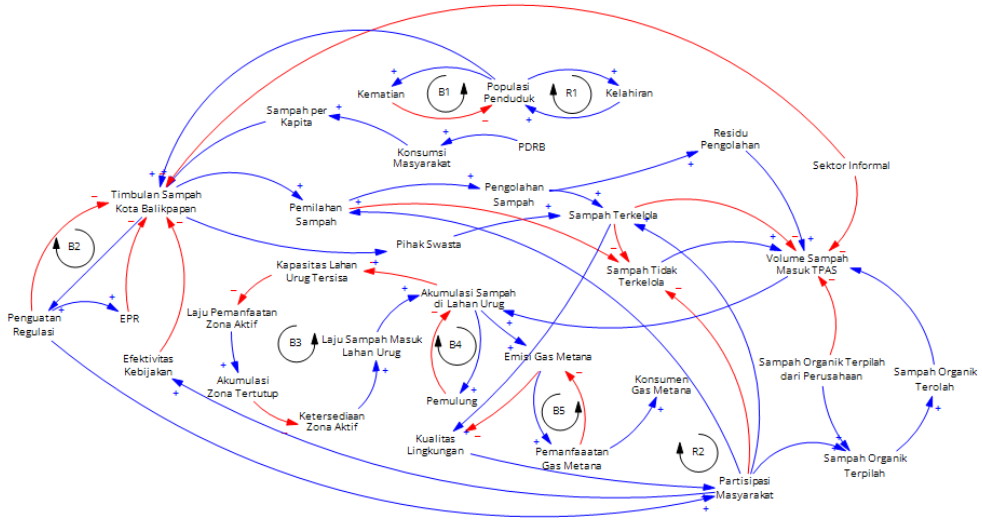
Setelah dinyatakan valid, dilakukan simulasi kondisi *existing* serta empat skenario kebijakan: (1) optimalisasi pemilahan dan pengolahan sampah, (2) pengelolaan terintegrasi melalui EPR dan pihak swasta, (3) pengelolaan berbasis teknologi insinerator, dan (4) skenario kombinasi ketiganya. Efektivitas setiap skenario dievaluasi berdasarkan tiga indikator utama: jumlah sampah masuk TPAS, akumulasi sampah di lahan urug, dan produksi gas metana pada akhir periode simulasi tahun 2045.

Tabel 1. Variabel Penelitian

No	Variabel Penelitian	Nilai Awal	Sumber Data
1	Populasi Penduduk	702.600	BPS
2	PDRB	127.371,53	BPS
3	Pendapatan per Kapita	181.285.980,64	BPS
4	Timbulan Sampah	187.875,03	SIPSN
5	Sampah Tertangani DLH	43.880	SIPSN
6	Sampah Tertangani EPR	0	Wawancara DLH
7	Sampah Tertangani Pijak Swasta	0	Wawancara DLH
8	Sampah Terolah di BSI	286.01	SIPSN
9	Sampah Terolah di BSU	405,24	SIPSN
10	Sampah Terolah di ITF	402,96	SIPSN
11	Sampah Terolah di Komposting Skala Kecil	895,84	SIPSN
12	Sampah Terolah MRF	0	SIPSN
13	Sampah Terolah POO	1.042,86	SIPSN
14	Sampah Terolah Rumah Kompos	3.329,07	SIPSN
15	*Recovery* Material oleh Pemulung	11.366,10	SIPSN
16	Sampah Masuk TPAS	136.792,58	SIPSN
17	Sampah di Lahan Urug	1.920.276,86	SIPSN
18	Kapasitas Lahan Urug TPAS	2.104.413	Review Kajian Masterplan Persampahan Kota Balikpapan

Sumber data diolah menggunakan Microsoft Excel

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP



Gambar 1. *Causal Loop Diagram* Sistem Pengelolaan Sampah Kota Balikpapan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Model Konseptual

Model konseptual disusun untuk memetakan hubungan sebab-akibat antara populasi penduduk, aktivitas ekonomi, timbulan sampah, kapasitas fasilitas pengolahan, serta kapasitas lahan urug TPAS Manggar. Hubungan antarvariabel digambarkan dengan tanda positif (+) untuk hubungan searah dan tanda negatif (-) untuk hubungan berlawanan arah, sehingga teridentifikasi beberapa *reinforcing loop* (Sterman, 2018), seperti pertumbuhan penduduk yang mendorong peningkatan timbulan sampah, serta *balancing loop*, seperti peningkatan pemilahan dan pengolahan sampah yang menekan akumulasi sampah di lahan urug. Struktur CLD secara menyeluruh disajikan pada Gambar 1.

3.2. Model Simulasi

Model konseptual yang telah disusun dalam bentuk *Causal Loop Diagram* (CLD) selanjutnya diterjemahkan ke dalam model kuantitatif berupa *Stock Flow Diagram* (SFD) menggunakan perangkat lunak STELLA 9.0.2. Model simulasi ini dikembangkan untuk merepresentasikan perilaku dinamis sistem pengelolaan sampah Kota Balikpapan serta mengevaluasi pengaruh berbagai alternatif kebijakan terhadap eksistensi Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPAS) Manggar selama periode simulasi tahun 2022-2045. Penyusunan model dilakukan dengan menghubungkan komponen *stock*, *flow*, *converter*, dan *connector* sehingga membentuk suatu sistem yang mampu menggambarkan perubahan kondisi pengelolaan sampah secara berkelanjutan dari waktu ke waktu. Struktur model simulasi secara keseluruhan disajikan pada Gambar 2.

Model simulasi dibangun berdasarkan hubungan sebab-akibat yang dimulai dari dinamika pertumbuhan penduduk dan perkembangan ekonomi Kota Balikpapan sebagai faktor utama yang memengaruhi peningkatan timbulan sampah. Pertumbuhan jumlah penduduk meningkatkan konsumsi masyarakat, sedangkan perkembangan ekonomi mendorong peningkatan aktivitas produksi dan konsumsi, sehingga timbulan sampah terus mengalami kenaikan sepanjang periode simulasi (Kaza *et al*., 2018; Zambrano-Monserrate *et al*., 2021). Timbulan sampah yang dihasilkan kemudian dipisahkan berdasarkan karakteristiknya menjadi sampah organik dan anorganik untuk selanjutnya dialirkan menuju berbagai mekanisme pengelolaan sesuai dengan kondisi sistem yang dimodelkan.

Pada tahap pengelolaan, model merepresentasikan proses pemilahan sampah dari sumber, pengolahan melalui berbagai fasilitas pengelolaan sampah, kontribusi sektor informal melalui aktivitas pemulung, serta implementasi *Extended Producer Responsibility* (EPR) dan keterlibatan pihak swasta dalam mengurangi jumlah sampah yang harus ditangani oleh TPAS Manggar. Kapasitas setiap fasilitas pengolahan, tingkat pemanfaatan fasilitas, serta efektivitas proses pengolahan memengaruhi besarnya sampah yang berhasil dikelola sebelum menjadi residu. Residu yang tidak dapat dimanfaatkan selanjutnya dialirkan menuju TPAS Manggar untuk diproses pada lahan urug menggunakan sistem sanitary *landfill* (Velis *et al*., 2012).

Pada TPAS Manggar, model mensimulasikan dinamika akumulasi sampah di lahan urug dengan mempertimbangkan proses penimbunan residu, pemanfaatan sampah organik, aktivitas *recovery* oleh pemulung, pembentukan gas metana dari proses dekomposisi sampah organik, serta pengurangan sampah melalui penerapan teknologi pengolahan pada skenario tertentu. Interaksi antarproses tersebut membentuk mekanisme *feedback* yang memengaruhi tingkat keterisian lahan urug dan menentukan keberlanjutan operasional TPAS Manggar selama periode simulasi. Hubungan tersebut sejalan dengan penelitian El-Fadel *et al.* (1989) yang

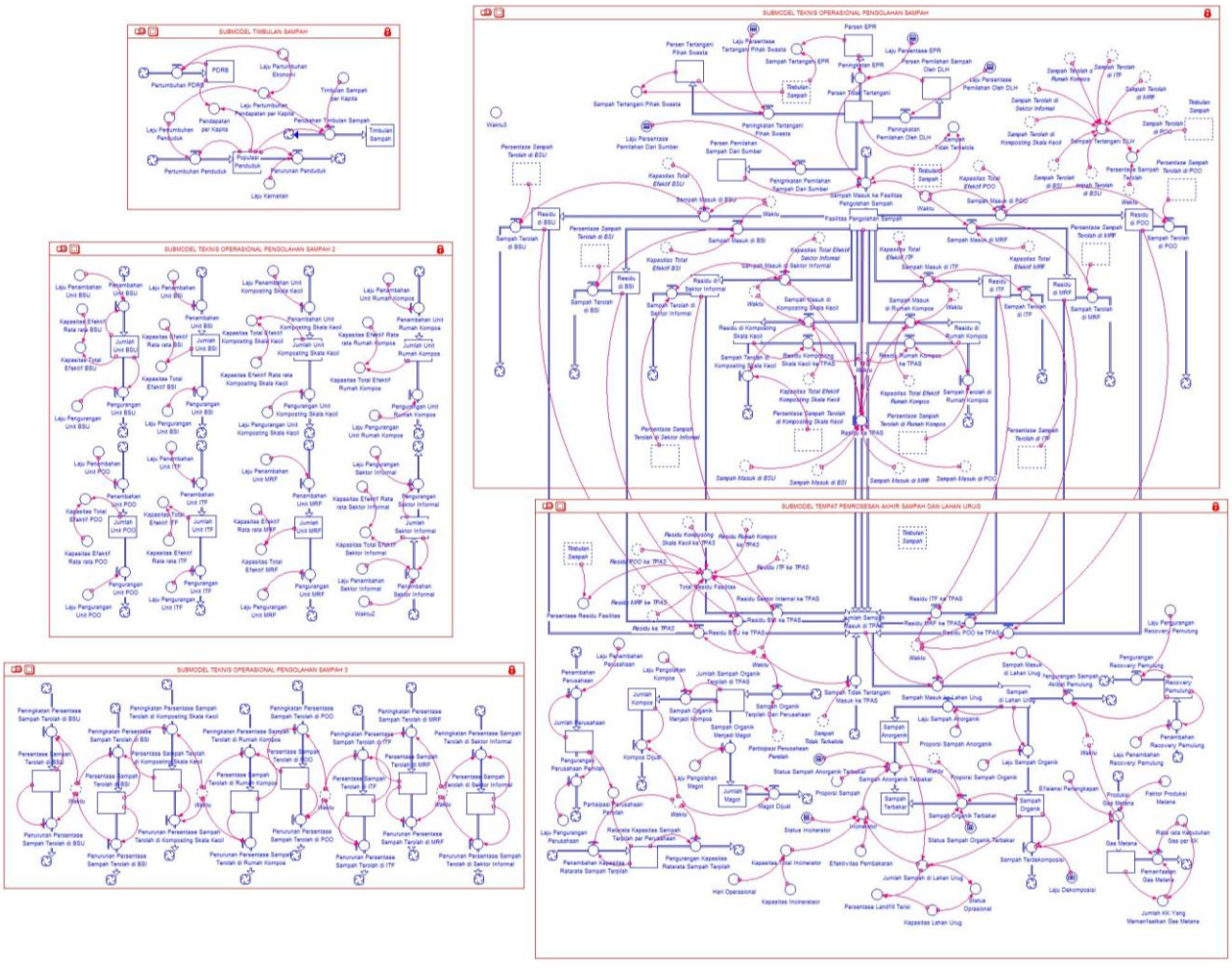
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

menjelaskan bahwa produksi gas metana pada *sanitary landfill* dipengaruhi oleh interaksi antara proses biodegradasi, akumulasi sampah, dan kondisi operasional *landfill*, sedangkan penerapan strategi pengelolaan yang mampu mengurangi jumlah sampah yang ditimbun berkontribusi terhadap pengendalian emisi metana dan peningkatan keberlanjutan operasional *landfill* (Scharff *et al*., 2024). Dengan demikian, perubahan yang terjadi pada satu variabel, seperti peningkatan pemilahan sampah atau kapasitas fasilitas pengolahan, akan memberikan dampak terhadap variabel lainnya hingga akhirnya memengaruhi jumlah sampah yang masuk ke TPAS dan akumulasi sampah di lahan urug.

Secara keseluruhan, model simulasi yang dikembangkan mengintegrasikan aspek kependudukan, ekonomi, teknis operasional pengelolaan sampah, serta kondisi operasional TPAS Manggar ke dalam satu sistem yang saling berinteraksi. Pendekatan ini memungkinkan hubungan timbal balik (*feedback mechanism*) antarvariabel dapat direpresentasikan secara lebih realistis sehingga perilaku sistem dapat diamati dalam jangka panjang. Selain menggambarkan kondisi *existing*, model ini juga berfungsi sebagai alat analisis untuk mengevaluasi berbagai alternatif kebijakan pengelolaan sampah melalui simulasi skenario. Evaluasi dilakukan berdasarkan tiga indikator utama penelitian, yaitu jumlah sampah yang masuk ke TPAS Manggar, jumlah sampah yang terakumulasi di lahan urug, dan produksi gas metana. Ketiga indikator tersebut digunakan sebagai dasar dalam membandingkan efektivitas setiap skenario kebijakan sehingga dapat ditentukan strategi pengelolaan sampah yang paling efektif dalam mempertahankan eksistensi TPAS Manggar.

3.3. Verifikasi dan Validasi Model

Verifikasi model dilakukan melalui fitur Check Units pada STELLA 9.0.2, dengan hasil notifikasi "*all units within your model appear to be consistent*" yang menunjukkan seluruh variabel telah konsisten satuannya dan model bebas dari kesalahan formulasi. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data aktual periode 2022-2025 yang menggunakan interval waktu tahunan (*annual data*) pada kondisi *existing* menggunakan uji *Mean Comparison* (E1) dan *Error Variance* (E2). Model dinyatakan valid apabila nilai E1 di bawah 5% dan E2 di bawah 30% (Artika & Chaerul, 2020). Ringkasan hasil validasi pada beberapa variabel utama disajikan pada Tabel 3.



Gambar 2. *Stock Flow Diagram* Sistem Pengelolaan Sampah Kota Balikpapan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 3 Hasil Validasi Model

Variabel	Satuan	E1 (%)	E2 (%)	Ketengan
Populasi Penduduk	Jiwa	0,0931	5,06	Valid
Timbulan Sampah	Ton	0,8055	28,92	Valid
PDRB	Rp	1,9300	8,96	Valid
Sampah di TPAS	Ton	0,1339	13,10	Valid
Sampah Masuk Lahan Urug	Ton	0,2790	5,45	Valid

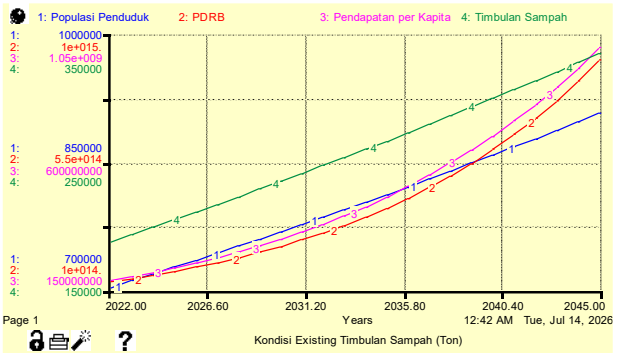
Sumber data diolah menggunakan Microsoft Excel

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data historis pada periode 2022–2025. Periode tersebut dipilih berdasarkan ketersediaan data historis yang konsisten dan dapat dibandingkan untuk variabel utama model, yaitu populasi penduduk, PDRB, timbulan sampah, sampah masuk TPAS, sampah masuk lahan urug, serta beberapa fasilitas pengolahan sampah. Validasi tidak dilakukan terhadap seluruh variabel karena keterbatasan ketersediaan data historis yang berkesinambungan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *Mean Comparison* (E1) dan *Error Variance* (E2) pada variabel yang divalidasi berada dalam batas toleransi masing-masing sebesar ≤5% dan ≤30%, sehingga model dinilai mampu merepresentasikan pola historis sistem pada periode validasi.

Meskipun periode validasi relatif pendek dibandingkan dengan horizon simulasi hingga 2045, periode 2022-2025 dipilih karena merupakan rentang data aktual tahunan yang tersedia secara resmi dan terverifikasi dari SIPSN, BPS, serta dokumen DLH Kota Balikpapan pada saat penelitian dilakukan; data historis pada level kota dengan rincian variabel yang dibutuhkan model (populasi, PDRB, timbulan sampah per jenis, sampah masuk TPAS, dan sampah di lahan urug secara konsisten) tidak tersedia secara lengkap untuk tahun-tahun sebelum 2022. Oleh karena itu, hasil validasi digunakan untuk menguji kesesuaian perilaku model pada kondisi historis sebelum model digunakan untuk simulasi kebijakan. Selanjutnya, hasil simulasi tahun 2026-2045 tidak diposisikan sebagai prediksi kondisi aktual secara pasti, melainkan sebagai proyeksi berbasis skenario yang menggambarkan kemungkinan perilaku sistem apabila asumsi dan kebijakan yang ditetapkan dalam model berlangsung sesuai dengan parameter simulasi. Ketidakpastian yang berasal dari perubahan pertumbuhan penduduk, kondisi ekonomi, timbulan sampah, kapasitas pengolahan, serta implementasi kebijakan di masa mendatang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil simulasi jangka panjang.

3.4. Kondisi *Existing* Pengelolan Sampah

Simulasi kondisi *existing* dijalankan pada perangkat lunak STELLA 9.0.2 selama periode 2022-2045 dengan satuan waktu tahunan (*years*) dan DT sebesar 1, menggunakan data tahun 2022 sebagai kondisi awal sistem, tanpa penambahan kebijakan maupun intervensi apa pun terhadap sistem *existing*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa populasi penduduk Kota Balikpapan meningkat dari 702.600 jiwa pada tahun 2022 menjadi 907.738 jiwa pada tahun 2045, diikuti pertumbuhan PDRB dari Rp127,37 triliun menjadi Rp912,81 triliun serta pendapatan per kapita dari Rp181,29 juta menjadi Rp1,01 miliar pada periode yang sama. Pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi tersebut mendorong kenaikan timbulan sampah secara konsisten dari 187.875,03 ton pada tahun 2022 menjadi 335.687,03 ton pada tahun 2045, tanpa menunjukkan tanda penurunan sepanjang periode simulasi. Grafik kondisi *existing* timbulan sampah dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Kondisi *Existing* Timbulan Sampah

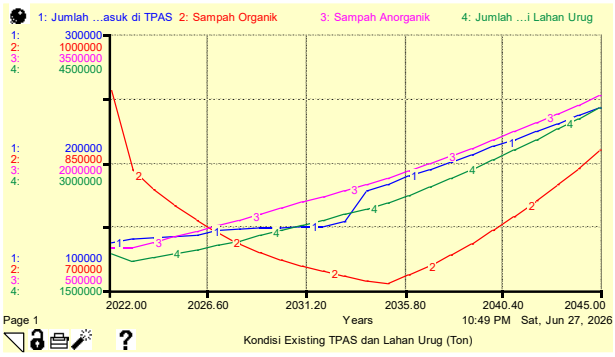
Peningkatan timbulan sampah tersebut menunjukkan pola yang berbanding lurus dengan pertumbuhan PDRB dan populasi penduduk sepanjang periode simulasi. PDRB Kota Balikpapan meningkat dari Rp127,37 triliun pada tahun 2022 menjadi Rp912,81 triliun pada tahun 2045, diikuti pendapatan per kapita yang naik dari Rp181,29 juta menjadi Rp1,01 miliar pada periode yang sama, sedangkan populasi penduduk bertambah dari 702.600 jiwa menjadi 907.738 jiwa. Proyeksi PDRB dalam model menggunakan persamaan pertumbuhan eksponensial dengan laju pertumbuhan tetap sebesar 8,94% per tahun, mengacu pada data pertumbuhan ekonomi Kota Balikpapan tahun 2022 (BPS, 2022) dan diasumsikan konstan sepanjang periode simulasi hingga 2045; nilai PDRB yang digunakan merupakan PDRB atas dasar harga berlaku, konsisten dengan satuan data yang dipublikasikan BPS, sehingga sebagian dari peningkatan nominal turut dipengaruhi oleh faktor inflasi, bukan semata-mata pertumbuhan riil aktivitas ekonomi. Semakin tinggi populasi penduduk dan aktivitas ekonomi, semakin besar pula tingkat konsumsi masyarakat sehingga timbulan sampah yang dihasilkan turut meningkat secara konsisten tanpa menunjukkan tanda penurunan, sejalan dengan temuan Kaza et al. (2018) dan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Zambrano-Monserrate et al. (2021) yang menyatakan bahwa pertumbuhan penduduk dan pendapatan per kapita merupakan determinan utama peningkatan timbulan sampah perkotaan. Hubungan berbanding lurus antara ketiga variabel tersebut mengindikasikan bahwa tanpa adanya intervensi kebijakan pengurangan sampah dari sumber, tekanan terhadap kapasitas pengelolaan sampah Kota Balikpapan akan terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan ekonomi.

Pada teknis operasional, hasil simulasi menunjukkan bahwa penanganan sampah pada kondisi *existing* sepenuhnya bertumpu pada Dinas Lingkungan Hidup (DLH), dengan jumlah sampah tertangani meningkat dari 43.880 ton pada tahun 2022 menjadi 76.963 ton pada tahun 2045. Sementara itu, variabel sampah tertangani oleh *Extended Producer Responsibility* (EPR) dan pihak swasta tercatat bernilai nol sepanjang periode simulasi, yang mengonfirmasi bahwa kedua aktor tersebut belum berkontribusi sama sekali dalam sistem pengelolaan sampah Kota Balikpapan saat ini. Kondisi ini menunjukkan adanya ketimpangan beban pengelolaan, karena peningkatan penanganan oleh DLH masih dibatasi oleh jumlah dan kapasitas unit pengolahan yang tersedia sehingga tidak mampu mengimbangi laju pertumbuhan timbulan sampah yang jauh lebih cepat.

Keterbatasan tersebut tercermin pada jumlah sampah yang masuk ke TPAS, yang meningkat dari 136.792,58 ton pada tahun 2022 menjadi 242.500,98 ton pada tahun 2045. Komposisinya juga bergeser; sampah anorganik yang terakumulasi di lahan urug (komponen kumulatif penyusun total akumulasi lahan urug bersama komponen organik, bukan sampah yang masuk TPAS secara tahunan) meningkat dari 985.870,14 ton menjadi 2.780.076,88 ton. Akumulasi sampah di lahan urug menunjukkan tren peningkatan, yaitu dari 1.920.276,86 ton pada tahun 2022 menjadi 3.643.627,88 ton pada tahun 2045, sementara kapasitas lahan urug TPAS Manggar tetap berada pada angka 2.104.413 ton karena tidak ada penambahan kapasitas pada kondisi *existing*. Grafik kondisi *existing* TPAS dan lahan urug dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan hasil simulasi, akumulasi sampah di lahan urug melampaui kapasitas maksimum tersebut pada tahun 2029, tepatnya pada angka 2.135.274,65 ton atau hanya tujuh tahun sejak tahun dasar simulasi. Sejak titik tersebut, status operasional TPAS Manggar pada model berubah dari aktif menjadi tidak aktif, yang berarti fasilitas ini secara teknis sudah tidak mampu lagi menampung tambahan sampah apabila tidak ada intervensi kebijakan.



Gambar 4. Grafik Kondisi *Existing* TPAS dan Lahan Urug

Secara keseluruhan, hasil simulasi kondisi *existing* mengonfirmasi bahwa pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi Kota Balikpapan terus menekan eksistensi TPAS Manggar selama sistem pengelolaan sampah masih bertumpu sepenuhnya pada DLH tanpa kontribusi EPR maupun pihak swasta, sehingga arah hubungan ini konsisten dengan struktur sebab-akibat pada Causal Loop Diagram (Gambar 1). Temuan ini menjadi dasar untuk penyusunan skenario kebijakan pada bagian selanjutnya, yang diarahkan untuk menekan laju timbulan sampah dari sumber, memperluas keterlibatan aktor lain dalam pengelolaan, serta mengurangi volume sampah yang harus ditimbun di lahan urug.

3.5. Pengembangan Skenario Kebijakan

Skenario 1 merupakan skenario yang berfokus pada optimalisasi pemilahan dan pengolahan sampah dari sumber, dengan target peningkatan pemilahan sebesar 30% mengacu pada target pengurangan sampah nasional dalam Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah (Jakstranas). Pemilihan target tersebut turut didukung oleh hasil analisis sensitivitas terhadap variasi peningkatan pemilahan sebesar 10%, 20%, dan 30%, yang menunjukkan bahwa jumlah sampah masuk TPAS menurun secara bertahap dari kondisi *existing* sebesar 242.500,98 ton menjadi berturut-turut 215.102,54 ton, 212.734,31 ton, dan 210.366,08 ton, sedangkan akumulasi sampah di lahan urug menurun dari 3.643.627,88 ton menjadi 3.473.241,98 ton, 3.453.023,90 ton, dan 3.432.630,71 ton; variasi 30% memberikan pengaruh penurunan paling besar sehingga dipilih sebagai target skenario. Berdasarkan hasil simulasi, penerapan skenario ini mulai memberikan dampak terhadap jumlah sampah yang masuk ke TPAS Manggar sejak tahun 2028. Jumlah sampah yang masuk ke TPAS menurun dari 146.371,11 ton pada tahun 2027 menjadi 82.097,22 ton pada tahun 2028, kemudian mencapai titik terendah sebesar 20.064,99 ton pada tahun 2029. Namun, setelah periode tersebut jumlah sampah yang masuk ke TPAS kembali mengalami peningkatan hingga mencapai 219.352,63 ton pada tahun 2045. Pola tersebut menunjukkan bahwa pemilahan dan pengolahan dari sumber mampu memberikan pengurangan terhadap beban

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

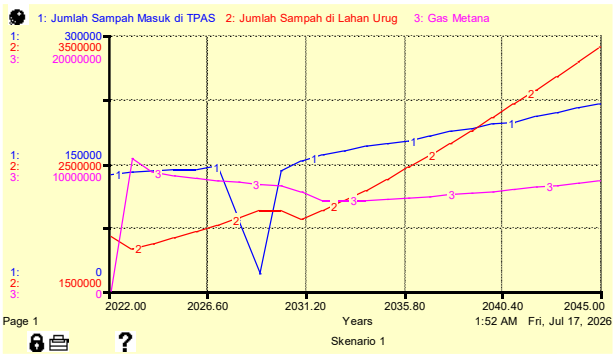
TPAS, tetapi pengaruhnya tidak mampu menahan peningkatan timbulan sampah dalam jangka panjang.

Pola tersebut terjadi karena terdapat dua mekanisme yang bekerja secara bersamaan dalam sistem. Di satu sisi, peningkatan pemilahan dan pengolahan menyebabkan sebagian sampah yang sebelumnya menuju TPAS dialihkan ke fasilitas pengolahan atau pemanfaatan kembali. Di sisi lain, pertumbuhan penduduk dan peningkatan timbulan sampah menyebabkan volume sampah yang dihasilkan terus bertambah. Pada awal penerapan skenario, efek pengurangan dari pemilahan lebih besar dibandingkan pertambahan timbulan sehingga jumlah sampah masuk TPAS mengalami penurunan. Namun, dalam jangka panjang, pertumbuhan timbulan sampah menyebabkan jumlah sampah yang tetap masuk ke TPAS kembali meningkat. Dengan demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa efektivitas pemilahan tidak hanya ditentukan oleh persentase pemilahan, tetapi juga oleh kemampuan sistem untuk meningkatkan kapasitas pengolahan seiring dengan pertumbuhan timbulan sampah.

Dampak tersebut juga terlihat pada akumulasi sampah di lahan urug. Meskipun pemilahan dan pengolahan mampu mengurangi sebagian sampah yang masuk ke TPAS, pengurangan tersebut belum cukup untuk mencegah peningkatan akumulasi sampah dalam jangka panjang. Pada akhir periode simulasi, jumlah sampah di lahan urug mencapai 3.412.866,21 ton, sehingga masih melebihi kapasitas maksimum TPAS sebesar 2.104.413 ton. Kondisi ini menunjukkan bahwa intervensi pada tahap sumber memberikan manfaat terhadap pengurangan beban TPAS, tetapi penerapannya secara tunggal belum mampu mengatasi tekanan terhadap kapasitas lahan urug.

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Artika dan Chaerul (2020) yang menunjukkan bahwa peningkatan pengolahan sampah dapat mengurangi beban pemrosesan akhir, tetapi pertumbuhan timbulan sampah tetap menjadi faktor yang memberikan tekanan terhadap kebutuhan pemrosesan akhir. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa peningkatan pemilahan perlu diikuti oleh peningkatan kapasitas pengolahan agar pengurangan sampah tidak hanya bersifat sementara.

Dari sisi implementasi, Skenario 1 relatif lebih realistis untuk diterapkan karena tidak bergantung pada pembangunan teknologi pengolahan berskala besar. Namun, keberhasilannya memerlukan peningkatan kepatuhan pemilahan dari masyarakat serta ketersediaan fasilitas yang mampu menerima sampah terpilah. Pemerintah daerah berperan dalam menyediakan fasilitas, sistem pengumpulan terpilah, edukasi, serta pengawasan. Masyarakat berperan melakukan pemilahan sejak sumber dan menyalurkan sampah yang masih bernilai ke fasilitas pengolahan. Sektor swasta dapat mendukung pengumpulan dan pengolahan material yang memiliki nilai ekonomi, sedangkan produsen dapat mendukung pengurangan sampah terutama dari produk dan kemasan yang dihasilkan. Dengan demikian, Skenario 1 dapat menjadi fondasi pengelolaan sampah dari sisi hulu, tetapi hasil simulasi menunjukkan bahwa strategi ini belum memadai apabila diterapkan tanpa dukungan kebijakan lain. Pada skenario ini, produksi gas metana relatif stabil sepanjang periode simulasi, yaitu 8.632.258,99 m^3 pada tahun 2027 dan 8.612.772,63 m^3 pada tahun 2045 (selisih sekitar 0,23%), sehingga tidak menunjukkan tren peningkatan maupun penurunan yang signifikan; kedua angka telah diverifikasi kembali terhadap keluaran asli simulasi STELLA. Efektivitas skenario dievaluasi berdasarkan tiga indikator utama penelitian, yaitu Sampah Masuk TPAS Manggar, Jumlah Sampah di Lahan Urug, dan Produksi Gas Metana dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skenario 1 Optimalisasi Pemilahan dan Pengolahan Sampah

Skenario 2 berfokus pada peningkatan kontribusi *Extended Producer Responsibility* (EPR) dan keterlibatan pihak swasta dalam pengelolaan sampah, dengan target kontribusi EPR sebesar 20% dan pihak swasta sebesar 10%. Target tersebut ditentukan berdasarkan hasil analisis sensitivitas: pada variasi 10%, 20%, dan 30%, jumlah sampah masuk TPAS menurun dari 242.500,98 ton menjadi berturut-turut 211.404,03 ton, 180.307,09 ton, dan 149.210,15 ton, sedangkan produksi gas metana menurun dari 9.312.837,15 m^3 menjadi 8.681.926,50 m^3, 8.051.015,84 m^3, dan 7.420.105,18 m^3. Target 20% untuk EPR dipilih sebagai capaian yang realistis melalui penguatan bertahap, sedangkan pihak swasta ditetapkan sebesar 10% mengingat keterlibatannya di Kota Balikpapan masih terbatas. Hasil simulasi menunjukkan penurunan jumlah sampah yang masuk ke TPAS Manggar yang lebih besar dibandingkan Skenario 1. Jumlah sampah yang masuk ke TPAS menurun dari 146.381,01 ton pada tahun 2027 menjadi 82.097,93 ton pada tahun 2028, kemudian mencapai 56.764,59 ton pada tahun 2030. Setelah itu, jumlah sampah kembali meningkat seiring dengan pertumbuhan timbulan sampah, tetapi pada tahun 2045 jumlahnya hanya mencapai 111.123,95 ton, atau sekitar 54,18% lebih rendah dibandingkan kondisi *existing* sebesar 242.500,98 ton.

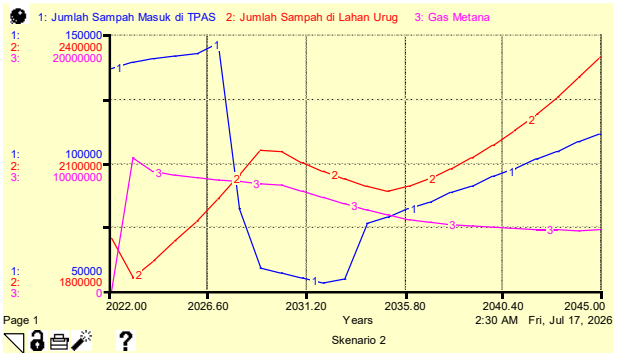
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Penurunan yang lebih besar dibandingkan Skenario 1 terjadi karena intervensi pada Skenario 2 tidak hanya mengandalkan pemilahan dari masyarakat, tetapi menambahkan kapasitas pengelolaan melalui produsen dan pihak swasta. Peningkatan kontribusi EPR menyebabkan sebagian sampah, khususnya material yang berasal dari produk atau kemasan, memiliki jalur pengelolaan di luar sistem pemrosesan akhir yang sepenuhnya ditanggung. Sementara itu, keterlibatan pihak swasta meningkatkan kapasitas pengumpulan, pemanfaatan, dan pengolahan material yang masih memiliki nilai guna. Dengan demikian, penambahan aktor pengelola memperbesar kapasitas sistem dalam mengalihkan sampah sebelum mencapai TPAS.

Dampaknya terhadap lahan urug juga lebih besar dibandingkan Skenario 1. Namun, hasil simulasi menunjukkan bahwa akumulasi sampah di lahan urug masih mencapai 2.347.455,54 ton pada tahun 2045, sehingga masih melampaui kapasitas maksimum TPAS sebesar 2.104.413 ton. Artinya, peningkatan EPR dan keterlibatan swasta berhasil mengurangi aliran sampah menuju TPAS, tetapi belum cukup untuk mengimbangi keseluruhan pertumbuhan timbulan sampah dalam horizon simulasi.

Hasil ini mendukung konsep EPR yang menempatkan produsen sebagai salah satu aktor yang bertanggung jawab terhadap dampak lingkungan produk setelah digunakan. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa keterlibatan produsen dan pihak swasta dapat melengkapi keterbatasan kapasitas pengelolaan pemerintah daerah. Namun, hasil simulasi memperlihatkan bahwa keterlibatan aktor tambahan saja belum secara otomatis menjamin keberlanjutan kapasitas *landfill* apabila tidak disertai pengurangan dan pengolahan pada tahap lainnya.

Dari sisi implementasi, Skenario 2 cukup realistis tetapi memerlukan penguatan kelembagaan. Tantangan utamanya bukan hanya menetapkan target EPR, tetapi memastikan terdapat mekanisme pelaksanaan, pelaporan, pengawasan, dan pengukuran jumlah sampah yang benar-benar dikelola oleh produsen. Pemerintah daerah berperan sebagai regulator dan koordinator. Produsen bertanggung jawab menjalankan EPR melalui pengurangan, pengumpulan kembali, atau pengelolaan produk dan kemasan pascakonsumsi. Pihak swasta dapat menjadi pelaksana kegiatan pengumpulan, pemanfaatan, daur ulang, dan pengolahan. Sementara itu, masyarakat berperan dalam memilah dan menyalurkan sampah sesuai jalur pengelolaannya. Oleh karena itu, efektivitas Skenario 2 sangat bergantung pada terbentuknya hubungan yang jelas antara keempat aktor tersebut. Efektivitas skenario dievaluasi berdasarkan tiga indikator utama penelitian, yaitu Sampah Masuk TPAS Manggar, Jumlah Sampah di Lahan Urug, dan Produksi Gas Metana dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Skenario 2 Pengelolaan Terintegrasi

Skenario 3 menerapkan teknologi insinerator dengan kapasitas pengolahan sebesar 750 ton per hari, beroperasi selama 241 hari per tahun dengan sisa waktu digunakan untuk pemeliharaan fasilitas. Berdasarkan data SIPSN, sekitar 73% sampah yang masuk ke TPAS merupakan sampah layak bakar dengan efektivitas pengolahan sebesar 81%. Kapasitas 750 ton dipilih berdasarkan hasil analisis sensitivitas terhadap variasi kapasitas 500, 750, dan 1.000 ton per hari, yang menunjukkan bahwa akumulasi sampah di lahan urug menurun dari kondisi *existing* 3.643.627,88 ton menjadi berturut-turut 1.783.741,17 ton, 853.797,81 ton, dan 236.605,88 ton; meskipun kapasitas 1.000 ton memberikan penurunan paling besar, kapasitas tersebut dinilai kurang sesuai dengan timbulan sampah harian eksisting Kota Balikpapan (berkisar 500-700 ton per hari) serta kebutuhan investasi yang meningkat signifikan, sehingga kapasitas 750 ton dipilih sebagai alternatif yang lebih proporsional. Sebagai intervensi pada tahap pengolahan akhir, berbeda dengan Skenario 1 dan Skenario 2, skenario ini tidak secara langsung menekan timbulan sampah dari sumber. Hal tersebut terlihat dari jumlah sampah yang masuk ke TPAS yang masih relatif tinggi. Namun, akumulasi sampah di lahan urug dapat ditekan hingga 853.797,81 ton pada tahun 2045, sehingga kapasitas maksimum lahan urug tidak terlampaui selama periode simulasi.

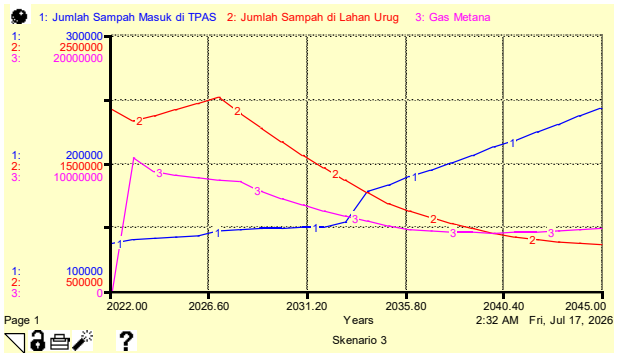
Pola tersebut terjadi karena mekanisme utama insinerator dalam model adalah mengurangi jumlah sampah yang akhirnya terakumulasi di lahan urug, bukan mengurangi jumlah sampah yang dihasilkan masyarakat. Sebagian sampah yang masuk ke sistem pengelolaan dialihkan melalui proses insinerasi sehingga tidak seluruhnya menjadi akumulasi *landfill*. Oleh karena itu, Skenario 3 menunjukkan perbedaan yang jelas dengan Skenario 1 dan Skenario 2: intervensi hulu terutama menekan aliran sampah, sedangkan intervensi teknologi pada hilir terutama menekan akumulasi sampah di *landfill*.

Penurunan akumulasi tersebut juga menyebabkan produksi gas metana lebih rendah dibandingkan kondisi *existing*, yaitu sebesar 4.819.509,40 m^3 pada tahun 2045. Penurunan tersebut terjadi karena sebagian fraksi sampah yang sebelumnya berada di *landfill* dan berpotensi mengalami dekomposisi tidak

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

lagi ditimbun dalam jumlah yang sama. Dengan demikian, terdapat trade-off antara pengurangan beban *landfill* dan jumlah potensi pembentukan metana dari sampah yang ditimbun. Hasil tersebut sejalan dengan kajian pengelolaan sampah yang menunjukkan bahwa teknologi pengolahan termal dapat mengurangi ketergantungan terhadap *landfill*, khususnya pada wilayah yang memiliki keterbatasan kapasitas lahan. Namun, penerapan teknologi tersebut memiliki persyaratan teknis yang lebih kompleks dibandingkan strategi pemilahan dan pengolahan konvensional.

Dari sisi implementasi, Skenario 3 merupakan skenario yang paling membutuhkan kesiapan teknis dan investasi. Hasil simulasi belum memperhitungkan secara rinci variasi kadar air sampah, nilai kalor, kebutuhan pemeliharaan, downtime fasilitas, pengelolaan abu, biaya investasi dan operasi, serta pengendalian emisi. Oleh karena itu, keberhasilan insinerator dalam simulasi tidak dapat langsung diartikan sebagai bukti bahwa teknologi tersebut layak diterapkan secara teknis dan ekonomi di lapangan. Pembagian perannya juga berbeda. Pemerintah daerah berperan dalam perencanaan, regulasi, perizinan, pengawasan lingkungan, dan penyediaan kerangka kelembagaan. Pihak swasta dapat berperan dalam investasi dan pengoperasian fasilitas apabila skema kelembagaan dan pembiayaannya memungkinkan. Masyarakat tetap berperan dalam pengurangan dan pemilahan sampah agar karakteristik sampah yang masuk ke fasilitas lebih sesuai dengan kebutuhan pengolahan. Produsen dapat berkontribusi melalui EPR untuk mengurangi sampah produk dan kemasan yang masuk ke sistem. Dengan demikian, teknologi lanjut sebaiknya diposisikan sebagai bagian dari sistem terpadu, bukan sebagai pengganti pemilahan dan pengurangan sampah dari sumber. Efektivitas skenario dievaluasi berdasarkan tiga indikator utama penelitian, yaitu Sampah Masuk TPAS Manggar, Jumlah Sampah di Lahan Urug, dan Produksi Gas Metana dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Skenario 3 Pengelolaan Berbasis Teknologi Lanjut

Skenario 4 merupakan skenario kombinasi yang menerapkan seluruh intervensi, yaitu peningkatan pemilahan sampah dari sumber, penguatan peran *Extended Producer Responsibility* (EPR) dan pihak swasta, optimalisasi fasilitas pengolahan sampah, serta penerapan teknologi insinerator. Kombinasi tersebut dirancang untuk memberikan intervensi pada beberapa tahapan pengelolaan sampah, mulai dari pengurangan sampah pada sumber hingga pengolahan sebelum sampah masuk ke lahan urug.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan kombinasi kebijakan tersebut mampu menurunkan jumlah sampah yang masuk ke TPAS Manggar. Jumlah sampah yang masuk TPAS tercatat sebesar 146.371,11 ton pada tahun 2027, kemudian menurun menjadi 124.820,15 ton pada tahun 2028 dan 83.367,10 ton pada tahun 2030. Setelah periode tersebut, jumlah sampah yang masuk kembali mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk dan timbulan sampah, hingga mencapai 129.505,38 ton pada tahun 2045. Meskipun mengalami peningkatan kembali, nilai tersebut masih 46,60% lebih rendah dibandingkan kondisi *existing* pada tahun 2045.

Penurunan jumlah sampah pada periode awal terjadi karena adanya kombinasi intervensi pada tahap hulu dan hilir. Pemilahan dari sumber, peningkatan keterlibatan EPR, pihak swasta, serta fasilitas pengolahan mengurangi jumlah sampah yang harus dikirim ke TPAS. Sementara itu, peningkatan kembali setelah tahun 2030 menunjukkan bahwa pertumbuhan timbulan sampah tetap menjadi tekanan utama dalam sistem. Dengan demikian, kebijakan pengelolaan sampah dapat menekan aliran sampah menuju TPAS, tetapi tidak sepenuhnya menghilangkan pengaruh pertumbuhan timbulan sampah dalam jangka panjang.

Pengurangan aliran sampah tersebut kemudian memberikan dampak yang lebih besar terhadap akumulasi sampah di lahan urug. Pada tahun 2027, jumlah sampah di lahan urug sebesar 2.015.113,86 ton dan menurun menjadi 1.937.369,17 ton pada tahun 2028. Pada akhir periode simulasi, akumulasi sampah di lahan urug hanya mencapai 480.773,96 ton. Nilai tersebut setara dengan 22,85% dari kapasitas maksimum lahan urug sebesar 2.104.413 ton. Status operasional TPAS tetap bernilai 1 hingga tahun 2045, yang menunjukkan bahwa berdasarkan hasil simulasi kapasitas lahan urug tidak terlampaui selama periode tersebut.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi intervensi pada tahap hulu dan hilir memberikan pengaruh yang lebih kuat terhadap kapasitas lahan urug dibandingkan penerapan kebijakan secara parsial. Pemilahan, EPR, dan keterlibatan pihak swasta berperan mengurangi jumlah sampah yang menuju TPAS, sedangkan insinerator memberikan tambahan kapasitas pengolahan pada tahap hilir sehingga sebagian sampah tidak berakhir sebagai timbunan di *landfill*.

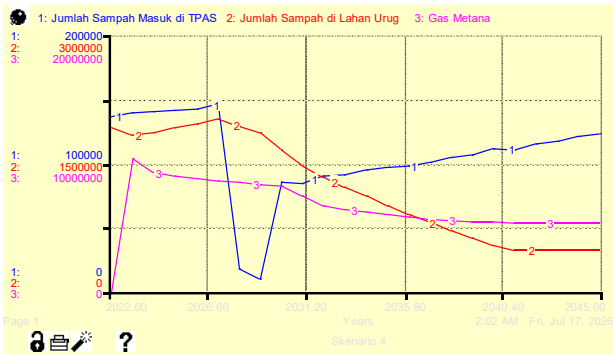
Selain mempertahankan kapasitas lahan urug, Skenario 4 juga mempertahankan fungsi *sanitary landfill* dalam menghasilkan potensi gas metana.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Dalam skenario ini, insinerator diprioritaskan untuk mengolah sampah anorganik, sedangkan sampah organik tetap ditimbun pada sistem *sanitary landfill*. Oleh karena itu, proses dekomposisi anaerobik sampah organik masih berlangsung dan menghasilkan gas metana. Hasil simulasi menunjukkan potensi produksi gas metana sebesar 8.632.258,99 m^3 pada tahun 2027 dan 5.288.376,42 m^3 pada tahun 2045. Perlu ditegaskan bahwa angka tersebut merupakan estimasi jumlah gas metana yang terbentuk secara teoritis dari proses dekomposisi anaerobik dalam model, bukan jumlah gas yang telah ditangkap (captured) maupun yang benar-benar dimanfaatkan sebagai energi, karena kedua tahap tersebut memerlukan sistem penangkapan gas (gas capture system) dan infrastruktur pemanfaatan energi yang belum dimodelkan secara eksplisit dalam penelitian ini. Penurunan tersebut terjadi seiring dengan berkurangnya jumlah sampah organik yang ditimbun di lahan urug. Meskipun mengalami penurunan, keberadaan potensi produksi gas metana menunjukkan bahwa *sanitary landfill* masih memiliki fungsi tambahan selain sebagai tempat pemrosesan residu. Dalam konteks TPAS Manggar, gas metana tersebut berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif bagi masyarakat sekitar TPAS, sebagaimana pemanfaatan gas *landfill* yang telah menjadi bagian dari pembahasan pengelolaan TPAS Manggar dalam penelitian ini. Dengan demikian, penerapan insinerator dalam Skenario 4 tidak sepenuhnya menghilangkan fungsi *sanitary landfill*, tetapi mengombinasikan pengurangan beban penimbunan dengan tetap mempertahankan potensi pemanfaatan energi dari sampah organik yang ditimbun.

Dari aspek implementasi, Skenario 4 merupakan alternatif yang paling kompleks karena membutuhkan koordinasi beberapa aktor secara bersamaan. Pemerintah daerah berperan sebagai regulator dan koordinator melalui penyediaan fasilitas, pengawasan pengelolaan TPAS, penguatan pemilahan dari sumber, serta pengawasan penerapan teknologi. Produsen berperan melalui penerapan EPR untuk mengurangi dan menangani sampah pascakonsumsi. Sektor swasta dapat berperan dalam pengumpulan, pengolahan, pemulihan material, serta penyediaan dan pengoperasian teknologi pengolahan. Sementara itu, masyarakat menjadi bagian penting pada tahap hulu melalui pemilahan sampah dari sumber dan penyaluran sampah yang masih bernilai ke fasilitas pengolahan. Kolaborasi tersebut diperlukan agar hasil simulasi dapat lebih realistis untuk diterapkan dalam kondisi aktual.

Jika dibandingkan dengan skenario lainnya, Skenario 4 tidak menghasilkan jumlah sampah masuk TPAS paling rendah karena Skenario 2 memiliki nilai yang lebih rendah pada indikator tersebut. Namun, Skenario 4 menghasilkan akumulasi sampah di lahan urug paling rendah, yaitu 480.773,96 ton pada tahun 2045, sehingga memberikan kinerja terbaik dalam mempertahankan kapasitas lahan urug. Selain itu, skenario ini tetap mempertahankan potensi produksi gas metana dari sampah organik yang ditimbun. Oleh karena itu, berdasarkan hasil simulasi, Skenario 4 dapat dipandang sebagai alternatif dengan kinerja terbaik dalam mempertahankan eksistensi TPAS Manggar dari aspek kapasitas lahan urug sekaligus mempertahankan fungsi pemanfaatan energi dari *landfill*. Efektivitas skenario dievaluasi berdasarkan tiga indikator utama penelitian, yaitu Sampah Masuk TPAS Manggar, Jumlah Sampah di Lahan Urug, dan Produksi Gas Metana dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Skenario 4 Kombinasi

3.6. Perbandingan dan Rekomendasi Skenario Kebijakan

Perbandingan kondisi *existing* dengan keempat skenario kebijakan menunjukkan bahwa seluruh skenario mampu meningkatkan kinerja pengelolaan sampah, namun tingkat efektivitasnya berbeda ditunjukan pada Tabel 3. Skenario 1 dan Skenario 2 menurunkan jumlah sampah yang masuk ke TPAS masing-masing menjadi 219.352,63 ton dan 111.123,95 ton, tetapi keduanya belum mampu mempertahankan kapasitas lahan urug hingga akhir periode simulasi karena kebijakan pengurangan sampah dari sumber saja belum cukup mengimbangi pertumbuhan penduduk.

Tabel 4. Perbandingan Kondisi *Existing* dengan Skenario Kebijakan

	Sampah Masuk TPAS Manggar (*Ton*)	Jumlah Sampah di Lahan Urug (*Ton*)	Gas Metana (m^3)	Keterangan
Existing	242.500,98	3.643.627,88	9.312.837,15	
Skenario 1	219.352,63	3.412.866,21	8.612.772,63	-
Skenario 2	111.123,95	2.347.455,54	4.673.787,32	-
Skenario 3	242.500,98	853.797,81	4.819.509,40	-
Skenario 4	129.505,38	480.773,96	5.288.376,42	Rekomendasi

Sumber data diolah menggunakan Software STELLA 9.0.2

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Skenario 3, yang menerapkan teknologi insinerator, mampu mempertahankan kapasitas lahan urug hingga 2045 dengan menekan akumulasi sampah menjadi 853.797,81 ton, meskipun volume sampah yang masuk ke TPAS masih relatif tinggi karena kebijakan ini berfokus pada pengurangan di titik akhir, bukan pada sumber. Skenario 4 (kombinasi) memberikan hasil paling optimal dengan menurunkan sampah masuk TPAS menjadi 129.505,38 ton dan akumulasi lahan urug menjadi 480.773,96 ton (22,85% dari kapasitas maksimum), sekaligus tetap menghasilkan potensi gas metana sebesar 5.288.376,42 m3 yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif bagi masyarakat sekitar, sejauh dilengkapi sistem penangkapan gas yang memadai.

Berdasarkan hasil simulasi model, Skenario 4 menunjukkan kinerja paling efektif sehingga direkomendasikan sebagai kebijakan pengelolaan sampah bagi TPAS Manggar. Implementasinya memerlukan sinergi antara pemerintah daerah, produsen melalui skema EPR, pihak swasta, dan masyarakat, khususnya dalam peningkatan pemilahan sampah dari sumber dan penguatan kapasitas pengolahan.

3.7. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam memaknai hasil simulasi. Pertama, validasi model hanya menggunakan data aktual periode 2022-2025 (empat tahun) karena keterbatasan ketersediaan data resmi pada level kota, jauh lebih pendek dibandingkan horizon simulasi hingga tahun 2045, sehingga hasil proyeksi jangka panjang perlu dimaknai sebagai gambaran kecenderungan sistem berdasarkan asumsi model, bukan prediksi pasti. Kedua, penentuan parameter setiap skenario telah didukung oleh analisis sensitivitas terhadap target pemilahan, kontribusi EPR dan pihak swasta, serta kapasitas insinerator, tetapi pengujian tersebut belum mencakup ketidakpastian laju pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi hingga tahun 2045, sehingga kepekaan hasil simulasi terhadap kedua asumsi makro tersebut masih perlu diuji lebih lanjut pada penelitian selanjutnya. Ketiga, meskipun teknologi insinerator telah dimodelkan dengan mempertimbangkan kapasitas operasional, hari kerja fasilitas, serta proporsi dan efektivitas sampah yang dapat diolah, model belum mempertimbangkan secara eksplisit karakteristik sampah (kadar air, nilai kalor), residu abu, biaya investasi dan operasional, potensi downtime, maupun sistem pengendalian emisi, sehingga keberhasilan skenario ini dalam simulasi tidak dapat langsung diartikan sebagai bukti kelayakan teknis maupun ekonomis. Keempat, estimasi produksi gas metana bersifat teoritis berdasarkan proses dekomposisi sampah organik dalam model, bukan angka gas yang telah diverifikasi dapat ditangkap dan dimanfaatkan secara nyata, karena pemanfaatannya bergantung pada ketersediaan sistem penangkapan gas yang belum dimodelkan secara eksplisit. Kelima, aspek pembiayaan dan kelembagaan dari setiap skenario kebijakan belum dianalisis secara eksplisit, sehingga kajian kelayakan ekonomi dan institusional diperlukan sebagai tindak lanjut sebelum rekomendasi diterapkan dalam kebijakan nyata.

4. KESIMPULAN

Eksistensi TPAS Manggar dipengaruhi oleh timbulan sampah, pertumbuhan penduduk, tingkat pemilahan sampah dari sumber, keterlibatan EPR dan pihak swasta, kapasitas fasilitas pengolahan, serta penerapan teknologi pengolahan yang saling berinteraksi membentuk hubungan umpan balik terhadap akumulasi sampah di lahan urug. Model sistem dinamis yang dibangun mampu merepresentasikan kondisi pengelolaan sampah Kota Balikpapan, dengan hasil simulasi kondisi *existing* menunjukkan kapasitas maksimum lahan urug TPAS Manggar terlampaui pada tahun 2029.

Skenario yang mengintegrasikan peningkatan pemilahan sampah dari sumber, penguatan EPR dan pihak swasta, serta penerapan teknologi insinerator, berdasarkan hasil simulasi model menunjukkan kinerja paling efektif karena mampu mempertahankan kapasitas lahan urug hingga berakhir waktu simulasi model yang ditentukan sekaligus tetap menghasilkan potensi gas metana sebagai sumber energi alternatif. Hasil ini merupakan proyeksi berdasarkan asumsi model, bukan kepastian kondisi yang akan terjadi di lapangan, sehingga keberhasilannya pada implementasi nyata tetap bergantung pada konsistensi penerapan kebijakan. Sehingga kebijakan ini direkomendasikan untuk Pemerintah Kota Balikpapan guna mendukung keberlanjutan operasional TPAS Manggar dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

Angelina, D. (2025). Diprediksi penuh pada 2026, usia TPA Manggar Balikpapan diperpanjang dengan cara ini, diklaim bisa bertahan hingga 2028. Kaltim Post/JawaPos.

Artika, I., & Chaerul, M. (2020). Model Sistem Dinamik untuk Evaluasi Skenario Pengelolaan Sampah di Kota Depok. Jurnal Wilayah dan Lingkungan, 8(3), 261-279. https://doi.org/10.14710/jwl.8.3.261-279

Badan Pusat Statistik. (2025). Jumlah Penduduk Pertengahan Tahun (Ribu Jiwa). https://www.bps.go.id

El-Fadel, M., Findikakis, A.N., & Leckie, J.O. (1989). A Numerical Model for Methane Production in Managed Sanitary Landfills. Waste Management & Research, 7(1), 41–54. https://doi.org/10.1177/0734242X8900700105

Espos. (2025, 23 Juni). Tingkat pengelolaan sampah Indonesia baru capai 10 persen. Eco Espos. https://eco.espos.id

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. World Bank.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2024). Data pengelolaan sampah nasional. Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). https://sipsn.kemenlh.go.id

Khoirudin, U. (2022). Analisis Kelayakan dan Proyeksi Perancangan Sistem Manajemen Sampah di Balikpapan (Tesis). Universitas Gadjah Mada.

Labibah, L., & Pulungan, M. A. (2025). Evaluasi Pengelolaan Sampah Menggunakan Pemodelan Sistem Dinamis di Kabupaten Ponorogo. Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains Dan Teknologi, 10(1), 24. https://doi.org/10.36722/sst.v10i1.3316

Meirizha, S. N., Mulyadi, A., & Indra, N. Z. (2025). Model System Dynamics untuk Pengelolaan Sampah Padat Perkotaan di Kota Pekanbaru. Jurnal Media Teknik dan Sistem Industri, 9(1), 14. https://doi.org/10.35194/jmtsi.v9i1.4502

Nasution, A. N., Lubis, A. S., & Harliana, P. (2025). Model Simulasi Dinamis Pengelolaan Sampah di Kabupaten Jepara Berbasis Stella. Jurnal Komputer Teknologi Informasi Sistem Informasi (JUKTISI), 4(1), 43–51. https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i1.335

OECD. (2016). Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management.

Parmawati, T., Hernawan, E., & Listyarini, S. (2023). Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah Di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Kabupaten Tana Tidung Dengan Pendekatan System Dynamic. Media Ilmiah Teknik Lingkungan, 8(1), 17–24. https://doi.org/10.33084/mitl.v8i1.4651

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). http://dx.doi.org/10.14710/jwl.11.2.141-155

Scharff, H., Soon, H.-Y., Taremwa, S.R., Zegers, D., Dick, B., Zanon, T.V.B., & Shamrock, J. (2024). The impact of landfill management approaches on methane emissions. Waste Management & Research, 42(11), 1052–1064. https://doi.org/10.1177/0734242X231200742

Suryanti, Y. (2025). Menteri LH: Anggaran 2026 naik 29 persen, pemerintah ingin manfaatnya untuk kelola sampah dan kendalikan perubahan iklim [Siaran pers]. Kementerian Lingkungan Hidup.

Sterman, J.D. (2018). System dynamics at sixty: The path forward. System Dynamics Review, 34(1–2), 5–47. https://doi.org/10.1002/sdr.1601

UNEP. (2024). Global Waste Management Outlook 2024. United Nations Environment Programme & International Solid Waste Association.

Velis, C.A., Wilson, D.C., Rocca, O., Smith, S.R., Mavropoulos, A., & Cheeseman, C.R. (2012). An analytical framework and tool (InteRa) for integrating the informal recycling sector in waste and resource management systems in developing countries. Waste Management & Research, 30(9 Suppl), 43–66. https://doi.org/10.1177/0734242X12454934

Wilson, D. C., Rodic, L., Scheinberg, A., Velis, C. A., & Alabaster, G. (2015). Comparative analysis of solid waste management in cities around the world.

Zambrano-Monserrate, M.A., Ruano, M.A., & Ormeño-Candelario, V. (2021). Determinants of municipal solid waste: A global analysis by countries' income level. Environmental Science and Pollution Research, 28(44), 62421–62430. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15167-9

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP