

Model Simulasi Dinamis Pengelolaan Sampah di Kabupaten Jepara Berbasis Stella

Adzkia Nur Nasution^{1*}, Ardilla Syahfitri Lubis², Putri Harliana³

¹ Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Ilmu Komputer, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia

Email: ^{1*}adz kianurnst.4223250024@mhs.unimed.ac.id, ²ardillasyahfitrilbs@gmail.com, ³harliana@unimed.ac.id

(*Email Corresponding Author: adz kianurnst.4223250024@mhs.unimed.ac.id)

Received: 15 Mei 2025 | Revision: 21 Mei 2025 | Accepted: 26 Mei 2025

Abstrak

Masalah pengelolaan sampah menjadi semakin kompleks seiring pertumbuhan jumlah penduduk dan keterbatasan infrastruktur, terutama di wilayah padat seperti Kabupaten Jepara. Untuk memahami dinamika ini, penelitian ini menggunakan pendekatan sistem dinamis guna mensimulasikan timbulan sampah hingga tahun 2030. Model dikembangkan berdasarkan data tahun 2023 dengan mempertimbangkan berbagai variabel seperti pertumbuhan penduduk, pemilahan sampah, dan luas wilayah. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Stella, yaitu sebuah alat bantu pemodelan visual yang dirancang untuk merepresentasikan sistem kompleks melalui diagram alur dan hubungan sebab-akibat. Dengan Stella, hubungan antar variabel dapat divisualisasikan dan dianalisis secara kuantitatif, memungkinkan penyusunan skenario kebijakan yang lebih realistis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan volume sampah dapat ditekan apabila kebijakan pemilahan sampah diterapkan secara konsisten di tingkat rumah tangga. Model ini memberikan gambaran menyeluruh terhadap dampak kebijakan yang diuji serta menjadi dasar pertimbangan dalam pengambilan keputusan strategis terkait pengelolaan sampah di daerah. Temuan ini memperkuat pentingnya perencanaan berbasis data untuk menciptakan sistem pengelolaan yang berkelanjutan dan adaptif terhadap dinamika populasi.

Kata Kunci: Sistem Dinamis, Simulasi, Stella, Pengelolaan sampah, Jepara, kebijakan lingkungan

Abstract

Waste management has become increasingly complex due to population growth and limited infrastructure, especially in densely populated areas such as Jepara Regency. To better understand this issue, this study employs a system dynamics approach to simulate waste generation projections up to the year 2030. The model was developed using 2023 baseline data and incorporates variables such as population growth, waste sorting effectiveness, and land area. The simulation was conducted using Stella, a specialized modeling software designed to visualize dynamic systems through flow diagrams and causal relationships. Stella enables users to explore how variables interact over time, making it a valuable tool for analyzing potential policy outcomes through scenario testing. The simulation results indicate that waste volume can be reduced if waste sorting policies are consistently implemented at the household level. This model provides a comprehensive overview of policy impacts and serves as a decision-support tool for strategic waste management planning at the regional level. The findings highlight the importance of data-driven planning to establish a sustainable and responsive waste management system in the face of changing demographic conditions.

Keywords: Dynamic System, Simulation, Stella, Waste Management, Jepara, Environmental Policy

1. PENDAHULUAN

Persoalan sampah menjadi tantangan yang kompleks untuk diselesaikan karena setiap kegiatan manusia, sekecil apa pun, pasti menghasilkan limbah [1]. Seiring dengan pertumbuhan penduduk, peningkatan aktivitas ekonomi, dan perubahan gaya hidup masyarakat, volume sampah terus mengalami peningkatan dari waktu ke waktu. Di banyak wilayah, lonjakan produksi sampah tidak diimbangi dengan sistem pengelolaan yang memadai, sehingga menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan maupun kesehatan masyarakat [2]. Secara nasional, persoalan ini perlu mendapat perhatian lebih serius karena tren peningkatan volume sampah menunjukkan kecenderungan yang konsisten dari tahun ke tahun [3]. Tanpa upaya perencanaan dan pengelolaan yang tepat, akumulasi sampah akan terus meningkat dan semakin membebani sistem layanan publik serta mengancam kelestarian lingkungan jangka panjang [4]. Oleh karena itu, perhatian terhadap isu pengelolaan sampah tidak bisa hanya menjadi tanggung jawab satu pihak. Dukungan dan keterlibatan aktif dari seluruh elemen masyarakat, termasuk pemerintah, sangat dibutuhkan mengingat potensi dampak negatif yang bisa timbul jika persoalan ini terus dibiarkan [5]

Pemerintah Indonesia sebenarnya telah memiliki arah kebijakan dalam pengelolaan sampah yang lebih sistematis [6]. Salah satunya tertuang dalam kebijakan dan strategi nasional berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 21 Tahun 2006, yang menekankan pentingnya mewujudkan kawasan permukiman yang bersih, sehat, dan terbebas dari timbunan sampah melalui sistem pengelolaan yang terpadu dan berkelanjutan. Visi ini mencerminkan komitmen untuk menciptakan lingkungan hidup yang lebih layak, sekaligus mendorong upaya perbaikan tata kelola sampah di seluruh daerah [7]. Salah satu wilayah yang menghadapi tantangan serupa adalah Kabupaten Jepara, yang terletak di Provinsi Jawa Tengah. Berdasarkan data tahun 2022, wilayah ini mencatatkan pertumbuhan penduduk sebesar 0,27% dibandingkan dengan tahun sebelumnya. Tingkat kepadatan penduduknya pun cukup tinggi, dengan rata-rata mencapai

lebih dari 1.160 jiwa per kilometer persegi. Kepadatan tersebut turut berkontribusi terhadap meningkatnya jumlah timbulan sampah harian, yang diperkirakan mencapai sekitar 405 ton setiap harinya [8] Angka ini menunjukkan bahwa pengelolaan sampah di Jepara memerlukan perhatian serius dan pendekatan berbasis data agar tetap sejalan dengan pertumbuhan wilayah [9]

Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan sistem dinamis untuk menganalisis dan memahami permasalahan timbulan sampah yang terus meningkat. Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengeksplorasi interaksi antar variabel yang saling memengaruhi dalam suatu sistem yang kompleks, seperti pertumbuhan jumlah penduduk, laju ekonomi daerah, serta kapasitas infrastruktur pengelolaan sampah. Sistem dinamis dipilih karena mampu menyajikan gambaran holistik dari perubahan yang terjadi dalam jangka panjang serta mendukung penyusunan kebijakan yang lebih terencana dan strategis [10] Dengan pendekatan ini, dinamika permasalahan dapat divisualisasikan dan dianalisis secara kuantitatif melalui skenario yang realistis [11]

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan keberhasilan pendekatan ini di berbagai konteks. Sakti dan Andi (2024) memodelkan target pengurangan sampah plastik di TPA Surabaya dan memproyeksikan pencapaian reduksi hingga 1.862 ton per tahun pada tahun 2030 dengan peningkatan kinerja Bank Sampah Induk Surabaya (BSIS) dan partisipasi masyarakat yang intensif [12]. Fudhla et al. (2021) menerapkan simulasi sistem dinamis untuk mengkaji efek kebijakan impor gula terhadap pendapatan petani di Jawa Timur, yang menegaskan fleksibilitas metode ini dalam analisis kebijakan publik [13]. Selain itu, Winyo et al. (2024) dan Sulaeman et al. (2024) menggunakan Stella untuk memodelkan dinamika ekosistem dan sumber daya alam, membuktikan kemampuan platform ini dalam berbagai bidang aplikasi. Meskipun demikian, sebagian besar studi tersebut berfokus pada wilayah perkotaan besar atau isu spesifik seperti sampah plastik saja. Peninsula Jepara, dengan karakteristik semi-perkotaan dan kapasitas infrastruktur yang berbeda, belum banyak diteliti secara komprehensif [14]. Belum ada model yang mengintegrasikan pertumbuhan penduduk, efektivitas pemilahan di tingkat rumah tangga, dan kinerja lembaga pengelolaan sampah secara simultan dalam satu simulasi dinamis. Kesenjangan pengetahuan ini menghambat perumusan kebijakan yang tepat di tingkat kabupaten, di mana skala dan kompleksitas lokal memerlukan perhitungan lebih rinci [15].

Sebagai alat bantu dalam membangun model sistem dinamis tersebut, penelitian ini menggunakan perangkat lunak Stella. Aplikasi ini memungkinkan perancangan diagram alur serta pemetaan hubungan sebab-akibat antar variabel secara visual, sehingga memudahkan dalam menyusun model dan menjalankan simulasi. Stella juga mampu menyajikan informasi secara cepat dan komprehensif, yang sangat berguna dalam menganalisis perubahan dari waktu ke waktu [16] Penelitian ini bertujuan untuk membangun dan memvalidasi model sistem dinamis timbulan sampah di Kabupaten Jepara menggunakan perangkat lunak Stella, serta mensimulasikan berbagai skenario kebijakan hingga tahun 2030. Dengan menjalankan simulasi melalui Stella, diharapkan diperoleh proyeksi kuantitatif volume sampah yang lebih akurat, sehingga dapat menjadi dasar pertimbangan yang kuat bagi pemerintah daerah dalam merumuskan strategi pengelolaan sampah yang adaptif, efektif, dan berkelanjutan. Selain itu, model ini juga diharapkan menjadi acuan bagi kabupaten lain dengan karakteristik serupa dalam menghadapi tantangan pengelolaan sampah.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahap Studi Literatur

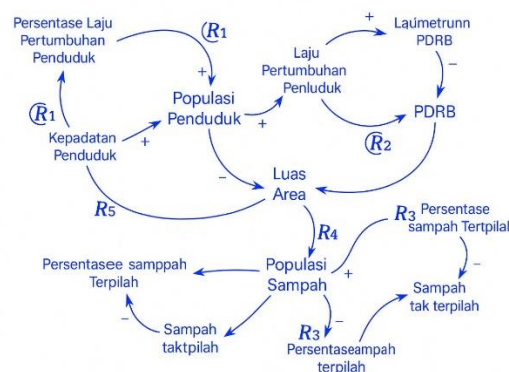
Tahapan awal dalam penelitian ini melibatkan proses pengumpulan dan pengolahan data sekunder yang bersumber dari instansi terkait, khususnya data dari Badan Pusat Statistik (BPS) dan dokumen resmi pemerintah daerah. Data ini digunakan untuk membangun pemahaman menyeluruh mengenai sistem pengelolaan sampah yang berlaku di Kabupaten Jepara secara makro. Selanjutnya, dilakukan analisis untuk mengidentifikasi variabel-variabel penting yang terlibat dalam sistem pengelolaan sampah, khususnya yang berkaitan dengan pengelolaan sampah. Analisis ini bertujuan untuk menggali hubungan antarvariabel dan memahami bagaimana interaksi di antara elemen-elemen tersebut membentuk sistem yang kompleks dan saling memengaruhi satu sama lain.

Penentuan variabel-variabel tersebut mengacu pada kerangka penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya, yang berfungsi sebagai batasan ruang lingkup dalam kajian. Berdasarkan hasil identifikasi tersebut, dilakukan penyusunan model konseptual sistem yang merepresentasikan struktur dan alur utama dalam pengelolaan sampah di wilayah penelitian. Model konseptual ini menjadi dasar untuk membangun simulasi sistem dinamis, sehingga dapat memberikan gambaran awal mengenai skenario-skenario yang mungkin terjadi serta dampaknya terhadap efektivitas pengurangan sampah di Kabupaten Jepara.

2.2 Pemodelan Simulasi Sistem Dinamis

Setelah variabel-variabel yang memengaruhi dinamika sistem timbulan sampah berhasil diidentifikasi, tahap selanjutnya adalah merancang struktur hubungan antarvariabel tersebut ke dalam bentuk model diagram sebab-akibat, yang umum dikenal sebagai Causal Loop Diagram (CLD). Pada fase ini, setiap variabel ditempatkan sebagai simpul (node) dalam diagram, sementara panah-panah yang menghubungkan simpul-simpul tersebut menunjukkan arah dan jenis pengaruh

apakah saling memperkuat (reinforcing loop) atau saling menyeimbangkan (balancing loop). Proses perancangan CLD melibatkan diskusi dengan para pemangku kepentingan, seperti petugas dinas lingkungan dan operator TPA, untuk memastikan bahwa asumsi kausal yang dibuat mencerminkan kondisi lapangan. Hasil akhirnya adalah sebuah peta visual yang menggambarkan secara menyeluruh bagaimana pertumbuhan penduduk, kapasitas TPA, tingkat pemilahan, serta efektivitas bank sampah saling berinteraksi dan membentuk umpan balik dalam sistem. Berdasarkan struktur CLD tersebut, peneliti kemudian menyusun Stock and Flow Diagram (SFD) atau Diagram Stok dan Alur yang menerjemahkan relasi sebab-akibat ke dalam komponen stok (accumulations) dan aliran (flows) yang terukur. Dalam SFD, stok merepresentasikan akumulasi sampah di berbagai titik (misalnya total timbunan harian, persediaan sampah terpilah), sedangkan aliran menggambarkan laju masuk dan keluar dari stok-stok tersebut (seperti laju produksi sampah, laju reduksi melalui pemilahan dan daur ulang). Setiap aliran dihubungkan dengan variabel kontrol seperti persentase pemilahan rumah tangga atau kapasitas harian TPA, lengkap dengan parameter laju pertumbuhan dan koefisien efektivitas yang diperoleh dari data sekunder.



Gambar 1. Model Causal Loop Diagram Pengelolaan Sampah

Setelah kerangka Stock and Flow Diagram (SFD) selesai dirancang termasuk stok Populasi Penduduk dan Populasi Sampah, serta aliran seperti Laju Pertumbuhan Penduduk, Laju Persentase PDRB, dan Persentase Sampah Terpisah peneliti kemudian menjalankan simulasi untuk jangka waktu sepuluh tahun (2023–2033). Model diinisialisasi dengan nilai awal tahun 2023, kemudian setiap stok dan aliran dipetakan di Stella menggunakan antarmuka drag-and-drop, sebelum fungsi matematisnya diatur sesuai rumus yang telah ditentukan (misalnya jumlah pertumbuhan penduduk sebagai perkalian antara populasi dan persentase laju pertumbuhan, atau sampah terpisah sebagai hasil kali antara populasi sampah dan persentase sampah terpisah). Untuk memahami sensitivitas sistem terhadap kebijakan yang berbeda, beberapa skenario diuji secara paralel. Pertama, variasi kecil pada laju pertumbuhan penduduk memodelkan dampak perubahan demografis; kedua, perubahan laju persentase PDRB menunjukkan bagaimana percepatan atau perlambatan ekonomi memengaruhi timbunan sampah; ketiga, peningkatan rasio pemilahan rumah tangga memperlihatkan efektivitas program pengelolaan sampah terpisah; dan keempat, perluasan kapasitas area TPA diuji untuk menilai pengaruh penambahan infrastruktur. Dari setiap simulasi, Stella menghasilkan grafik dan tabel yang menampilkan tren tahunan—mulai dari akumulasi sampah keseluruhan, volume sampah terpisah versus tak terpisah, hingga titik keseimbangan sistem di mana penambahan dan pengurangan sampah mencapai kesetimbangan. Dengan menganalisis nilai maksimum, minimum, dan titik equilibria di setiap skenario, peneliti dapat menentukan kombinasi kebijakan yang paling efektif dalam menahan laju peningkatan sampah. Hasil analisis ini selanjutnya diperdalam melalui diskusi mengenai validitas asumsi, ketepatan parameter, serta implikasi praktis bagi perumusan strategi pengelolaan sampah di Kabupaten Jepara, sehingga laporan akhir tidak hanya memuat proyeksi kuantitatif, tetapi juga rekomendasi kebijakan yang realistis dan aplikatif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penentuan Variabel

Mengacu pada pembahasan dalam pendahuluan, penelitian ini berhasil mengidentifikasi sembilan variabel utama yang mempengaruhi dinamika pengelolaan sampah di Kabupaten Jepara. Pemilihan variabel dilakukan berdasarkan keterkaitannya terhadap sistem yang dibangun dan pengaruhnya terhadap volume sampah yang dihasilkan. Kesembilan variabel tersebut mencerminkan kompleksitas permasalahan sampah yang tidak hanya bersumber dari aspek teknis, tetapi juga sosial, ekonomi, dan lingkungan. Langkah awal dalam analisis data dilakukan melalui penyusunan kerangka model awal dan validasi model dinamis. Variabel-variabel utama yang telah diidentifikasi—

seperti pertumbuhan penduduk, PDRB, luas area, serta timbunan dan pemilahan sampah diintegrasikan ke dalam *Causal Loop Diagram* (CLD).

Adapun variabel-variabel tersebut adalah: jumlah pertumbuhan penduduk, persentase laju pertumbuhan penduduk, persentase laju pertumbuhan PDRB, populasi sampah, persentase sampah terurai, persentase sampah tak terurai, luas wilayah, timbunan sampah per kapita, dan persentase pemilahan sampah. Keseluruhan variabel ini disusun dalam satu sistem model untuk memahami keterkaitan dan pengaruh timbal balik antar komponen.

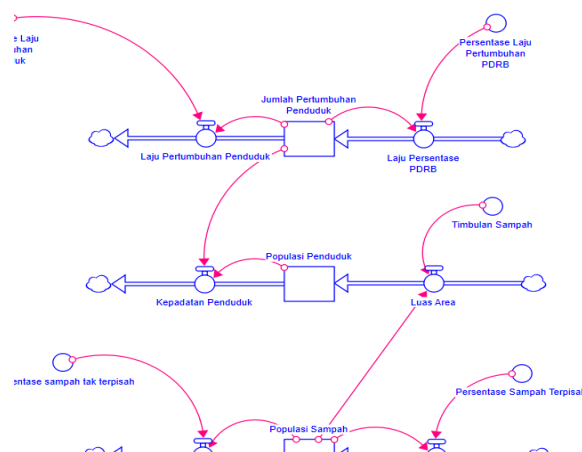
Langkah awal dalam proses analisis dilakukan melalui penyusunan kerangka model awal dan validasi model sistem dinamis. Variabel-variabel utama diintegrasikan ke dalam *Causal Loop Diagram* (CLD) yang digunakan untuk memetakan hubungan sebab-akibat secara sistematis. Dengan adanya pemetaan ini, interaksi antara pertumbuhan penduduk, tingkat ekonomi, dan karakteristik sampah dapat dilihat dengan lebih jelas, termasuk mekanisme umpan balik positif maupun negatif yang terjadi dalam sistem.

Diagram ini menjadi kerangka utama dalam menganalisis bagaimana perubahan satu variabel akan memengaruhi variabel lainnya dalam jangka waktu tertentu. Hal ini sangat penting dalam konteks pengelolaan sampah karena sistem tersebut bersifat kompleks dan dinamis. Oleh karena itu, pemahaman mendalam terhadap variabel-variabel ini menjadi dasar penting untuk merancang kebijakan berbasis data.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan nilai-nilai parameter dengan data sekunder dari Badan Pusat Statistik (BPS), dokumen pemerintah daerah, dan referensi akademik. Langkah ini dilakukan untuk memastikan bahwa model benar-benar mencerminkan situasi faktual yang terjadi di Kabupaten Jepara. Selain itu, validasi lapangan melalui diskusi dengan dinas lingkungan hidup dan operator TPA juga digunakan untuk memperkuat akurasi model.

3.2 Model Pengelolaan Sampah

Model sistem dinamis yang dibangun memiliki sub-model khusus yang menggambarkan proses aliran timbunan dan penanganan sampah secara terintegrasi. Sub-model ini berfungsi untuk memproyeksikan kondisi pengelolaan sampah berdasarkan perubahan berbagai variabel kunci.



Gambar 2. Formulasi Sub model pengelolaan sampah

Sub-model ini menggambarkan aliran timbunan dan pemrosesan sampah dalam satu sistem terpadu. Dalam struktur model yang dibangun, kotak “Populasi Penduduk” bertindak sebagai stok utama yang terus bertambah setiap tahunnya. Penambahan ini berasal dari aliran “Laju Pertumbuhan Penduduk”, yang dihitung melalui persentase laju pertumbuhan penduduk terhadap jumlah penduduk tahun sebelumnya.

Laju pertumbuhan PDRB dihitung dengan mengalikan persentase pertumbuhan PDRB dengan jumlah pertumbuhan penduduk, yang kemudian mencerminkan kondisi ekonomi masyarakat. Kondisi ini memengaruhi gaya hidup dan konsumsi masyarakat yang secara langsung berdampak pada jumlah dan jenis sampah yang dihasilkan.

Populasi sampah diperoleh dari hasil perkalian antara populasi penduduk dan nilai timbunan sampah per kapita. Dari populasi sampah tersebut, aliran selanjutnya terbagi dua: sampah terpilah dan sampah tak terpilah. Sampah terpilah dihitung berdasarkan persentase pemilahan sampah yang dilakukan di tingkat rumah tangga, sementara sisanya

dihitung sebagai sampah tak terpilah. Proses ini memperlihatkan sejauh mana kebijakan pemilahan telah diimplementasikan dan dampaknya terhadap beban TPA.

Luas area wilayah digunakan untuk menghitung kepadatan penduduk dan keterkaitannya dengan distribusi sampah. Dalam konteks model ini, luas wilayah dan pertumbuhan penduduk menjadi indikator untuk menilai tekanan lingkungan akibat penumpukan sampah. Dengan meningkatnya populasi dalam ruang yang terbatas, maka beban pengelolaan juga meningkat, khususnya pada TPA yang memiliki kapasitas terbatas. Semua hubungan variabel tersebut disusun dalam satu sistem terintegrasi, yang memungkinkan analisis terhadap perubahan nilai variabel berdasarkan skenario tertentu. Hal ini penting untuk memahami kemungkinan dampak kebijakan yang berbeda, seperti peningkatan persentase pemilahan atau perluasan kapasitas TPA.

Variabel luas wilayah juga berperan dalam sistem sebagai dasar perhitungan kepadatan penduduk. Semakin padat suatu wilayah, maka beban pengelolaan sampah cenderung lebih berat, terutama bila kapasitas sarana dan prasarana tidak sebanding. Dalam sistem ini, kepadatan dihitung dari rasio jumlah penduduk terhadap luas wilayah. Selain itu, hubungan antara timbulan sampah dan luas wilayah turut dihitung sebagai indikator tekanan lingkungan yang terjadi.

Melalui hubungan-hubungan tersebut, sub-model ini memungkinkan untuk dilakukan simulasi berbagai skenario kebijakan. Perubahan pada satu variabel akan mempengaruhi keseluruhan sistem secara langsung maupun tidak langsung, sehingga memberikan gambaran menyeluruh mengenai dinamika yang terjadi.

3.3 Simulasi Reduksi Pengelolaan Sampah

Hasil simulasi yang dijalankan untuk periode tahun 2023–2033 menunjukkan bahwa Kabupaten Jepara mengalami peningkatan yang signifikan dalam hal jumlah penduduk dan timbulan sampah. Pada awal tahun 2024, jumlah penduduk tercatat sekitar 146 ribu jiwa, dengan jumlah timbulan sampah yang sebanding, yaitu sebesar 146 ribu ton.

	Jumlah Pertumbuhan Penduduk	Populasi Penduduk	Populasi Sampah	Laju Pertumbuhan Penduduk
2024	85,2k	146k	146k	230
2025	138k	245k	234k	373
2026	224k	397k	375k	605
2027	364k	640k	600k	982
2028	590k	1,03M	961k	1,59k
2029	957k	1,66M	1,54M	2,58k
Final	1,55M	2,67M	2,47M	4,19k

Gambar 3. Hasil Simulasi Sistem

Namun pada tahun 2029, terjadi lonjakan drastis, di mana jumlah penduduk diperkirakan mencapai 2,67 juta jiwa, sementara timbulan sampah meningkat menjadi 2,47 juta ton. Kenaikan ini mencerminkan hubungan linear dan bahkan eksponensial antara pertumbuhan penduduk dan volume sampah. Simulasi ini menggambarkan skenario ekstrem sebagai bentuk stress test terhadap sistem pengelolaan sampah. Peningkatan laju pertumbuhan penduduk mencapai 1,55 juta jiwa per tahun pada 2029, jauh meningkat dibandingkan hanya 85 ribu jiwa pada tahun 2024. Laju pertumbuhan ini bahkan melebihi kapasitas pertumbuhan alami suatu wilayah seperti Jepara. Meskipun proyeksi ini tampak tidak realistis, simulasi ini memberikan gambaran tekanan maksimal yang mungkin dihadapi sistem jika tidak ada intervensi signifikan.

Timbulan sampah juga mengalami lonjakan. Misalnya, pada tahun 2026 ketika penduduk mencapai 397 ribu jiwa, timbulan sampah naik menjadi 375 ribu ton. Kemudian, pada tahun 2028 jumlah penduduk naik menjadi 1,03 juta jiwa, dengan sampah mencapai 961 ribu ton. Lonjakan tajam ini terjadi dalam waktu sangat singkat, memperlihatkan efek kombinasi dari pertumbuhan penduduk dan peningkatan konsumsi per kapita. Selain kuantitas, jenis sampah juga menjadi perhatian penting. Meningkatnya penggunaan barang sekali pakai dan produk plastik menyebabkan tingginya volume sampah tak terurai. Tren ini tidak hanya menambah beban volume, tetapi juga memperberat pengolahan karena membutuhkan waktu lebih lama untuk terurai atau didaur ulang.

Model ini memperjelas bahwa kebijakan yang hanya fokus pada hilir (seperti perluasan TPA) tidak akan cukup. Diperlukan pendekatan menyeluruh yang juga mencakup strategi hulu, seperti pembatasan produksi sampah, edukasi masyarakat, dan insentif untuk rumah tangga dan industri yang menerapkan prinsip ekonomi sirkular. Simulasi juga memperlihatkan pentingnya implementasi program pemilahan sampah. Peningkatan persentase pemilahan dapat secara signifikan mengurangi jumlah sampah tak terpilah. Selain mengurangi beban TPA, hal ini juga meningkatkan potensi ekonomi dari daur ulang, serta memberdayakan komunitas lokal seperti bank sampah.

Selanjutnya, model memberikan masukan strategis bahwa intervensi pengelolaan harus disertai dengan peningkatan kapasitas infrastruktur. Tanpa perluasan dan peningkatan kapasitas pengangkutan serta pengolahan, maka sistem akan kelebihan beban. Oleh karena itu, penyediaan TPS 3R, insinerator, hingga pengolahan berbasis teknologi perlu menjadi prioritas. Analisis dari simulasi ini juga menegaskan pentingnya koordinasi lintas sektor dan pelibatan masyarakat. Masalah sampah tidak bisa diselesaikan oleh satu instansi saja, melainkan membutuhkan kolaborasi antara pemerintah, swasta, LSM, dan masyarakat. Penyusunan kebijakan harus bersifat inklusif dan partisipatif agar mendapat dukungan luas dan berkelanjutan. Terakhir, model ini merekomendasikan pembaruan data secara berkala agar proyeksi tetap akurat. Pemerintah daerah perlu membangun sistem informasi pengelolaan sampah berbasis digital untuk mendukung pemantauan dan pengambilan kebijakan secara real time.

Peningkatan jumlah penduduk per tahun juga meningkat tajam, dari sekitar 85 ribu jiwa pada 2024 menjadi 1,55 juta jiwa pada 2029. Hal ini merepresentasikan skenario ekstrem (stress test) yang dimaksudkan untuk melihat daya tahan sistem jika menghadapi lonjakan penduduk dan sampah yang sangat tinggi. Meskipun secara empiris angka ini melebihi prediksi realistis, skenario ini tetap penting sebagai alat bantu pengambilan keputusan berbasis risiko. Kenaikan jumlah penduduk berdampak langsung terhadap volume sampah. Sebagai contoh, pada tahun 2026 jumlah penduduk diproyeksikan 397 ribu jiwa, sementara volume sampah mencapai 375 ribu ton. Selanjutnya, pada tahun 2028 jumlah penduduk meningkat menjadi 1,03 juta jiwa, dan sampah yang dihasilkan mencapai 961 ribu ton. Setahun berikutnya, jumlah sampah naik drastis menjadi 1,54 juta ton. Kenaikan ini menunjukkan bahwa tidak hanya jumlah penduduk yang meningkat, tetapi juga timbunan sampah per individu. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh pola konsumsi masyarakat yang berubah. Meningkatnya penggunaan barang sekali pakai dan produk berbasis plastik menyebabkan komposisi sampah menjadi lebih sulit diurai. Oleh karena itu, pendekatan pengelolaan sampah tidak hanya memerlukan solusi teknis, tetapi juga perubahan perilaku masyarakat. Tanpa perubahan dari sisi konsumsi dan pengelolaan di tingkat rumah tangga, beban sistem pengelolaan akan terus meningkat.

Dari hasil simulasi, terlihat bahwa sistem akan mengalami tekanan luar biasa jika hanya bergantung pada TPA sebagai sarana akhir. Apabila tidak ada pemilahan dan pengurangan dari sumber, serta peningkatan kapasitas daur ulang dan infrastruktur pengelolaan, maka sistem tidak akan mampu bertahan. Oleh karena itu, diperlukan strategi yang lebih komprehensif dan jangka panjang. Simulasi ini memberikan gambaran penting bahwa penyelesaian persoalan sampah tidak dapat dilakukan secara parsial. Diperlukan kolaborasi antar sektor, penguatan regulasi, serta peningkatan kesadaran masyarakat. Implementasi kebijakan pemilahan sampah wajib di tingkat rumah tangga, penyediaan fasilitas daur ulang, serta edukasi publik harus berjalan beriringan.

Lebih lanjut, sistem ini menunjukkan pentingnya perencanaan berbasis data. Tanpa proyeksi yang akurat, kebijakan yang diambil cenderung reaktif dan kurang efektif. Model dinamis yang dibangun melalui perangkat lunak Stella ini memberikan alat bantu perencanaan yang fleksibel dan dapat diperbarui sesuai perubahan kondisi lapangan. Dengan demikian, model ini dapat dijadikan sebagai rujukan dalam menyusun strategi kebijakan pengelolaan sampah yang berkelanjutan di Kabupaten Jepara dan daerah lain dengan karakteristik serupa.

3.4. Penguatan Implikasi Kebijakan

Simulasi ini juga memberi gambaran penting tentang perlunya strategi kebijakan yang fleksibel dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan maupun sosial masyarakat. Dalam konteks Kabupaten Jepara, kebijakan pengelolaan sampah tidak hanya bisa bersifat reaktif, tetapi harus dirancang secara proaktif dengan memperhitungkan tren demografi, pola konsumsi, serta ketersediaan sumber daya. Pendekatan sistem dinamis menjadi solusi strategis karena memungkinkan perencanaan jangka panjang berbasis skenario yang realistis.

Penerapan kebijakan berbasis data, seperti yang ditunjukkan melalui pemodelan ini, dapat membantu pemerintah daerah untuk menyusun kebijakan yang lebih presisi. Misalnya, jika diketahui bahwa peningkatan populasi menyebabkan lonjakan timbulan sampah dalam lima tahun ke depan, maka anggaran dan program dapat difokuskan pada edukasi pemilahan, penambahan sarana pengangkutan, dan perluasan zona pengolahan sampah.

Selain itu, simulasi ini juga menjadi alat edukasi yang kuat. Pemerintah daerah dapat menggunakannya untuk menyampaikan urgensi perubahan perilaku kepada masyarakat. Visualisasi tren peningkatan sampah dan proyeksi kerusakan lingkungan bisa menjadi sarana komunikasi yang efektif dalam mendorong partisipasi publik. Ketika masyarakat memahami dampak jangka panjang dari perilaku konsumtif dan minim pemilahan, maka dorongan untuk berubah akan lebih kuat.

Tidak kalah penting, model ini mendorong pentingnya sinergi antara kebijakan lingkungan dengan kebijakan tata ruang, pendidikan, dan ekonomi lokal. Ketika pengelolaan sampah dirancang tidak hanya sebagai tanggung jawab teknis, melainkan sebagai bagian dari pembangunan berkelanjutan, maka hasil yang dicapai akan lebih komprehensif. Hal ini termasuk dalam upaya menanamkan pendidikan lingkungan hidup sejak usia dini, integrasi UMKM ke dalam ekosistem daur ulang, dan insentif bagi inovasi pengelolaan sampah berbasis teknologi.

Di luar aspek teknis dan kebijakan, penting pula untuk menyoroti dimensi budaya dalam pengelolaan sampah. Di banyak daerah, termasuk Jepara, perilaku masyarakat dalam membuang dan mengelola sampah sangat dipengaruhi oleh nilai-nilai sosial dan kebiasaan yang telah terbentuk selama bertahun-tahun. Oleh sebab itu, strategi pengelolaan sampah perlu mempertimbangkan pendekatan berbasis budaya lokal, seperti melibatkan tokoh masyarakat, tokoh agama, dan komunitas tradisional dalam kampanye edukasi dan sosialisasi.

Selain itu, penelitian ini membuka peluang riset lanjutan, terutama untuk mengembangkan model yang mengintegrasikan variabel lingkungan lainnya, seperti emisi gas rumah kaca dari sampah organik, dampak pencemaran air tanah dari TPA, serta keterkaitan antara pengelolaan sampah dan ketahanan pangan melalui urban farming. Integrasi seperti ini akan memperkaya model dan menjadikannya lebih multidimensional, sehingga dapat menjawab tantangan pembangunan berkelanjutan secara lebih utuh.

Dengan memperluas cakupan model, hasil simulasi di masa depan tidak hanya akan mencerminkan kondisi pengelolaan sampah dalam konteks volume dan kapasitas, tetapi juga dalam konteks sosial, ekonomi, dan lingkungan secara lebih menyeluruh. Ini akan semakin memperkuat fungsi model sebagai alat bantu pengambilan keputusan strategis, yang tidak hanya fokus pada efisiensi teknis, tetapi juga keadilan ekologis dan keberlanjutan jangka panjang.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan sistem dinamis dengan bantuan perangkat lunak Stella mampu memberikan gambaran yang jelas dan komprehensif mengenai potensi perkembangan jumlah penduduk dan timbulan sampah di Kabupaten Jepara dalam jangka waktu sepuluh tahun mendatang. Berdasarkan hasil simulasi, ditemukan bahwa terjadi peningkatan populasi yang sangat signifikan dari tahun ke tahun, yang secara langsung berpengaruh terhadap lonjakan volume timbulan sampah. Hal ini menunjukkan adanya hubungan kausal yang kuat antara pertumbuhan penduduk dan produksi sampah, serta menegaskan perlunya pengelolaan yang lebih strategis dan terintegrasi. Model yang dibangun melalui struktur *Causal Loop Diagram* dan *Stock and Flow Diagram* berhasil mengidentifikasi variabel-variabel kunci dalam sistem pengelolaan sampah, serta menggambarkan dampak dari interaksi antarvariabel terhadap dinamika sistem secara keseluruhan. Dengan memproyeksikan tren hingga tahun 2033, simulasi ini berhasil menunjukkan skenario tekanan ekstrem yang mungkin terjadi apabila tidak dilakukan intervensi kebijakan, terutama dalam hal pemilahan sampah dan peningkatan kapasitas infrastruktur pengelolaan. Dengan demikian, pemodelan ini tidak hanya bermanfaat sebagai alat prediksi, tetapi juga sebagai instrumen pengambilan keputusan berbasis data untuk pemerintah daerah dalam menyusun kebijakan pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Penelitian ini merekomendasikan perlunya evaluasi berkala terhadap asumsi model, validasi terhadap data lapangan, serta penerapan kebijakan yang konsisten agar sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Jepara dapat berfungsi secara optimal dan tahan terhadap tekanan populasi di masa depan.

REFERENCES

- [1] I. R. Fatmawati, Miftahudin, and A. Maruf, "SIMULASI PENGELOLAAN SAMPAH DI PASAR TOHAGA CILEUNGSI KABUPATEN BOGOR," pp. 4703–4715, 2024.
- [2] R. Febriyanti, N. V. A. Rahayu, W. D. Pitaloka, A. Yakob, and M. Samsuri, "Edukasi Pemilahan Sampah sebagai Upaya Penanganan Masalah Sampah di SD Muhammadiyah Baitul Fallah Mojogedang," *Buletin KKN Pendidikan*, vol. 5, no. 1, pp. 37–45, Jun. 2023, doi: 10.23917/bkkndik.v5i1.22456.
- [3] A. Z. Saputra and Ah. S. Fauzi, "Pengolahan Sampah Kertas Menjadi Bahan Baku Industri Kertas Bisa Mengurangi Sampah di Indonesia," *Jurnal Mesin Nusantara*, vol. 5, no. 1, pp. 41–52, Jun. 2022, doi: 10.29407/jmn.v5i1.17522.
- [4] B. Mulyati, Y. F. Ilmi, and A. Basri, "Sosialisasi Pengelolaan Sampah sebagai Upaya Peningkatan Peran Masyarakat dalam Mengelola Sampah di Kota Serang," *BANTENESE : JURNAL PENGABDIAN MASYARAKAT*, vol. 5, no. 1, pp. 26–34, Jun. 2023, doi: 10.30656/ps2pm.v5i1.6285.
- [5] S. Andayani, F. Zahra, W. Musafikah, and M. Qibtiyah, "PENGADAAN BANK SAMPAH SEBAGAI STRATEGI PENGELOLAAN SAMPAH DI DESA TAMANSARI KABUPATEN PROBOLINGGO," *Communnity Development Journal*, vol. 4, pp. 7265–7271, 2023.
- [6] M. M. Simatupang, E. Veronika, and A. Irfandi, "Edukasi Pengelolaan Sampah: Pemilahan Sampah dan 3R di SDN Pondok Cina Depok," 2021.
- [7] N. Kristanti, S. Samsugi, A. Surahman, R. Fajar Pratama, R. Ibrahim, and Adam, "PENERAPAN SENSOR ULTRASONIK PADA KOTAK SAMPAH OTOMATIS MENGGUNAKAN TELEGRAM DAN ALARM SUARA," *Jurnal Teknik dan Sistem Komputer (JTIKOM)*, vol. 3, no. 2, p. 2022.
- [8] N. P. Jasmine and A. Aji, "Penilaian Indeks Risiko Lingkungan (IRBA) TPA Sampah Bandengan, Kabupaten Jepara," *Indonesian Journal of Conservation*, vol. 12, no. 1, pp. 108–116, 2023, doi: 10.15294/jsi.v12i1.41919.
- [9] R. Kustanti, "Pengembangan UMKM Berbasis Ekonomi Kreatif di Kabupaten Jepara," *Jurnal Ekobistek*, vol. 11, pp. 239–244, Sep. 2022, doi: 10.35134/ekobistek.v11i3.366.
- [10] F. Sulaeman, K. S. Al-Fathi, and S. H. Gustinova, "Kelompok 24 PEMODELAN DINAMIKA TEGAKAN JEUNJING (*Paraserianthes falcataria*) BONITA III MENGGUNAKAN MATRIKS LESLIE DAN SOFTWARE STELLA," 2024.
- [11] A. Winyo, Trisno, and T. Kurra, "ANALISIS ALGORITMA ASOSIASI UNTUK MEMILIH JUDUL MAHASISWA SKRIPSI STIMKOM STELLA MARIS SUMBA," vol. 1, pp. 404–411, Jan. 2023.
- [12] Y. K. Sakti and D. Andi, "Pemodelan Sistem Dinamis Analisis Ketercapaian Reduksi Sampah Plastik Pada TPA Kota Surabaya," *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 7, no. 3, pp. 1874–1881, Jul. 2024, doi: 10.31004/jutin.v7i3.32112.
- [13] A. F. Fudhlaa, W. Rachmawati, and D. Retnowati, "Analysis of sugar import policy effects on sugar cane farmer's income in East Java: A system dynamic approach," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1072, no. 1, p. 012023, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1072/1/012023.
- [14] C. A. Febriyanti, D. Faridah, N. A. Agustin, and T. Ramdhan, "PEMODELAN DINAMIKA TEGAKAN RASAMALA (*Altingia excelsa*) BONITA III MENGGUNAKAN MATRIKS LEFKOVITCH DAN SOFTWARE STELLA," 2022.

- [15] A. N. Kholili, "Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Berbasis Mobile," *JURNAL INTECH*, vol. 4, no. 1, pp. 28–34, May 2023.
- [16] P. N. M. Sri, P. P. Johari, I. Pauzi, E. Prihantini, and A. J. C. Dacosta, "PEMODELAN DINAMIKA TEGAKAN HUTAN JENIS JATI (*Tectona grandis* L.f.) BONITA II MENGGUNAKAN MATRIKS LEFKOVITCH DENGAN SOFTWARE STELLA," 2023.