

Model Evaluatif dan Proyektif Sampah Rumah Tangga di Kota Pekanbaru: Analisis *System Dynamics* untuk Estimasi Kapasitas TPA

Agus Mulyadi¹

¹ Universitas Muhammadiyah Riau
agusmulyadi@umri.ac.id

Received: 16/05/2025; Revised: 02/02/2026; Accepted: 02/03/2026; Published: 30/06/2026

ABSTRACT

This study develops a system dynamics model to analyze household waste management and estimate landfill capacity in Pekanbaru, Indonesia. The modeling process begins with the construction of a causal loop diagram (CLD), followed by the development of a stock-and-flow diagram (SFD). A 20-year simulation (2023–2043) was conducted to evaluate future trends in waste generation and landfill availability. Model validation using mean comparison and amplitude variation tests confirms that the model accurately reflects the actual system behavior. The simulation results indicate an exponential increase in household waste generation, leading to landfill capacity depletion by 2030 under baseline conditions. To address this issue, the study evaluates three policy scenarios: increasing the proportion of treated waste, expanding the landfill area, and implementing leachate treatment technology. The results demonstrate that improving waste treatment rates extends the operational lifespan of the landfill, whereas landfill expansion provides only a temporary solution. Among the evaluated scenarios, leachate treatment yields the most significant long-term impact by extending landfill availability beyond the 20-year simulation horizon. This study provides insights into the dynamic behavior of household waste management systems and highlights the importance of proactive policy interventions to ensure sustainable landfill capacity. The findings offer policy implications for urban waste management planning in Pekanbaru and other rapidly growing cities.

Key words : Household Waste, Landfill Capacity, Policy, Simulation, System Dynamics

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan model sistem dinamik untuk menganalisis pengelolaan sampah rumah tangga dan mengestimasi kapasitas Tempat Pembuangan Akhir (TPA) di Kota Pekanbaru, Indonesia. Proses pemodelan diawali dengan penyusunan *causal loop diagram* (CLD) dan dilanjutkan dengan pengembangan *stock-and-flow diagram* (SFD). Penelitian ini melakukan simulasi selama 20 tahun (2023–2043) untuk mengevaluasi tren timbunan sampah dan ketersediaan kapasitas TPA di masa mendatang. Validasi model melalui uji perbandingan rata-rata dan variasi amplitudo menunjukkan bahwa model cukup merepresentasikan perilaku sistem secara baik. Hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan eksponensial timbunan sampah rumah tangga yang menyebabkan kapasitas TPA habis pada tahun 2030 dalam kondisi eksisting. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengevaluasi tiga skenario kebijakan, yaitu peningkatan persentase sampah yang terolah, perluasan lahan TPA, dan penerapan teknologi *leachate treatment*. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan tingkat pengolahan sampah dapat memperpanjang umur layanan TPA, sementara perluasan lahan TPA hanya memberikan solusi sementara. Di antara skenario yang dievaluasi, penerapan *leachate treatment* memberikan dampak jangka panjang paling signifikan dengan memperpanjang ketersediaan kapasitas TPA melampaui periode simulasi 20 tahun. Penelitian ini memberikan informasi mengenai perilaku dinamis sistem pengelolaan sampah rumah tangga serta menegaskan pentingnya intervensi kebijakan yang proaktif untuk menjamin keberlanjutan kapasitas TPA. Temuan penelitian ini memberikan implikasi kebijakan bagi perencanaan pengelolaan sampah perkotaan di Pekanbaru dan kota-kota lain yang mengalami pertumbuhan pesat.

Kata Kunci: Kebijakan, Sampah Rumah Tangga, Simulasi, System Dynamics, Tempat Pembuangan Akhi

PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah rumah tangga masih menjadi tantangan utama yang dihadapi oleh banyak kota di seluruh dunia, termasuk kota-kota di Indonesia (Bahagijo, 2019). Kota Pekanbaru sebagai salah satu kota terbesar dengan jumlah populasi penduduk 1 juta (Badan Pusat Statistik, 2025) tidak terkecuali dari permasalahan ini (Ernawaty, 2018). Pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat, serta peningkatan laju konsumsi, menyebabkan volume sampah rumah tangga mengalami kenaikan (Sancheta *et al.*, 2021). Kota Pekanbaru menghasilkan sampah sebesar 700 ton/hari; sebanyak 70% atau 500 ton dari jumlah tersebut dibuang ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Hal ini menciptakan tekanan signifikan pada infrastruktur pengelolaan sampah yang ada, salah satunya adalah ketersediaan TPA.

TPA merupakan fasilitas pengelolaan sampah sebagai lokasi akhir pembuangan sampah yang tidak dapat didaur ulang atau diolah lebih lanjut. Ketersediaan TPA yang terbatas menjadi isu yang krusial khususnya bagi negara berkembang (Ismail & Manaf, 2013). Untuk mengatasi permasalahan ini, estimasi kapasitas TPA merupakan langkah penting dalam perencanaan pengelolaan sampah yang efektif. Pengelolaan sampah yang efektif sangat penting untuk keberlanjutan lingkungan, dan kesehatan masyarakat (Fridolin, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada estimasi ketersediaan TPA di Pekanbaru dengan pendekatan *System Dynamics*.

System Dynamics merupakan pendekatan yang dapat digunakan

untuk menganalisis permasalahan kompleks dan perilaku sistem yang dinamis seiring berjalannya waktu (Forrester, 1968). Studi sebelumnya telah menunjukkan efektivitas sistem dinamik dalam mengevaluasi pengelolaan sampah, seperti pengelolaan sampah medis (Mulyadi & Arvitrida, 2021), sampah perkotaan (Kolikkathara *et al.*, 2010), sampah makanan (Lee *et al.*, 2019), konstruksi (Ding *et al.*, 2016) dan sampah rumah tangga (Inghels & Dullaert, 2011). Model ini mempertimbangkan faktor-faktor seperti pertumbuhan rumah tangga, timbulan limbah, tingkat sampah yang terolah, dan praktik pembuangan sampah. Dengan mempertimbangkan berbagai faktor dan interaksinya, pemodelan sistem dinamik memberikan pandangan holistik terhadap sistem pengelolaan sampah (Babalola, 2019).

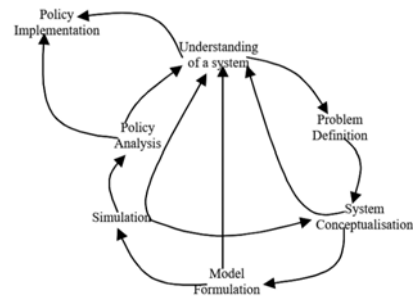
Studi oleh Chen *et al.* (2012) memprediksi kenaikan timbulan *municipal solid waste* (MSW) dan kapasitas TPA di Singapura untuk waktu 40 tahun. Studi ini mempertimbangkan variabel kunci berupa timbulan awal sampah, pembuangan, populasi, GDP, sosial-ekonomi dan kapasitas TPA. Studi lain yang dilakukan oleh Warlina dan Listyarini (2022) mengestimasi kekurangan kapasitas TPA berdasarkan jumlah timbulan sampah di Bantargebang, Jakarta. Namun, penelitian ini belum menunjukkan adanya struktur model kapasitas TPA secara eksplisit. Studi tersebut membandingkan kapasitas TPA dengan jumlah sampah di Jakarta, yang diproyeksikan hanya mampu bertahan hingga tahun 2030. Selanjutnya, Kolikkathara *et al.* (2010) mengestimasi timbulan limbah, kapasitas TPA, dan biaya

terkait menggunakan pemodelan sistem dinamik di Amerika Serikat. Model ini menunjukkan bahwa timbulan limbah padat dipengaruhi oleh faktor sosial-ekonomi dan populasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model sistem dinamik dalam menganalisis pengelolaan sampah rumah tangga serta mengestimasi kapasitas TPA di Kota Pekanbaru dalam jangka panjang. Penelitian ini tidak hanya memproyeksikan timbulan sampah dan ketersediaan lahan TPA, tetapi juga mengevaluasi berbagai skenario kebijakan untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada integrasi antara pemodelan kapasitas TPA dan analisis skenario kebijakan dalam satu kerangka sistem dinamik yang komprehensif, yang hingga saat ini masih terbatas dalam konteks pengelolaan sampah rumah tangga di kota-kota yang sedang berkembang.

METODE

System Dynamics merupakan metode pemodelan dinamik yang digunakan untuk memahami dan menganalisis sistem kompleks. Metode ini berfokus pada struktur dan perilaku sistem yang terdiri dari interaksi antar variabel dan *loop feedback* (Suryani *et al.*, 2020). Metode ini dikembangkan oleh Jay Forrester dalam menganalisis dan merancang kebijakan serta untuk membantu pengambilan keputusan (Sterman, 2000). **Gambar 1** menunjukkan proses pemodelan sistem pengelolaan sampah rumah tangga di Kota Pekanbaru.



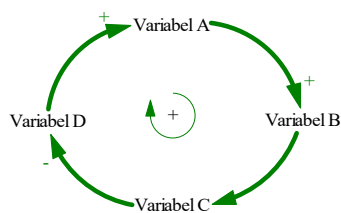
Gambar 1. Tahap Pengembangan Model System Dynamics (Richardson & Pugh, 1981)

Tahapan pengembangan model *system dynamics* dimulai dari pemahaman mendalam tentang sistem, yang melibatkan pengumpulan informasi dan data terkait masalah pengelolaan sampah rumah tangga. Data kuantitatif yang digunakan dalam penelitian ini mencakup data populasi Kota Pekanbaru periode 2015–2023 dari Badan Pusat Statistik (BPS), data timbulan sampah harian dari Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan Kota Pekanbaru, serta kapasitas lahan TPA eksisting. Selain itu, penelitian ini menggunakan beberapa asumsi utama untuk merepresentasikan kondisi sistem secara terukur dan konsisten. Rata-rata jumlah anggota keluarga diasumsikan sebesar 4 orang per rumah tangga berdasarkan data demografi Kota Pekanbaru. Timbulan sampah harian per rumah tangga diasumsikan sebesar 0,0025 ton per hari. Selain itu, pada kondisi eksisting, persentase sampah yang terolah diasumsikan sebesar 32%, sedangkan sisanya dibuang ke TPA.

Proses pemahaman sistem ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi elemen-elemen kunci dalam sistem. Kemudian berikutnya yaitu *problem identification and definition* yang diatasi dengan model *system*

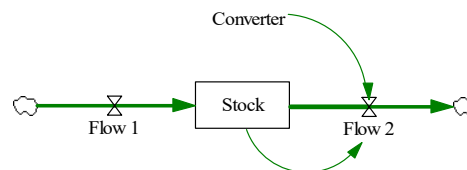
dynamics. Fokus permasalahan dalam penelitian ini yaitu ketersediaan lahan TPA akibat timbunan sampah rumah tangga yang meningkat setiap waktu.

Selanjutnya, sistem diubah menjadi sebuah *causal loop diagram* (CLD) pada tahap *system conceptualization* yang mencerminkan hubungan antara variabel-variabel utama dalam sistem. Diagram tersebut terdiri dari variabel yang dihubungkan oleh anak panah yang menunjukkan hubungan sebab akibat dengan sebuah tanda (baik + atau -) pada sebuah tautan seperti yang terlihat pada **Gambar 2**. Tanda tersebut memiliki makna yaitu hubungan sebab akibat dari variabel A ke Variabel B adalah positif (+), artinya perubahan pada variabel A menghasilkan perubahan pada variabel B dalam arah yang sama. Sebaliknya, hubungan sebab akibat yang bernilai negatif (-) dari variabel C ke variabel D menunjukkan bahwa perubahan pada variabel C akan memicu perubahan pada variabel D dengan arah yang berlawanan. Selain itu, hubungan sebab akibat yang membentuk *loop* lengkap diberikan tanda. *Feedback loop reinforcing* (+), jika terdiri dari jumlah tautan negatif yang genap. *Loop reinforcing* ini menunjukkan ketidakseimbangan. Di sisi lain, *feedback loop balancing* (-) terjadi jika terdiri dari tautan negatif berjumlah ganjil. *Loop balancing* menunjukkan sistem berusaha kembali ke keseimbangan.



Gambar 2. Notasi *Causal Loop Diagram*

Pada CLD tidak memungkinkan membedakan antara *stock* dan *rate*, sehingga perlu menggunakan *stock and flow diagram* (SFD). *Sistem dynamics* dibangun dari variabel yang terdiri dari *stock*, *flow*, dan *auxiliary* (Suryani *et al.*, 2020). Penelitian ini menggunakan *software Ventana Simulation* (Vensim).



Gambar 3. Variabel Dasar *Stock And Flow Diagram*

Tahapan selanjutnya yaitu *model formulation* atau pengembangan persamaan model. Tahap ini melibatkan pengembangan persamaan matematis yang menggambarkan bagaimana variabel-variabel dalam sistem berubah seiring waktu. Model ini menciptakan landasan matematis untuk memahami perilaku sistem dan memungkinkan untuk menjalankan simulasi yang memberikan wawasan tentang bagaimana sistem akan berperilaku dalam berbagai skenario. Simulasi dan validasi adalah tahap penting dalam pengembangan model. Model yang telah diformulasikan diuji melalui Vensim untuk menjalankan simulasi yang mencerminkan kondisi nyata (Morecroft, 2015). Dua proses validasi yang dapat dilakukan yaitu menghitung mean comparison dan perbandingan variasi amplitudo (Barlas, 1989).

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

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

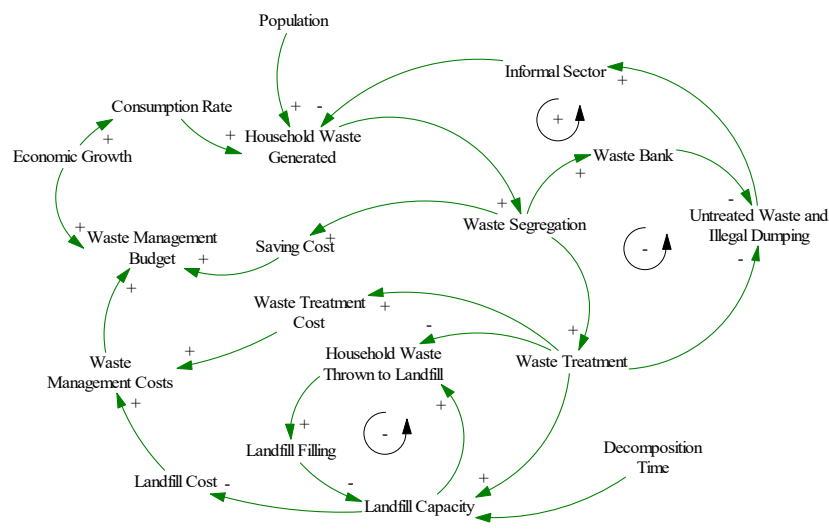
$$E2 = \frac{|S_s - S_a|}{S_a} \times 100\% \quad [2]$$

Dimana S_s merupakan standar deviasi model, dan S_a merupakan standar deviasi data aktual. E2 dikatakan valid jika bernilai $< 30\%$. Selanjutnya, model digunakan untuk menganalisis berbagai skenario kebijakan, seperti perubahan pada ketersediaan lahan TPA di kota Pekanbaru. Analisis ini memberikan wawasan tentang dampak potensial dari berbagai tindakan atau kebijakan pada sistem pengelolaan sampah rumah tangga. Akhirnya, hasil analisis kebijakan digunakan sebagai dasar untuk merancang kebijakan yang lebih baik untuk perbaikan sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Model causal loop diagram (CLD) dan stock and flow diagram (SFD)

Model pengelolaan sampah rumah tangga berfokus terhadap timbulan sampah yang dihasilkan dari konsumsi rumah tangga dan dampaknya terhadap ketersediaan TPA. Model CLD pengelolaan sampah rumah tangga dapat dilihat pada gambar 3. Setiap anak panah menunjukkan sebab dari suatu variabel berdampak terhadap variabel lainnya. Hipotesis interaksi ini didasarkan pada kajian pustaka dan studi lapangan. Dinamis model tersebut dihasilkan oleh *loop feedback* yang terdapat pada CLD. Terdapat 3 *loop* utama yaitu 2 *loop reinforce* dan 1 *loop balancing*. *Loop 1* dan *Loop 2* mengilustrasikan bahwa ketidakmampuan sistem dalam mengolah sampah secara maksimal akan memicu peningkatan timbulan sampah rumah tangga secara terus-menerus.



Gambar 4. Causal Loop Diagram dari Pengelolaan sampah Rumah Tangga

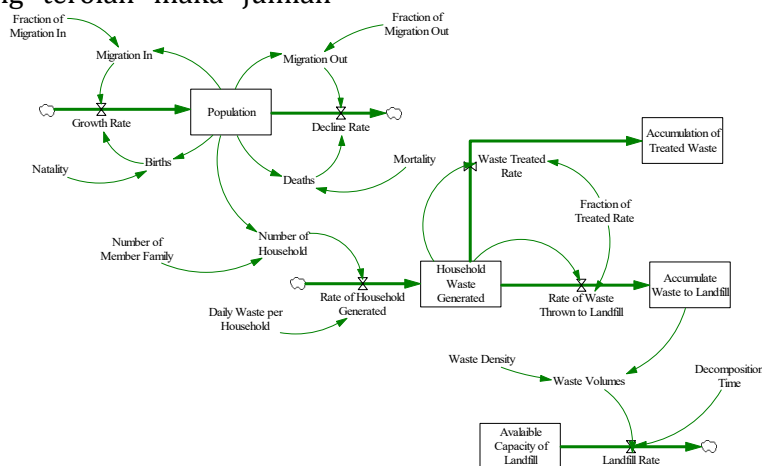
Sedangkan *loop 3* berupa *loop balancing* mengenai ketersediaan TPA sangat bergantung terhadap jumlah sampah yang dibuang di TPA.

Timbulan sampah rumah tangga dipengaruhi oleh variabel utama yaitu jumlah populasi dan tingkat konsumsi. Kedua variabel ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan timbulan sampah rumah tangga. Pemilahan dan pengolahan sampah secara tidak langsung dapat mengurangi timbulan sampah, namun untuk hal ini sangat terbatas dalam hal kapasitas. Pengolahan seperti daur ulang dan kompos terbatas untuk jenis sampah tertentu dan jumlah yang diolah sangat terbatas. Hal ini menyebabkan banyak timbulan sampah yang akhirnya tidak terolah dengan baik atau dibuang secara ilegal dan menyebabkan pertumbuhan profesi baru (*informal sector*) yaitu pemulung. Pada sisi lainnya pemilahan sampah rumah tangga seperti memisahkan sampah organik dan anorganik sangat berdampak terhadap penghematan biaya pengelolaan secara keseluruhan.

Berbanding terbalik dengan pengolahan sampah, semakin banyak sampah yang terolah maka jumlah

biaya yang digunakan ikut meningkat. Sampah rumah tangga yang tidak dapat terolah harus dikumpulkan dan dibuang ke TPA. Namun sayangnya, ketersediaan lahan TPA sangat terbatas. Oleh karena itu, Pemerintah Kota Pekanbaru telah beberapa kali memperluas lahan pembuangan sampah tersebut. TPA kota Pekanbaru berlokasi di dua tempat. Kedua TPA tersebut berlokasi di kelurahan Muara Fajar, Rumbai. TPA 1 dibangun tahun 1997 dengan luas area sebesar 8,6 Ha, namun pada tahun 2007 lahan TPA ini sudah penuh atau tidak dapat menerima sampah lagi. Adapun TPA 2 yang berjarak 1,2 km dari TPA 1 memiliki luas lahan yang lebih kecil, yaitu 5,5 ha. Keterbatasan lahan TPA tersebut menjadi sebuah tantangan bagi pemerintah kota Pekanbaru dalam mengelola sampah rumah tangga khususnya.

Dalam upaya mengatasi urgensi permasalahan pengelolaan sampah rumah tangga, pendekatan system dynamics dapat diimplementasikan sebagai instrumen analisis yang efektif untuk merumuskan solusi berkelanjutan



Gambar 5. Stock & Flow diagram dari Pengelolaan sampah Rumah Tangga

Artikel ini menggambarkan bagaimana model *system dynamics* dapat digunakan untuk merinci dan memproyeksikan kapasitas Tempat Pembuangan Akhir (TPA) pada Kota Pekanbaru. Bagian ini menjelaskan lebih lanjut mengenai model SFD yang digunakan dalam analisis. Konsep SFD digunakan untuk menggambarkan akumulasi dan aliran dalam sistem, yang menjadi kunci dalam memahami perubahan kapasitas TPA dari waktu ke waktu. Model SFD pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 5.

Pada model SFD terlihat bahwa timbulan sampah rumah tangga dipengaruhi oleh jumlah rumah tangga dan jumlah sampah yang dihasilkan per rumah tangga setiap harinya dalam akumulasi tahunan. Jumlah rumah tangga sangat dipengaruhi oleh banyaknya populasi di Kota Pekanbaru. Saat ini populasi kota ini 1.007.540 Jiwa. Berdasarkan data BPS, populasi dipengaruhi oleh empat variabel utama yaitu kelahiran, kematian, migrasi masuk dan migrasi keluar. Timbulan sampah rumah tangga yang dihasilkan tidak semua dapat terolah dengan baik. Hanya 32% dari total timbulan yang terolah, sedangkan sisanya dibuang ke TPA. TPA di Kota Pekanbaru menerapkan metode open dumping; pada metode ini, sampah dibuang begitu saja ke lahan terbuka tanpa adanya penutupan lapisan tanah maupun pengolahan lebih lanjut. Akibatnya jumlah sampah yang dapat tertampung di TPA sangat terbatas. Jika kondisi ini terus berlanjut, TPA akan mengalami kelebihan kapasitas dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Adapun beberapa formulasi SFD dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1.
 Formulasi-formulasi dalam SFD

Variable	Komponen	Formulasi	Satuan
Population	Level	INTEG(Growth Rate-Decline Rate)	People
Number of Household	Variable	Population/Number of Member of Family	household
Rate of Household Generated	Rate	Daily Waste per Household*Number of Household	ton/Year
Household Waste Generated	Level	INTEG (Rate of Household Generated-Rate of Waste Thrown to Landfill-Waste Treated Rate)	ton
Avalaible Capacity of Landfill	Level	INTEG (-Landfill Rate)	Meter kubik
Waste Volumes	Variable	Accumulate Waste to Landfill/Waste Density	Meter kubik

2. Verifikasi dan validasi model

Verifikasi model dilakukan untuk menguji logika antara model konseptual dengan model komputer yang dibangun (Law & Kelton, 1991). Proses verifikasi dilakukan dengan tiga cara yaitu (1) *dimensional consistency*, berupa mengetahui konsistensi unit seluruh variabel dari model yang dibangun. (2) *structure verification*, berupa membandingkan struktur model terhadap dunia nyata. Pada *Software vensim* telah menyediakan feature untuk memverifikasi dua cara ini. Sementara itu, cara ketiga adalah pengujian *trace output*, yaitu mengevaluasi hasil simulasi melalui penelusuran perhitungan manual (*hand*

calculation). Langkah ini bertujuan untuk menguji kelogisan (*reasonability*) serta kewajaran keluaran (*plausibility output*) model terhadap perilaku sistem yang diharapkan

Validasi model merupakan proses pengujian model yang dibangun sudah merepresentasikan dari system nyata (Law & Kelton, 1991). Pada penelitian ini pengujian validasi dilakukan dengan dua cara yaitu perbandingan rata-rata dan perbandingan variasi amplitudo (Barlas, 1989). Hasil validasi untuk variabel populasi dengan perbandingan rata-rata dapat dilihat pada Tabel 2, sedangkan dengan menggunakan variasi amplitudo-nya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2.
Validasi Menggunakan Perbandingan Rata-Rata

Rata-rata data aktual	Rata-rata data simulasi	Perbandingan rata-rata
994.214	1.022.600,6	2,87%

Tabel 3.
Validasi Menggunakan Variasi Amplitudo

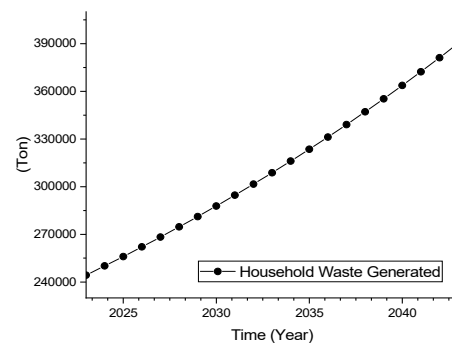
St. Deviasi data aktual	St. deviasi data simulasi	Variasi amplitudo
33.235,9 2	37.836,0 3	13,84%

Tabel 2 dan **3** menggambarkan representasi yang baik dari model yang telah dikembangkan terhadap sistem yang dibangun. Hasil validasi melalui perbandingan rata-rata menunjukkan bahwa kesalahan yang dihasilkan oleh model ini adalah 2,87% atau kurang dari 5%,

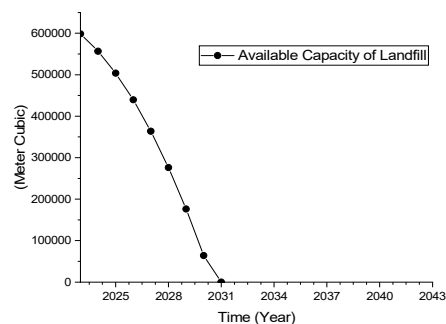
sementara variasi amplitudo di bawah 30%. Dengan nilai 2,87% dan 13,84% yang telah dihasilkan dalam validasi ini, dapat disimpulkan bahwa model ini telah berhasil menggambarkan dinamika pengelolaan sampah rumah tangga secara memuaskan

3. Hasil simulasi

Pada hasil simulasi dapat terlihat jika tidak dilakukan tindakan apapun, jumlah rumah tangga akan terus meningkat mencapai 741.937 rumah tangga pada tahun 2043, dengan rata-rata timbulan sampah rumah tangga yang dihasilkan setiap tahun sebesar 311.863,4 ton seperti yang terlihat pada **Gambar 6**. Hal tersebut berdampak terhadap ketersediaan TPA yang berakhir pada tahun 2030 seperti yang terlihat pada **Gambar 7**.



Gambar 6. Hasil Simulasi Jumlah Sampah Rumah Sampai 2043



Gambar 7. Hasil Simulasi Ketersediaan Lahan TPA

4. Skenario kebijakan

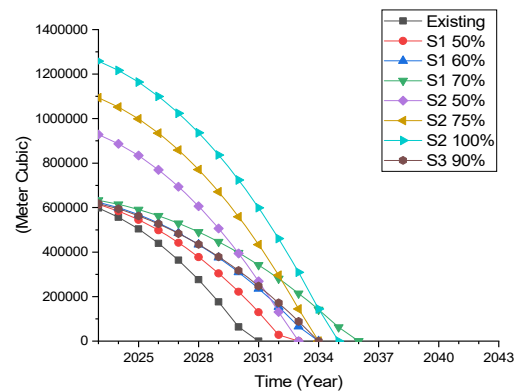
Skenario model merupakan metode prognosis dimana data saat ini digunakan untuk mengembangkan berbagai kemungkinan alternatif masa depan (Von Reibnitz, 1988). Pada model ini skenario dibagi menjadi 2 jenis yaitu skenario parameter dan skenario struktur (Suryani *et al.*, 2020). Variabel hasil yang digunakan untuk melihat skenario yaitu ketersediaan kapasitas TPA dalam satuan tahun. Skenario parameter dilakukan dengan mengubah nilai variabel model. pada penelitian ini terdapat 2 variabel yang diubah nilai variabelnya dengan level tertentu.

Variabel pertama yang diubah yaitu peningkatan persentase/fraksi sampah yang terolah. Variabel ini mengubah nilai para variabel dengan 3 level yang berbeda. Kondisi eksisting hanya 32% sampah rumah tangga yang terolah dengan baik. Peningkatan sampah yang terolah dibagi menjadi 3 level yaitu 50%, 60%, dan 70%. Skenario parameter kedua yaitu dengan peningkatan luas lahan TPA itu sendiri, pertimbangan hal ini karena metode ini salah satu metode yang paling banyak digunakan oleh negara berkembang seperti Indonesia dengan biaya pengelolaan sampah rendah. Peningkatan luas lahan TPA sebesar 50%, 75% dan 100% dari kondisi eksisting.

Selanjutnya skenario struktur, dimana skenario ini mengubah struktur suatu model (Suryani *et al.*, 2020). Skenario ini dipertimbangkan berdasarkan survei terdahulu oleh instansi perencanaan Pemerintah Kota Pekanbaru terkait penerapan

teknologi pengubah sampah menjadi energi (*waste to energy*). Teknologi yang direncanakan adalah *landfill gas* (LFG) yang dikombinasikan dengan *leachate treatment*. Berdasarkan informasi tersebut, skenario ini memformulasikan penambahan variabel *leachate treatment* pada timbulan limbah dengan nilai sebesar 90%.

Skenario-skenario tersebut dibandingkan untuk menentukan kebijakan terbaik dalam pengelolaan sampah rumah tangga khususnya yang dapat memberikan hasil ketersediaan TPA lebih lama, sehingga sampah dapat terus ditampung. Hasil perbandingan skenario dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil Simulasi Ketersediaan Lahan TPA

Tabel 4. Hasil Skenario Simulasi

Type of Scenarios	Scenarios	Value	Availability of Landfills (Years)
Parameter	Increase in the percentage of wasted treatment	50%	10
		60%	11
		70%	13
Structure	Landfill Expansion	50%	10
		75%	11

		100%	12
Structure	leachate treatment	90%	>2 0

Dalam skenario peningkatan persentase jumlah sampah, terlihat bahwa semakin besar peningkatan, semakin lama ketersediaan lahan TPA mampu menampung sampah. Skenario ini menunjukkan bahwa efisiensi perencanaan dan pengelolaan menjadi hal krusial di tengah peningkatan laju timbulan sampah. Skenario ini menggarisbawahi perlunya kesadaran masyarakat dan pendekatan yang berkelanjutan terhadap pengelolaan sampah untuk mengurangi peningkatan yang drastis dalam kapasitas TPA yang diperlukan.

Skenario perluasan TPA menunjukkan bahwa walaupun perluasan TPA dapat memperpanjang umur TPA, ini bukanlah solusi jangka panjang yang berkelanjutan. Meskipun perluasan TPA bisa memberi waktu tambahan, pada akhirnya TPA akan mencapai kapasitas maksimalnya. Ini menggarisbawahi pentingnya mencari alternatif lain, seperti daur ulang, pengurangan timbulan sampah, atau penggunaan metode pengolahan sampah yang lebih efisien.

Skenario struktur dengan *leachate treatment* menunjukkan dampak besar dari penambahan jenis treatment ini dalam memperpanjang umur TPA. Dalam kasus ini, umur TPA melebihi 20 tahun, yang menunjukkan bahwa tindakan seperti *leachate treatment* dapat berkontribusi secara signifikan terhadap kelangsungan pengelolaan TPA yang lebih berkelanjutan. Ini mendorong pentingnya investasi dalam teknologi

dan infrastruktur yang mendukung pengelolaan sampah yang lebih efisien.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas pengolahan sampah memberikan dampak yang lebih sistemik dibandingkan sekadar perluasan lahan TPA. Secara struktural, peningkatan persentase sampah yang terolah mengurangi laju akumulasi limbah secara langsung, sehingga memperlambat tekanan terhadap kapasitas TPA. Sebaliknya, perluasan lahan TPA hanya menambah kapasitas fisik tanpa mengurangi akar permasalahan, yaitu pertumbuhan timbulan sampah. Hal ini menunjukkan bahwa kebijakan berbasis reduksi dan pengolahan sampah di sumbernya lebih berkelanjutan dibandingkan kebijakan ekspansi infrastruktur. Temuan penelitian ini sejalan dengan studi Chen *et al.* (2012) dan Kollikkathara *et al.* (2010) yang menunjukkan bahwa tanpa intervensi kebijakan, kapasitas TPA akan mengalami deplesi dalam jangka waktu relatif singkat akibat pertumbuhan timbulan sampah. Hasil ini juga memperkuat argumen bahwa strategi pengolahan dan reduksi sampah lebih efektif dalam jangka panjang dibandingkan perluasan TPA. Namun demikian, berbeda dengan beberapa penelitian yang menekankan faktor sosial-ekonomi sebagai variabel dominan, penelitian ini lebih menitikberatkan pada intervensi struktural dalam sistem pengelolaan sampah rumah tangga.

5. Keterbatasan penelitian

Meskipun model sistem dinamik yang dikembangkan telah melalui proses verifikasi dan validasi serta

mampu merepresentasikan perilaku sistem secara memadai, penelitian ini tetap memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan. Model mengasumsikan bahwa sistem pengelolaan TPA di Kota Pekanbaru masih menggunakan metode *open dumping*, sehingga belum mempertimbangkan kemungkinan transisi bertahap menuju teknologi pengelolaan yang lebih modern. Selain itu, beberapa parameter kunci, seperti timbulan sampah per rumah tangga, diasumsikan konstan selama periode simulasi 2023–2043. Dalam praktiknya, parameter tersebut dapat dipengaruhi oleh perubahan pola konsumsi masyarakat, kebijakan pengurangan sampah, maupun dinamika sosial-ekonomi yang berkembang dari waktu ke waktu.

Selain keterbatasan struktural dan asumsi parameter, model ini juga belum secara eksplisit memasukkan unsur ketidakpastian data dan variabilitas eksternal melalui analisis sensitivitas atau pendekatan stokastik. Data yang digunakan merepresentasikan kondisi historis dan eksisting, sehingga potensi fluktuasi akibat perubahan kebijakan, pertumbuhan ekonomi, maupun faktor demografis belum sepenuhnya terakomodasi. Oleh karena itu, hasil simulasi dalam penelitian ini perlu dipahami sebagai proyeksi berbasis asumsi tertentu dan bukan sebagai prediksi absolut.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan model sistem dinamik untuk menganalisis pengelolaan sampah rumah tangga dan mengestimasi kapasitas TPA di Kota Pekanbaru dalam periode 2023–2043. Model

dibangun melalui *causal loop diagram* dan *stock-and-flow diagram* serta divalidasi menggunakan metode perbandingan rata-rata dan variasi amplitudo, yang menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan perilaku sistem secara memadai. Hasil simulasi pada kondisi eksisting menunjukkan bahwa peningkatan timbulan sampah yang bersifat eksponensial menyebabkan kapasitas TPA habis pada tahun 2030.

Evaluasi skenario kebijakan menunjukkan bahwa peningkatan persentase sampah yang terolah mampu memperpanjang umur layanan TPA secara signifikan, sedangkan perluasan lahan TPA hanya memberikan solusi sementara. Di antara seluruh skenario yang dianalisis, penerapan teknologi *leachate treatment* memberikan dampak jangka panjang paling signifikan dengan memperpanjang ketersediaan kapasitas TPA melampaui periode simulasi 20 tahun. Temuan ini menegaskan bahwa kebijakan berbasis reduksi dan pengolahan sampah di sumbernya lebih efektif dibandingkan pendekatan ekspansi infrastruktur semata.

Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan melalui Integrasi variabel sosial-ekonomi, evaluasi aspek biaya dan kelayakan teknologi, serta pengembangan pendekatan multi-metode, seperti kombinasi sistem dinamik dan analisis ekonomi berpotensi menghasilkan model yang lebih komprehensif dalam mendukung perencanaan pengelolaan sampah perkotaan yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih kepada Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan Kota Pekanbaru serta Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Pekanbaru atas kerja sama dan bantuannya dalam menyediakan data historis kependudukan dan timbulan sampah yang sangat mendukung penyelesaian penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- Babalola, M. A. (2019). A system dynamics-based approach to help understand the role of food and biodegradable waste management in respect of municipal waste management systems. *Sustainability*, 11(12).
- Badan Pusat Statistik. (2025). *Kota Pekanbaru dalam angka 2025*.
- Bahagijo, M. (2019). *Indonesia's waste emergency: Indonesia's landfills are on the verge of overcapacity*. Waste4Change. <https://perma.cc/X3BV-SGUQ>
- Barlas, Y. (1989). Multiple tests for validation of system dynamics type of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 42(1), 59–87. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90059-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90059-3)
- Chen, M., Giannis, A., & Wang, J.-Y. (2012). *Application of system dynamics model for municipal solid waste generation and landfill capacity evaluation in Singapore*. Semantic Scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-system-dynamics-model-for-municipal-Chen-Giannis/4d4c851f2d75cd53d66ec4655a5532a39da49e61>
- Ding, Z., Yi, G., Tam, V. W. Y., & Huang, T. (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. *Waste Management*, 51, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.001>
- Ernawaty, E. (2018). *Implementation of law number 18 year 2008 regarding waste management*. Universitas Riau.
- Forrester, J. W. (1968). *Principles of systems* (2nd ed.). Pegasus Communication.
- Fridolin, H. (2022). *Pengelolaan sampah di Indonesia*. Direktorat Jenderal Kekayaan Negara Kementerian Keuangan RI. <https://www.djkn.kemenkeu.go.id/kpkn-lahat/baca-artikel/14891/Pengelolaan-Sampah-di-Indonesia.html>
- Inghels, D., & Dullaert, W. (2011). An analysis of household waste management policy using system dynamics modelling. *Waste Management & Research*, 29(4), 351–370. <https://doi.org/10.1177/0734242X10373800>
- Ismail, S. N. S., & Manaf, L. A. (2013). The challenge of future landfill: A case study of Malaysia. *Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences*, 5(6), 86–96. <https://doi.org/10.5897/JTEHS12.058>
- Kollikkathara, N., Feng, H., & Yu, D. (2010). A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. *Waste Management*, 30(11), 2194–2203. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.012>
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Lee, C. K. M., Ng, K. K. H., Kwong, C. K., & Tay, S. T. (2019). A system dynamics model for evaluating food waste management in Hong Kong, China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(3), 433–456. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0804-8>
- Morecroft, J. D. W. (2015). *Strategic modelling and business dynamics: A feedback systems approach* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Mulyadi, A., & Arvitrida, N. I. (2021). *Managing medical waste during COVID-19 outbreak: A simulation approach*.
- Richardson, G., & Pugh, A. L. (1981). *Introduction to system dynamics modelling with Dynamo*. Productivity Press.
- Sancheta, L. do N., Chaves, G. de L. D., & Siman, R. R. (2021). The use of system dynamics on urban solid waste management: A literature analysis. *Gestão & Produção*, 28, Artikel e5336.

<https://doi.org/10.1590/1806-9649-2021v28e5336>

Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.

Suryani, E., Hendrawan, R. A., & Rahmawati, U. E. (2020). *Model dan simulasi sistem dinamik*. Deepublish.

Von Reibnitz, U. (1988). *Scenario techniques*. McGraw-Hill.

Warlina, L., & Listyarini, S. (2022). The study of estimation of landfill capacity through dynamic system approach. *Scientifica*, 2022, Artikel e1068111. <https://doi.org/10.1155/2022/1068111>