

PEMODELAN SISTEM DINAMIS PENGELOLAAN SAMPAH PESERTA KELAS BELAJAR ZERO WASTE MELALUI PRINSIP 3AH (CEGAH, PILAH, DAN OLAH)

Nurul Hidayah

Program Magister Studi Lingkungan, Universitas Terbuka Indonesia, Tangerang, Indonesia

Korespondensi: cakoyong@gmail.com

Abstrak

Masalah pengelolaan sampah di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan urbanisasi, dengan timbulan sampah mencapai 68 juta ton per tahun, termasuk 15% sampah plastik yang sulit terurai. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengelolaan sampah berbasis komunitas melalui pendekatan pemodelan sistem dinamis pada peserta Kelas Belajar Zero Waste (BZW) yang mengadopsi prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah). Dengan menggunakan Causal Loop Diagram (CLD) dan Stock and Flow Diagram (SFD), penelitian ini memetakan interaksi variabel seperti jumlah peserta, literasi lingkungan, timbulan sampah, serta efektivitas pencegahan, pemilahan, dan pengolahan sampah. Data diperoleh dari survei terhadap 492 alumni Kelas BZW dan data sekunder terkait pengelolaan sampah. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Powersim Studio 10 dengan validasi model menggunakan metode Absolute Mean Error (AME) yang menghasilkan tingkat kesalahan sebesar 2%, menunjukkan model yang valid. Penelitian ini menguji empat skenario kebijakan: Business as Usual (BAU), peningkatan literasi lingkungan, peningkatan pencegahan sampah, dan optimalisasi pengolahan sampah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario optimal adalah peningkatan kapasitas pengolahan sampah organik dan anorganik, yang berhasil mengurangi residu hingga -56,87 ton pada tahun 2030. Selain itu, jumlah sampah terpilah mencapai 100% dari timbulan sampah yang dihasilkan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan pemodelan sistem dinamis efektif dalam mendukung pengambilan keputusan strategis untuk pengelolaan sampah berbasis komunitas, serta memberikan rekomendasi untuk memperkuat literasi lingkungan dan efisiensi pengolahan sampah guna mencapai keberlanjutan.

Kata kunci: Pengelolaan sampah, Kelas Belajar Zero Waste, Pemodelan sistem dinamis, Prinsip 3AH, Kebijakan lingkungan

Abstract

The waste management problem in Indonesia continues to escalate alongside population growth and urbanization, with waste generation reaching 68 million tons annually, including 15% plastic waste that is difficult to decompose. This study aims to analyze community-based waste management through a system dynamics modeling approach applied to participants of the Zero Waste Learning Class (BZW), which adopts the 3AH principles (Prevent, Sort, Process). Using Causal Loop Diagram (CLD) and Stock and Flow Diagram (SFD), this study maps the interactions between variables such as the number of participants, environmental literacy, waste generation, and the effectiveness of prevention, sorting, and processing activities. Data was collected through surveys of 492 BZW alumni and secondary data on waste management. Simulations were performed using Powersim Studio 10 software, with model validation conducted using the Absolute Mean Error (AME) method, yielding an error rate of 2%, indicating a valid model. This study examines four policy scenarios: Business as Usual (BAU), improved environmental literacy, enhanced waste prevention, and optimized waste processing. The simulation results show that the optimal scenario is increasing the capacity for organic and inorganic waste processing, which successfully reduced residual waste to -56.87 tons by 2030. Furthermore, the amount of sorted waste reached 100% of the generated waste. This study concludes that the system dynamics modeling approach is effective in supporting strategic decision-making for community-based waste management and provides recommendations to enhance environmental literacy and waste processing efficiency to achieve sustainability.

Keywords: Waste management, Zero Waste Learning Class, System dynamics modeling, 3AH principles, Environmental policy

1. PENDAHULUAN

Masalah pengelolaan sampah telah menjadi tantangan global yang mempengaruhi lingkungan, kesehatan masyarakat, dan keberlanjutan ekosistem. Di Indonesia, volume sampah terus meningkat setiap tahun, mencapai sekitar 68 juta ton per tahun, dengan 15% diantaranya berupa sampah plastik yang sulit terurai (KLHK, 2021). Peningkatan ini didorong oleh pesatnya pertumbuhan populasi dan urbanisasi, sehingga mendorong perlunya solusi inovatif yang tidak hanya berfokus pada pengelolaan sampah secara teknis tetapi juga perubahan perilaku masyarakat.

Sebagai salah satu inisiatif berbasis pendidikan, Kelas Belajar Zero Waste (BZW) hadir untuk menjawab tantangan tersebut. Program ini tidak hanya mengajarkan pengelolaan sampah secara praktis tetapi juga mempromosikan prinsip 3AH (Cegah, Pilah, dan Olah) sebagai pendekatan integral dalam mengurangi timbulan sampah di tingkat rumah tangga. D.K. Wardhani, pendiri Kelas BZW, menekankan pentingnya mengubah paradigma masyarakat dari konsumsi berlebih menuju gaya hidup berkelanjutan melalui rumah tangga minim sampah (Alumnia, 2024; Muhammad, 2020).

Prinsip 3AH yang diterapkan mencakup langkah-langkah preventif (cegah) dalam mengurangi timbulan sampah, pemisahan sampah berdasarkan jenisnya (pilah), hingga pengolahan sampah organik menjadi kompos atau produk lain yang bermanfaat (olah). Dengan pendekatan ini, Kelas BZW bertujuan untuk menciptakan literasi lingkungan yang kuat di kalangan masyarakat, yang menurut Chawla dan Cushing (2007), merupakan prasyarat penting bagi perubahan perilaku pro lingkungan.

Program ini memiliki dampak luas. Studi oleh Febiarthy (2024) menunjukkan bahwa peserta Kelas BZW cenderung lebih konsisten dalam mempraktikkan perilaku minim sampah, baik di lingkungan rumah tangga maupun komunitas. Selain itu, laporan Mirna (2021) dan Al Biruni (2021) menyoroti bagaimana pengalaman mengikuti kelas ini mendorong peserta untuk mengadopsi gaya hidup yang lebih berkelanjutan, seperti membawa wadah sendiri saat berbelanja atau memanfaatkan kembali barang-barang yang sudah tidak terpakai.

Dalam upaya memahami dinamika perubahan perilaku yang dihasilkan dari program ini, pendekatan pemodelan sistem dinamis menawarkan alat yang efektif. Menurut Sterman (2002), sistem dinamis memungkinkan analisis terhadap hubungan kompleks dalam suatu sistem yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti issue lingkungan, literasi lingkungan, dan intervensi lingkungan sekitar. Dengan menggunakan Causal Loop Diagrams (CLD) dan Stock and Flow Diagrams (SFD), kita dapat memetakan interaksi antara berbagai subsistem, termasuk timbulan

sampah yang dicegah, sampah yang dipilah dan diolah, serta residu yang dihasilkan. Studi oleh Rusvinasari dan Risnanto (2024) menunjukkan bahwa pendekatan sistem dinamis efektif untuk meramalkan dampak dari kebijakan pengelolaan sampah di tingkat lokal.

Selain itu, pendekatan sistem dinamis juga relevan dalam konteks perubahan perilaku kolektif yang dipengaruhi oleh literasi lingkungan. Ajzen (1991) melalui Theory of Planned Behavior (TPB) menjelaskan bahwa niat untuk berperilaku ramah lingkungan dipengaruhi oleh sikap, norma subjektif, dan persepsi kontrol atas perilaku. Dalam program BZW, faktor-faktor ini diperkuat melalui pendidikan yang menyentuh aspek pengetahuan, keterampilan, dan kesadaran lingkungan (Popli et al., 2017; Manasakunkit & Chinda, 2017).

Studi lain menunjukkan bahwa penerapan sistem dinamis juga dapat digunakan untuk mengukur efisiensi pendekatan 3AH dalam mengurangi beban tempat pembuangan akhir (TPA) melalui seberapa banyak sampah residu yang dihasilkan. Misalnya, penelitian Ding et al. (2016) di China menunjukkan bagaimana simulasi sistem dinamis dapat membantu mengidentifikasi skenario pengelolaan sampah yang optimal untuk mengurangi dampak lingkungan. Hal serupa diharapkan dapat diterapkan dalam program Kelas BZW untuk memperkuat upaya pengelolaan sampah berbasis masyarakat.

Meskipun berbagai studi telah mengkaji pengelolaan sampah berbasis masyarakat dan pemodelan sistem dinamis, penelitian terkait efektivitas program edukasi lingkungan seperti Kelas Belajar Zero Waste (BZW) dalam konteks sistem dinamis masih sangat terbatas. Belum banyak penelitian yang mengintegrasikan data empiris peserta program edukasi minim sampah ke dalam model sistem dinamis untuk menganalisis keterkaitan antara literasi lingkungan, perubahan perilaku, dan dampaknya terhadap timbulan, pemilahan, serta residu sampah. Selain itu, belum ada penelitian sebelumnya yang secara khusus menguji skenario kebijakan berbasis prinsip 3AH (Cegah–Pilah–Olah) menggunakan pendekatan sistem dinamis pada skala peserta BZW.

Gap Penelitian: Meskipun studi-studi sebelumnya telah mengkonfirmasi dampak positif perilaku peserta BZW, belum ada penelitian yang secara komprehensif menggunakan pemodelan sistem dinamis untuk menganalisis interaksi kompleks antara literasi lingkungan, perubahan perilaku, dan efektivitas implementasi prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah) dalam konteks program BZW. Kesenjangan penelitian ini terletak pada kebutuhan akan alat prediktif dan strategis yang dapat menguji berbagai skenario kebijakan untuk memaksimalkan pengurangan residu sampah dan menjamin keberlanjutan program BZW di masa depan.

Tujuan Penelitian: Berdasarkan kesenjangan tersebut, tujuan utama penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan model sistem dinamis untuk memetakan dan menganalisis dinamika pengelolaan sampah peserta Kelas Belajar Zero Waste (BZW) berbasis prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah),
2. Menganalisis hubungan antar variabel kunci seperti literasi lingkungan, timbulan sampah, pencegahan, pemilahan, dan pengolahan, serta
3. Menguji dan membandingkan berbagai skenario kebijakan untuk merumuskan rekomendasi strategis yang paling efektif dalam meminimalkan residu sampah dan meningkatkan keberlanjutan program BZW di Indonesia.

Dengan tujuan ini, penelitian diharapkan memberikan dasar ilmiah bagi penguatan program BZW dan pengembangan kebijakan pengelolaan sampah berbasis komunitas.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan pemodelan sistem dinamis untuk menganalisis dan memahami pengelolaan sampah yang dilakukan oleh peserta Kelas Belajar Zero Waste (BZW) melalui penerapan prinsip 3AH, yaitu Cegah, Pilah, dan Olah. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan kompleks antara berbagai faktor yang mempengaruhi pengelolaan sampah, seperti jumlah peserta, literasi lingkungan, jumlah timbulan sampah, tingkat pencegahan, efisiensi pemilahan, hingga pengolahan sampah yang pada akhirnya menyisakan sampah residu yang lebih sedikit. Berikut rincian metode yang digunakan:

2.1 PENDEKATAN SISTEM DINAMIS

- a. Alat: Causal Loop Diagram (CLD) untuk memetakan hubungan kausal antar variabel dan Stock and Flow Diagram (SFD) untuk menggambarkan aliran sistem.
- b. Tujuan: Memahami hubungan kompleks antar variabel seperti jumlah peserta, literasi lingkungan, timbulan sampah, pencegahan, pemilahan, pengolahan, dan residu sampah.

2.2 PENGUMPULAN DATA

Pengumpulan data dalam penelitian ini dibagi menjadi dua kategori utama: data primer dan data sekunder, yang keduanya digunakan untuk kalibrasi dan validasi model sistem dinamis.

- a. Data primer:

Data primer dikumpulkan melalui survei terhadap 492 alumni Kelas Belajar Zero Waste (BZW). Populasi target adalah seluruh peserta yang telah lulus dari Kelas BZW, mulai dari tahun 2018-2023. Pengumpulan data dilakukan secara daring menggunakan

formulir Google Form yang dibagikan melalui WhatsApp Group alumni dan kanal komunikasi resmi komunitas. Tingkat respons mencapai $\pm 70\%$ dari 704 total alumni aktif dalam jaringan per 2024, sehingga data dianggap cukup representatif untuk menggambarkan perilaku dan praktik pengelolaan sampah peserta BZW.

Instrumen survei terdiri dari empat bagian utama:

1. Profil responden (usia, wilayah domisili, tahun mengikuti kelas).
2. Perilaku pengelolaan sampah sebelum dan sesudah mengikuti BZW (pencegahan, pemilihan, pengolahan).
3. Perhitungan timbulan sampah rumah tangga, yang diukur dengan pendekatan estimasi harian dan dikonversi ke ton per tahun.
4. Tingkat literasi dan sikap lingkungan, menggunakan skala Likert 1–5 yang disusun berdasarkan indikator literasi lingkungan (pengetahuan, kesadaran, dan tindakan).

Representatives data: Meskipun survei tidak mencakup seluruh populasi alumni BZW, jumlah 492 responden dianggap cukup representatif untuk menggambarkan perilaku peserta yang aktif dan konsisten dalam menerapkan prinsip 3AH. Data ini secara spesifik digunakan untuk menentukan parameter kunci model, seperti *initial waste generation rate* dan *effectiveness of prevention/sorting/processing*.

b. Data sekunder:

Data sekunder dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk:

1. Laporan resmi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) mengenai timbulan dan komposisi sampah nasional;
2. Data internal program BZW terkait jumlah peserta dan tingkat kelulusan;
3. Hasil studi terdahulu mengenai efektivitas program edukasi lingkungan dan pemodelan sistem dinamis dalam konteks pengelolaan sampah.

Seluruh data tersebut digunakan sebagai parameter dasar dalam penyusunan model *Stock and Flow Diagram* (SFD).

c. Asumsi data:

Berdasarkan data primer dan sekunder, beberapa parameter kunci model ditetapkan, termasuk tingkat pertumbuhan peserta BZW, tingkat pencegahan sampah, tingkat pengolahan, dan rata-rata produksi sampah per peserta. Data ini digunakan sebagai parameter awal untuk simulasi model.

2.3 PROSES VALIDASI MODEL

- a. Validasi menggunakan metode Absolute Mean Error (AME) untuk membandingkan hasil simulasi dengan data empiris.
- b. Hasil validasi menunjukkan tingkat kesalahan rata-rata 2%, yang dianggap valid (di bawah ambang batas 10 %).

2.4 SIMULASI SKENARIO KEBIJAKAN

Tiga skenario diuji untuk memproyeksikan kondisi hingga 2030:

- a. Business as Usual (BAU): Mengikuti pola saat ini.
- b. Skenario A: Peningkatan literasi lingkungan sebesar 30%.
- c. Skenario B: Peningkatan tingkat pencegahan sampah hingga 70%.
- d. Skenario C: Optimalisasi pengolahan sampah organik dan anorganik.

2.5 ANALISIS HASIL SIMULASI

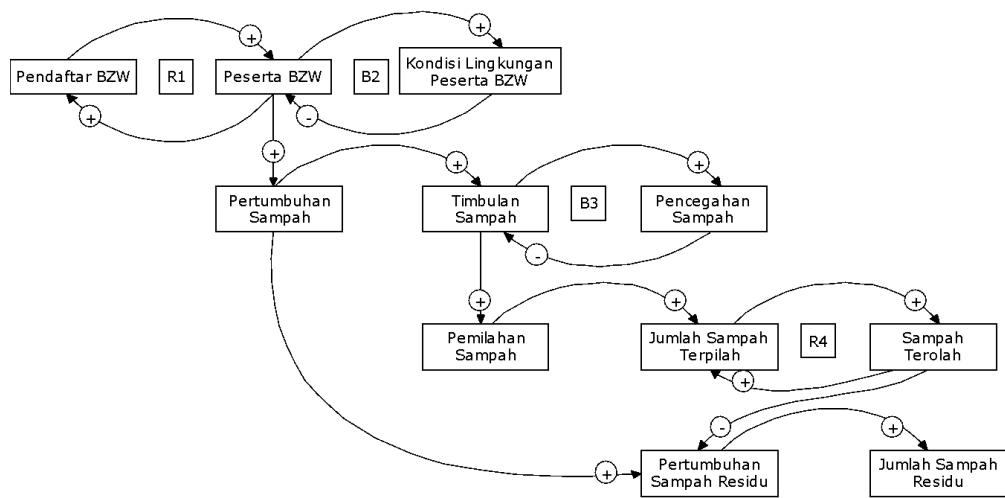
Hasil simulasi diinterpretasikan untuk memahami dampak berbagai intervensi terhadap jumlah peserta, timbulan sampah, sampah terpilah, dan residu sampah.

2.6 PERANGKAT LUNAK

Powersim Studio 10 digunakan untuk membuat dan menjalankan simulasi model. Dengan pendekatan ini, penelitian bertujuan memberikan rekomendasi strategis untuk pengelolaan sampah berbasis komunitas yang lebih efektif dan berkelanjutan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. CAUSAL LOOP DIAGRAM



Gambar 1. Causal Loop Diagram Pemodelan Sistem Dinamik Pengelolaan Sampah Peserta Belajar Zero Waste Melalui Prinsip 3AH (Cegah Pilah Olah)

Gambar di atas merupakan **Causal Loop Diagram (CLD)** yang memodelkan Peserta Kelas Belajar Zero Waste (BZW) dalam pengelolaan sampah dengan prinsip 3AH. CLD ini berfungsi untuk memvisualisasikan hubungan kausal antara berbagai elemen dalam sistem pengelolaan sampah dengan Kelas Belajar Zero Waste sebagai salah satu faktor kunci. Penjelasan dari tiap-tiap elemen serta umpan baliknya adalah sebagai berikut:

Elemen-elemen Utama:

1. **Peserta BZW:** Peserta yang mengikuti kelas Belajar Zero Waste merupakan titik awal dalam model ini. Peningkatan jumlah peserta kelas akan berkontribusi terhadap peningkatan **Pendaftar BZW** dan **Kondisi Lingkungan Peserta BZW**.
2. **Timbulan Sampah:** Jumlah sampah yang dihasilkan oleh masing-masing Peserta Kelas BZW yang dipengaruhi oleh Pertumbuhan Sampah.
3. **Pencegahan Sampah:** Jumlah sampah yang berhasil dicegah oleh Peserta Kelas BZW sehingga dapat mempengaruhi jumlah Timbulan Sampah yang dihasilkan.
4. **Pemilahan Sampah:** Jumlah Timbulan sampah yang berhasil dipilah setelah terlebih dahulu dilakukan pencegahan sampah oleh Peserta Kelas BZW.
5. **Jumlah Sampah Terpilah:** Jumlah sampah yang berhasil dipilah.
6. **Sampah Terolah:** Jumlah sampah yang berhasil diolah dari sampah yang telah dipilah oleh Peserta Kelas BZW.
7. **Pertumbuhan Sampah Residu:** Tingkat pertumbuhan sisa sampah yang dihasilkan oleh peserta Kelas BZW setelah dilakukan prinsip 3AH.
8. **Jumlah Sampah Residu:** Jumlah sisa sampah yang dihasilkan oleh peserta Kelas BZW setelah dilakukan prinsip 3AH.

Loop Umpaman Balik (Feedback Loops):

1. **R1 (Reinforcing Loop):** Dalam sistem ini, jumlah pendaftar Kelas Belajar Zero Waste (BZW) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan peserta secara keseluruhan. Ketika lebih banyak orang mendaftar, jumlah peserta bertambah, yang pada gilirannya meningkatkan literasi lingkungan di antara para peserta. Dengan meningkatnya pemahaman lingkungan, mereka cenderung mempengaruhi orang lain untuk bergabung dalam program ini. Hal ini menciptakan siklus penguatan positif yang mendorong pertumbuhan peserta secara berkelanjutan, sehingga semakin banyak individu yang terlibat dalam pengelolaan sampah berbasis komunitas.
2. **B2 (Balancing Loop):** Loop ini menggambarkan hubungan antara jumlah peserta Kelas Belajar Zero Waste (BZW) dengan kondisi lingkungan peserta BZW. Ketika jumlah

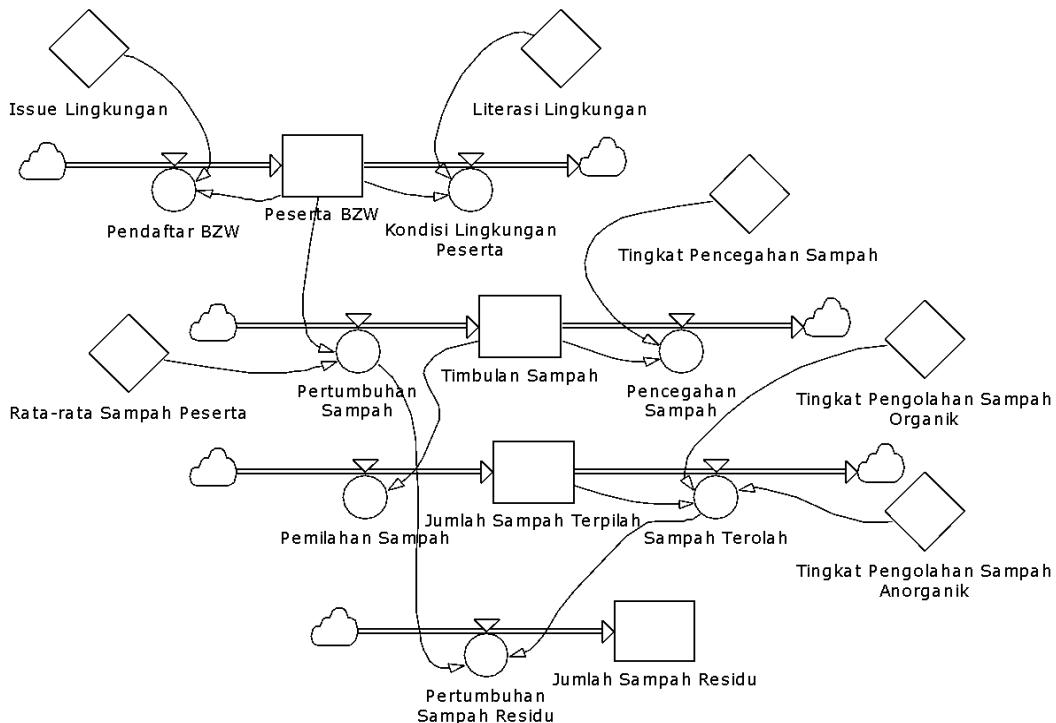
peserta BZW meningkat, kondisi lingkungan mereka cenderung membaik, terutama dalam hal perilaku pro-lingkungan. Namun, gejala *spillover* dapat terjadi: semakin baik kondisi lingkungan para peserta, semakin rendah kecenderungan mereka untuk terus terlibat dalam kelas BZW atau memotivasi orang lain untuk bergabung. Hal ini menciptakan efek keseimbangan (balancing), di mana peningkatan kondisi lingkungan peserta justru dapat mengurangi jumlah peserta baru yang bergabung dalam kelas BZW. Dengan kata lain, meskipun hasilnya positif di satu sisi (peningkatan kondisi lingkungan), efek ini menekan pertumbuhan peserta secara keseluruhan, yang membutuhkan strategi untuk menjaga keberlanjutan program.

3. **B3 (Balancing Loop):** Pencegahan timbulnya sampah menjadi salah satu strategi penting yang diwakili oleh loop ini. Ketika timbulan sampah meningkat, tindakan pencegahan diaktifkan, misalnya melalui kampanye edukasi atau kebijakan pengurangan sampah di sumbernya. Dengan adanya langkah pencegahan ini, jumlah sampah yang dihasilkan dapat diminimalkan sebelum masuk ke tahap pengelolaan. Loop ini berperan sebagai mekanisme pengendalian yang bekerja di hulu untuk mengurangi tekanan pada sistem secara keseluruhan.
4. **R4 (Reinforcing Loop):** Sistem pengelolaan sampah juga diuntungkan oleh loop penguatan yang terjadi melalui pemilahan sampah. Ketika jumlah sampah terpilah meningkat, kapasitas pengelolaan sampah terolah juga meningkat. Hal ini menghasilkan pengelolaan yang lebih efisien, sehingga semakin banyak individu yang terdorong untuk memisahkan sampah mereka sejak awal. Efek ini menciptakan siklus penguatan yang positif, di mana kualitas pengelolaan sampah terus membaik dan jumlah residu sampah yang tidak terolah dapat ditekan.

CLD ini menunjukkan interaksi antara berbagai variabel yang mendukung upaya pengelolaan sampah melalui **Kelas Belajar Zero Waste**. Umpulan balik positif (reinforcing loops) mendorong perbaikan berkelanjutan, di mana semakin banyak peserta yang terlibat dalam kelas akan meningkatkan literasi lingkungan dan kesadaran kolektif. Sebaliknya, umpan balik negatif (balancing loop) menunjukkan bahwa gejala spillover justru dapat terjadi dalam kondisi masyarakat yang pro lingkungan.

Diagram ini memberikan gambaran jelas mengenai pentingnya keterlibatan masyarakat, edukasi literasi lingkungan, serta peran bank sampah dalam pengelolaan sampah secara mandiri.

3.2. STOCK AND FLOW DIAGRAM



Gambar 2. Stock and Flow Diagram Pemodelan Sistem Dinamik Pengelolaan Sampah Peserta Belajar Zero Waste Melalui Prinsip 3AH (Cegah Pilah Olah)

Stock and Flow Diagram (SFD) di atas menggambarkan dinamika pengelolaan sampah yang melibatkan peserta Kelas Belajar Zero Waste (BZW). Pemodelan ini menunjukkan hubungan antara berbagai variabel utama yang berkontribusi pada pengelolaan sampah, dimulai dari partisipasi Peserta hingga pertumbuhan sampah residu.

Variabel Issue Lingkungan dan Literasi Lingkungan berperan sebagai faktor eksternal yang mempengaruhi tingkat partisipasi masyarakat dalam program BZW. Semakin besar perhatian terhadap isu lingkungan, semakin banyak individu yang terdorong untuk mendaftar sebagai Peserta Kelas BZW. Literasi lingkungan juga menjadi kunci dalam meningkatkan pemahaman dan kesadaran peserta terhadap pengelolaan sampah, yang pada akhirnya berdampak pada Kondisi Lingkungan Peserta BZW. Stock ini menggambarkan seberapa baik peserta mampu mengadopsi perilaku pro-lingkungan.

Ketika Peserta BZW bertambah, pengaruh positifnya tercermin pada upaya Pencegahan Sampah. Semakin banyak peserta yang sadar lingkungan, semakin besar kemungkinan mereka mengambil tindakan untuk mengurangi timbulan sampah. Stock Timbulan Sampah menunjukkan jumlah total sampah yang dihasilkan masing-masing Peserta BZW. Aliran masuk ke timbulan ini berasal dari Pertumbuhan Sampah, sementara aliran keluar berasal dari

Pencegahan Sampah. Pertumbuhan sampah yang dihasilkan oleh Peserta BZW akan selalu meningkat mengikuti peningkatan jumlah Peserta BZW sehingga mempengaruhi peningkatan timbulan sampah. Dampak positif dari keikutsertaan Peserta di dalam Kelas BZW adalah meningkatnya pencegahan sampah yang dilakukan seperti membawa tas belanja sendiri saat berbelanja, membawa tumbler minum saat bepergian, atau memilih menggunakan sapu tangan daripada tisu.

Sampah yang tidak dapat dicegah akan memasuki proses Pemilahan Sampah. Pemilahan ini penting untuk memisahkan sampah menjadi bagian-bagian yang dapat diolah, baik organik maupun anorganik. Jumlah Sampah Terpilah kemudian diproses lebih lanjut melalui dua jalur: Pengolahan Sampah Organik dan Pengolahan Sampah Anorganik. Tingkat pengolahan ini dipengaruhi oleh efisiensi sistem dan dukungan fasilitas yang tersedia.

Namun, tidak semua sampah dapat diolah. Sampah yang tersisa akan masuk ke stock Jumlah Sampah Residu. Residual ini menggambarkan tantangan utama dalam pengelolaan sampah, yaitu mengurangi jumlah yang tidak dapat diolah agar tidak mencemari lingkungan.

Secara keseluruhan, diagram ini menunjukkan bahwa keberhasilan pengelolaan sampah bergantung pada partisipasi aktif masyarakat, peningkatan literasi lingkungan, dan optimalisasi proses pemilahan serta pengolahan sampah. Model ini mencerminkan pentingnya integrasi antara edukasi lingkungan dan pendekatan sistematis untuk mewujudkan pengelolaan sampah yang lebih efektif. Simulasi model yang menggambarkan perilaku model dinamis tersebut ditampilkan dalam grafik waktu (*time graph*), dan tabel waktu (*time table*) setelah model dijalankan (*run*) berdasarkan Powersim Studio 10.

Sebelum model dijalankan, asumsi dari unsur-unsur pembentuk variabel dan sub variabel adalah sebagai berikut:

- Issue Lingkungan: 30% per tahun;
- Literasi Lingkungan: 15% per tahun;
- Jumlah Peserta Kelas BZW awal (2018): 79 orang;
- Rata-rata sampah peserta: 0,1825 ton/orang;
- Timbulan sampah awal (2018): 14 ton;
- Tingkat pencegahan sampah: 56,5%/tahun;
- Jumlah sampah terpilah awal (2018): 11 ton;
- Tingkat pengolahan sampah organic: 38,15%/tahun;
- Tingkat pengolahan sampah anorganik: 37%/tahun;
- Jumlah sampah residu awal (2018): 2 ton.

Asumsi diatas diperoleh berdasarkan data primer Komunitas Alumni Kelas Belajar Zero Waste dan Kuesioner yang telah dibagikan kepada 492 Alumni Kelas Belajar Zero Waste.

3.3. HASIL SIMULASI MODEL

Tabel 1. Hasil Simulasi Pemodelan Peserta Kelas Belajar Zero Waste dalam Pengurangan Sampah

| tahun | Peserta BZW (orang) | Timbulan Sampah (ton) | Jumlah Sampah Terpilah (ton) | Jumlah Sampah Residu (ton) |
|-------|---------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 2.018 | 79,00 | 14,00 | 11,00 | 2,00 |
| 2.019 | 90,85 | 20,51 | 16,73 | 8,15 |
| 2.020 | 104,48 | 25,50 | 24,67 | 12,16 |
| 2.021 | 120,15 | 30,16 | 31,63 | 12,69 |
| 2.022 | 138,17 | 35,05 | 38,02 | 10,84 |
| 2.023 | 158,90 | 40,46 | 44,49 | 7,49 |
| 2.024 | 182,73 | 46,60 | 51,52 | 3,05 |

Non-commercial use only

Simulasi model pengelolaan sampah melalui program *Belajar Zero Waste* (BZW) menunjukkan tren yang konsisten dalam beberapa aspek utama. Berdasarkan data simulasi dan struktur *Stock and Flow Diagram* (SFD), hasilnya dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Peserta BZW

Jumlah peserta program BZW mengalami peningkatan signifikan dari 79 orang pada tahun 2018 menjadi 182,73 orang pada tahun 2024. Pertumbuhan ini menunjukkan keberhasilan program dalam menarik minat masyarakat untuk bergabung. Faktor-faktor seperti peningkatan literasi lingkungan dan kesadaran terhadap isu lingkungan menjadi pendorong utama peningkatan jumlah peserta.

2. Timbulan Sampah

Seiring dengan bertambahnya jumlah peserta, timbulan sampah yang tercatat juga menunjukkan peningkatan dari 14 ton pada tahun 2018 menjadi 46,6 ton pada tahun 2024. Hal ini mencerminkan dua hal: pertama, adanya peningkatan aktivitas peserta yang berkontribusi terhadap timbulan sampah; kedua, adanya kesadaran peserta untuk mencatat dan mendokumentasikan sampah yang mereka hasilkan. Meskipun timbulan sampah meningkat, hal ini dapat dimitigasi melalui sistem pengelolaan dengan prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah) yang efektif.

3. Jumlah Sampah Terpilah

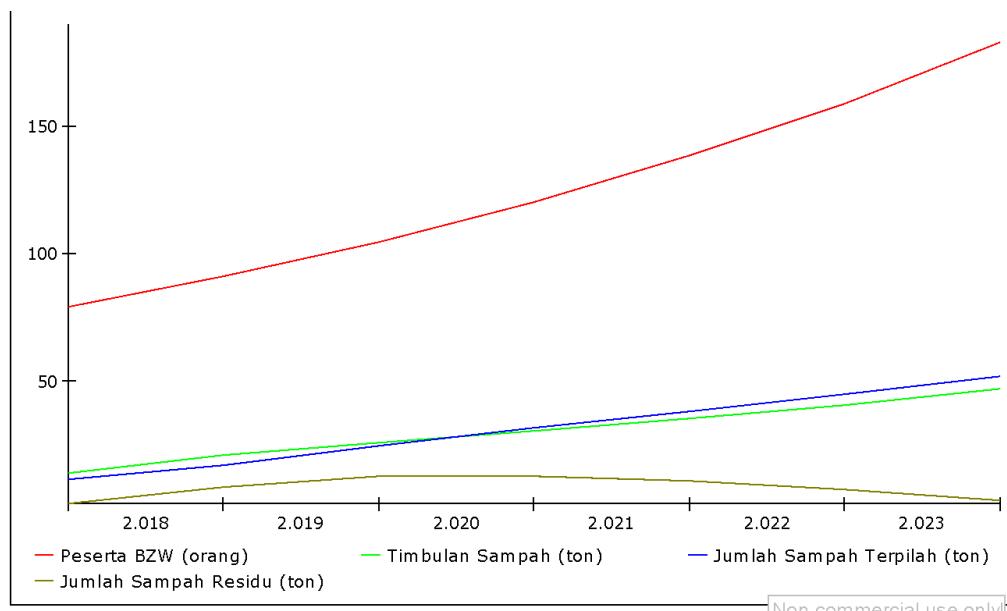
Jumlah sampah terpilah menunjukkan peningkatan yang signifikan dari 11 ton pada tahun 2018 menjadi 51,52 ton pada tahun 2024. Tren ini mencerminkan keberhasilan program dalam mendorong peserta untuk memilah sampah berdasarkan jenisnya, yang kemudian dapat diolah lebih lanjut. Peningkatan ini juga menunjukkan bahwa literasi

dan edukasi tentang pentingnya pemilahan sampah telah diterapkan secara konsisten dalam program.

4. Jumlah Sampah Residu

Jumlah sampah residu justru menunjukkan penurunan, dari 2 ton pada tahun 2018 menjadi hanya 3,05 ton pada tahun 2024. Meskipun sempat mengalami sedikit peningkatan di pertengahan periode (2019 hingga 2021), jumlah residu berhasil ditekan seiring dengan meningkatnya pengolahan sampah organik dan anorganik oleh peserta. Penurunan residu ini menjadi indikator keberhasilan pengelolaan sampah yang efisien dan terarah.

Secara keseluruhan, simulasi model pengelolaan sampah dengan prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah) yang dilakukan oleh Peserta BZW dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Simulasi Pengelolaan Sampah dengan Prinsip 3AH

3.4. ANALISIS HASIL SIMULASI

Model *Stock and Flow Diagram* (SFD) menunjukkan hubungan dinamis antara berbagai variabel dalam sistem pengelolaan sampah berbasis edukasi:

- **Peserta BZW sebagai variabel kunci:** Peningkatan jumlah peserta BZW secara langsung meningkatkan literasi lingkungan, yang kemudian mempengaruhi kesadaran dan perilaku peserta dalam pengelolaan sampah.
- **Timbulan sampah dan pemilahan sampah:** Pertumbuhan timbulan sampah diiringi dengan peningkatan kemampuan peserta untuk memilah sampah. Hal ini menunjukkan adanya perubahan perilaku ke arah yang lebih positif.

- **Pengurangan residu:** Sistem pengolahan sampah yang efektif (baik organik maupun anorganik) membantu menekan jumlah residu yang tidak dapat diolah lebih lanjut. Ini menjadi bukti bahwa edukasi dalam program BZW mampu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa dari hasil simulasi model menunjukkan keberhasilan program BZW dalam menciptakan sistem pengelolaan sampah dengan Prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah) yang berkelanjutan. Dengan peningkatan literasi lingkungan dan perubahan perilaku peserta, program ini mampu mengurangi jumlah residu sampah sekaligus meningkatkan pengolahan sampah secara signifikan.

3.5. VALIDASI MODEL DINAMIS

Validasi model dinamis merupakan langkah untuk memastikan bahwa model tersebut dapat dianggap layak dalam menjalankan logika faktor dinamis sehingga mampu menghasilkan output data yang diharapkan. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi dapat diterima dan mencerminkan kondisi nyata di lapangan. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam validasi adalah metode AME (*Absolute Mean Error*), yang dilakukan dengan membandingkan rata-rata hasil simulasi dengan rata-rata data empiris. Metode ini bertujuan untuk mengukur tingkat kesalahan atau deviasi yang terjadi. Model dianggap valid apabila tingkat kesalahan yang dihasilkan berada di bawah 5%. Pada validasi ini, variabel yang digunakan adalah jumlah Peserta BZW selama periode 2018-2024.

Tabel 2. Perbandingan Nilai Rata-rata Data Referensi dan Data Simulasi

| Tahun | Jumlah Peserta BZW | |
|-----------|--------------------|---------------|
| | Data Referensi | Data Simulasi |
| 2018 | 79 | 79,00 |
| 2019 | 71 | 90,85 |
| 2020 | 84 | 104,48 |
| 2021 | 117 | 120,15 |
| 2022 | 150 | 138,17 |
| 2023 | 203 | 158,90 |
| 2024 | 189 | 182,73 |
| Rata-rata | 127,57 | 124,89 |

Berdasarkan data pada Tabel 2, maka dilakukan penghitungan Nilai AME yaitu:

$$E1 = \frac{|\underline{A}-\underline{S}|}{\underline{A}} \times 100\% \quad (1)$$

$$E1 = \frac{|127,57 - 124,89|}{127,57} \times 100\%$$

$$E1 = 2\%$$

Nilai E1=2% menunjukkan bahwa model yang digunakan **valid** karena berarti rata-rata nilai kesalahan sebesar 2%, yang berada di bawah ambang batas 10 %.

3.6. SKENARIO KEBIJAKAN

Setelah model simulasi yang telah dibuat dinyatakan valid, maka langkah selanjutnya ialah melakukan penyusunan model pengelolaan sampah terpadu yang sesuai dengan skenario kebijakan yang nantinya akan diputuskan menjadi suatu bahan pertimbangan bagi pengambil keputusan di masa yang akan datang.

Skenario-skenario yang disimulasikan yaitu, pertama Skenario *Business as Usual* (BAU), yang bertujuan untuk melihat perubahan kondisi di masa depan apabila dibiarkan mengikuti kecenderungan pada kondisi di masa sekarang. Dalam hal ini scenario hanya dibuat untuk tahun 2025 hingga 2030, mengingat data eksisting yang dimiliki hanyalah 7 tahun (2018-2024). Kedua, Skenario A yang disusun dengan fokus untuk melihat pengaruh dari peningkatan literasi lingkungan sebesar 30% atau 2 kali lebih besar dari persentase sebelumnya. Pada skenario A ini intervensi yang dilakukan berasal dari faktor eksternal peserta BZW yang nantinya akan berdampak pada jumlah peserta BZW. Ketiga, Skenario B, yang disusun dengan fokus untuk melihat seberapa signifikan pencegahan sampah yang dilakukan oleh Peserta BZW apabila ditingkatkan dari 56,5% menjadi 70%. Keempat, Skenario C yang bertujuan untuk melihat seberapa signifikan pengelolaan sampah baik organic ataupun anorganik terhadap jumlah residi yang dihasilkan. Berdasarkan skenario-skenario yang telah disusun, ditentukan parameter-parameter dan nilai pada setiap skenario seperti yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter dan Asumsi dalam Skenario

| Parameter | Satuan | Dasar (2018) | Target 2030 | | |
|--------------------------|---------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| | | | Skenario A | Skenario B | Skenario C |
| Issue Lingkungan | %/tahun | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Literasi Lingkungan | %/tahun | 15 | 30 | 15 | 15 |
| Peserta BZW | orang | 79 | 79 | 79 | 79 |
| Rata-rata sampah peserta | Ton/orang | 0,1825 | 0,1825 | 0,1825 | 0,1825 |

| | | | | | |
|-------------------------------------|---------|-------|-------|-------|------|
| Timbulan sampah | Ton | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Tingkat Pencegahan sampah | %/tahun | 56,5 | 56,5 | 70 | 56,5 |
| Jumlah Sampah Terpilah | Ton | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Tingkat Pengolahan Sampah Organik | %/tahun | 38,15 | 38,15 | 38,15 | 45 |
| Tingkat Pengolahan Sampah Anorganik | %/tahun | 37 | 37 | 37 | 40 |
| Jumlah Sampah Residu | ton | 2 | 2 | 2 | 2 |

Skenario BAU

Tabel 4. Hasil Simulasi Model Skenario BAU

| tahun | Peserta BZW (orang) | Timbulan Sampah (ton) | Jumlah Sampah Terpilah (ton) | Jumlah Sampah Residu (ton) |
|-------|---------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 2.018 | 79,00 | 14,00 | 11,00 | 2,00 |
| 2.019 | 90,85 | 20,51 | 16,73 | 8,15 |
| 2.020 | 104,48 | 25,50 | 24,67 | 12,16 |
| 2.021 | 120,15 | 30,16 | 31,63 | 12,69 |
| 2.022 | 138,17 | 35,05 | 38,02 | 10,84 |
| 2.023 | 158,90 | 40,46 | 44,49 | 7,49 |
| 2.024 | 182,73 | 46,60 | 51,52 | 3,05 |
| 2.025 | 210,14 | 53,62 | 59,40 | -2,32 |
| 2.026 | 241,66 | 61,68 | 68,38 | -8,61 |
| 2.027 | 277,91 | 70,93 | 78,67 | -15,89 |
| 2.028 | 319,60 | 81,57 | 90,48 | -24,29 |
| 2.029 | 367,54 | 93,81 | 104,06 | -33,96 |
| 2.030 | 422,67 | 107,88 | 119,67 | -45,09 |

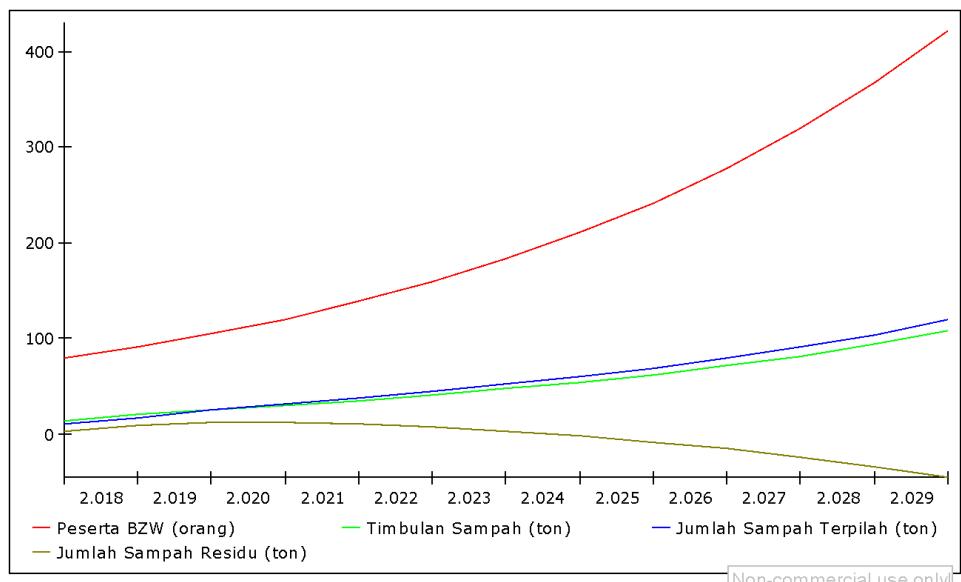
Non-commercial use only

Berdasarkan data tabel 4 dan gambar 4 hasil simulasi skenario *Business as Usual* (BAU), dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Jumlah Peserta BZW:** Peserta Kelas Belajar Zero Waste (BZW) terus meningkat secara konsisten dari tahun 2018 hingga 2030. Pada tahun 2018 terdapat 79 peserta, dan pada akhir prediksi tahun 2030 jumlah peserta diproyeksikan mencapai 422,67 orang. Pertumbuhan ini menunjukkan adanya peningkatan kesadaran masyarakat terhadap pengelolaan sampah melalui pendidikan lingkungan.
- Timbulan Sampah:** Timbulan sampah terus mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah peserta BZW dan aktivitas masyarakat. Pada tahun 2018, jumlah timbulan sampah sebesar 14-ton dan terus meningkat hingga mencapai 107,88 ton pada tahun 2030. Peningkatan ini disebabkan oleh tingginya aktivitas konsumsi dan produksi limbah dalam komunitas yang berkembang.
- Jumlah Sampah Terpilah:** Jumlah sampah yang berhasil dipilah meningkat secara signifikan dari 11 ton pada tahun 2018 menjadi 119,67 ton pada tahun 2030. Peningkatan ini menunjukkan efektivitas program BZW dalam meningkatkan kemampuan masyarakat untuk memilah sampah sesuai jenisnya, yang merupakan

langkah penting dalam mendukung daur ulang dan pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

4. **Jumlah Sampah Residu:** Jumlah sampah residu pada awalnya meningkat hingga tahun 2024, mencapai puncaknya di 12,69 ton. Namun, setelah tahun tersebut, jumlah residu mulai menurun secara signifikan hingga mencapai nilai negatif pada tahun 2030 (-45,09 ton). Penurunan ini menunjukkan bahwa program BZW tidak hanya berhasil meningkatkan pemilahan sampah tetapi juga secara bertahap mengurangi produksi sampah yang tidak terkelola.



Gambar 4. Hasil Simulasi Model Skenario BAU

Analisis Hasil Simulasi

- **Efektivitas Program BZW:** Berdasarkan hasil simulasi, program BZW terbukti efektif dalam meningkatkan partisipasi masyarakat, mengurangi sampah residu, dan meningkatkan pengelolaan sampah terpilah. Program ini berkontribusi dalam menciptakan pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan.
- **Proyeksi Jangka Panjang:** Dalam skenario BAU ini, jika program terus berjalan tanpa intervensi tambahan, terdapat kemungkinan pengurangan sampah residu hingga pada tingkat yang sangat rendah atau bahkan negatif pada tahun 2030. Hal ini dapat dianggap sebagai keberhasilan pengelolaan sampah berbasis komunitas.
- **Kritik dan Tantangan:** Peningkatan timbulan sampah tetap menjadi tantangan meskipun jumlah sampah residu berkurang. Hal ini menunjukkan perlunya langkah

tambahan seperti pengurangan timbulan sampah di sumber (reduce) dan peningkatan strategi daur ulang.

Kesimpulannya, simulasi skenario BAU memperlihatkan bahwa partisipasi masyarakat dalam program BZW memberikan dampak positif yang signifikan terhadap pengelolaan sampah. Namun, tantangan terkait pengurangan timbulan sampah harus menjadi perhatian utama untuk keberlanjutan di masa depan.

Skenario A

Tabel 5. Hasil Simulasi Model Skenario A

| tahun | Peserta BZW (orang) | Timbulan Sampah (ton) | Jumlah Sampah Terpilah (ton) | Jumlah Sampah Residu (ton) |
|-------|---------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 2.018 | 79,00 | 14,00 | 11,00 | 2,00 |
| 2.019 | 79,00 | 20,51 | 16,73 | 8,15 |
| 2.020 | 79,00 | 23,34 | 24,67 | 9,99 |
| 2.021 | 79,00 | 24,57 | 29,47 | 5,87 |
| 2.022 | 79,00 | 25,11 | 31,89 | -1,85 |
| 2.023 | 79,00 | 25,34 | 33,03 | -11,40 |
| 2.024 | 79,00 | 25,44 | 33,55 | -21,81 |
| 2.025 | 79,00 | 25,48 | 33,78 | -32,60 |
| 2.026 | 79,00 | 25,50 | 33,88 | -43,57 |
| 2.027 | 79,00 | 25,51 | 33,92 | -54,61 |
| 2.028 | 79,00 | 25,51 | 33,94 | -65,68 |
| 2.029 | 79,00 | 25,52 | 33,95 | -76,77 |
| 2.030 | 79,00 | 25,52 | 33,95 | -87,87 |

Skenario A dilakukan dengan meningkatkan literasi lingkungan dari 15% menjadi 30%, setara dengan tingkat isu lingkungan sebesar 30%. Berikut adalah penjelasan dari tabel hasil simulasi Skenario A:

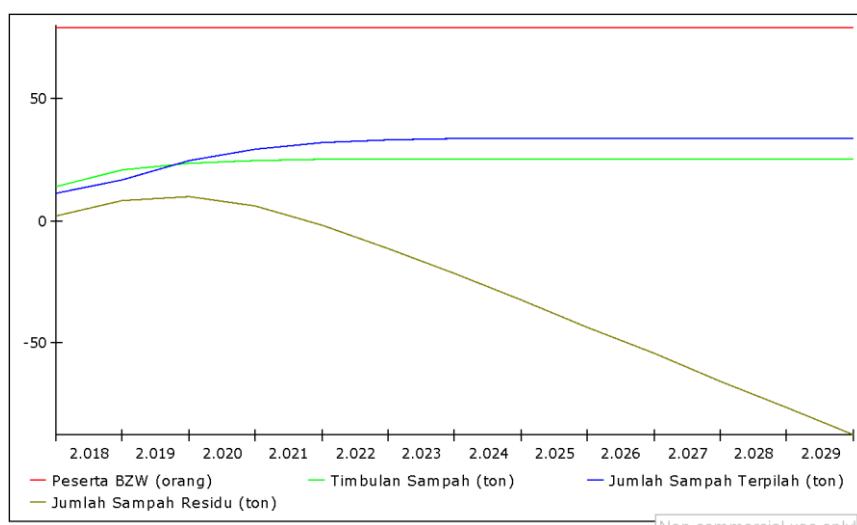
- Jumlah Peserta BZW:** Tidak ada perubahan jumlah peserta BZW dalam skenario A dibandingkan dengan skenario BAU. Jumlah peserta tetap konstan sebesar 79 orang dari tahun 2018 hingga 2030. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan literasi lingkungan tidak secara langsung mempengaruhi jumlah peserta program.
- Timbulan Sampah:** Timbulan sampah tetap menunjukkan tren peningkatan, meskipun lebih stabil dibandingkan skenario BAU. Pada tahun 2018, timbulan sampah tercatat 14 ton, meningkat menjadi 25,52 ton pada tahun 2030. Dibandingkan dengan skenario BAU, tidak ada perubahan signifikan pada total timbulan sampah karena faktor literasi lingkungan berfokus pada pengelolaan dan pemilahan, bukan pengurangan timbulan di sumber.
- Jumlah Sampah Terpilah:** Jumlah sampah yang terpilah menunjukkan peningkatan signifikan dalam skenario A. Pada tahun 2018, jumlah sampah terpilah adalah 11 ton, meningkat menjadi 33,95 ton pada tahun 2030. Dibandingkan dengan skenario BAU,

nilai sampah terpilah dalam skenario A lebih tinggi, mencerminkan efektivitas peningkatan literasi lingkungan dalam mendorong perilaku pemilahan sampah.

4. **Jumlah Sampah Residu:** Jumlah sampah residu dalam skenario A berkurang secara signifikan. Pada tahun 2018, residu tercatat sebesar 2 ton. Residu mulai menunjukkan nilai negatif pada tahun 2022 (-1,85 ton) dan terus menurun hingga mencapai -87,87 ton pada tahun 2030. Dibandingkan dengan skenario BAU, penurunan residu lebih tajam dalam skenario A, menunjukkan dampak positif dari literasi lingkungan yang lebih tinggi.

Perbandingan dengan Skenario BAU

- **Peserta BZW:** Tidak ada perubahan dalam jumlah peserta antara kedua skenario.
- **Timbulan Sampah:** Jumlah timbulan sampah dalam skenario A tidak mengalami perubahan signifikan dibandingkan dengan skenario BAU, tetapi pertumbuhannya lebih stabil.
- **Sampah Terpilah:** Skenario A menghasilkan lebih banyak sampah terpilah dibandingkan skenario BAU, menunjukkan bahwa peningkatan literasi lingkungan mampu meningkatkan efektivitas pemilahan sampah.
- **Sampah Residu:** Skenario A memiliki jumlah residu yang jauh lebih rendah dibandingkan skenario BAU, bahkan lebih cepat mencapai nilai negatif. Ini menegaskan bahwa peningkatan literasi lingkungan dapat secara signifikan mengurangi jumlah sampah yang tidak terkelola.



Gambar 5. Hasil Simulasi Model Skenario A

Peningkatan literasi lingkungan dalam skenario A menghasilkan dampak yang signifikan pada pengelolaan sampah, terutama dalam pemilahan dan pengurangan residu. Dibandingkan dengan

skenario BAU, skenario A menunjukkan pengelolaan sampah yang lebih efektif meskipun jumlah peserta dan timbulan sampah tidak berubah secara signifikan. Hal ini membuktikan bahwa literasi lingkungan memiliki peran penting dalam memperbaiki sistem pengelolaan limbah.

Skenario B

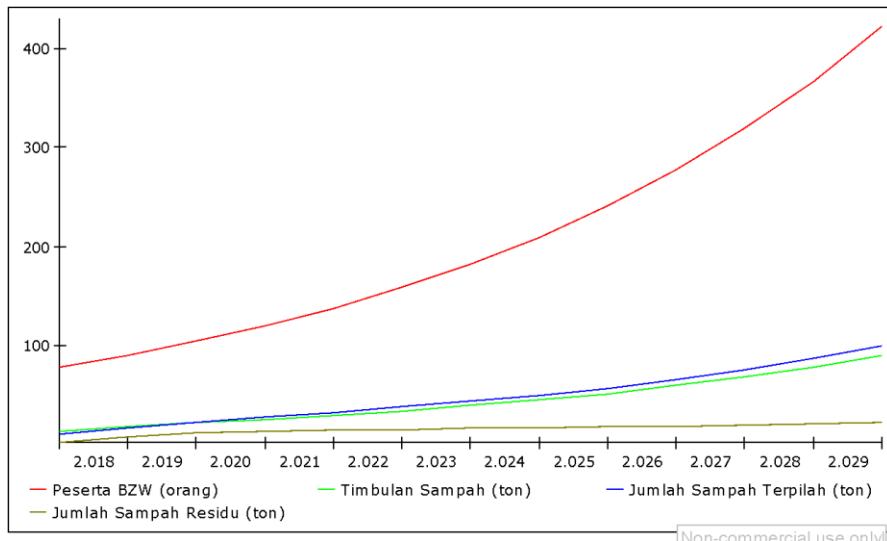
Tabel 6. Hasil Simulasi Model Skenario B

| tahun | Peserta BZW (orang) | Timbulan Sampah (ton) | Jumlah Sampah Terpilah (ton) | Jumlah Sampah Residu (ton) |
|-------|---------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 2.018 | 79,00 | 14,00 | 11,00 | 2,00 |
| 2.019 | 90,85 | 18,62 | 16,73 | 8,15 |
| 2.020 | 104,48 | 22,17 | 22,78 | 12,16 |
| 2.021 | 120,15 | 25,72 | 27,83 | 14,11 |
| 2.022 | 138,17 | 29,64 | 32,63 | 15,12 |
| 2.023 | 158,90 | 34,11 | 37,75 | 15,82 |
| 2.024 | 182,73 | 39,23 | 43,49 | 16,45 |
| 2.025 | 210,14 | 45,12 | 50,04 | 17,11 |
| 2.026 | 241,66 | 51,89 | 57,55 | 17,86 |
| 2.027 | 277,91 | 59,67 | 66,19 | 18,71 |
| 2.028 | 319,60 | 68,62 | 76,12 | 19,69 |
| 2.029 | 367,54 | 78,91 | 87,53 | 20,81 |
| 2.030 | 422,67 | 90,75 | 100,67 | 22,11 |

Pada Skenario B ini intervensi yang dilakukan adalah dengan meningkatkan pencegahan sampah yang dilakukan oleh Peserta BZW dari 56,5% menjadi 70%. Sesuai dengan prinsip 3AH bahwa Upaya Cegah harus dilakukan di awal dan semaksimal mungkin. Berikut adalah penjelasan dari tabel hasil simulasi Skenario B:

- Jumlah Peserta BZW:** Tidak ada perubahan jumlah peserta BZW dalam skenario B dibandingkan dengan skenario BAU. Karena memang tidak ada intervensi.
- Timbulan Sampah:** Timbulan sampah tetap menunjukkan tren peningkatan, meskipun masih tetap lebih rendah dibandingkan skenario BAU. Pada tahun 2018, timbulan sampah tercatat 14 ton, meningkat menjadi 90,75 ton pada tahun 2030. Dibandingkan dengan skenario BAU, tidak ada perubahan signifikan pada total timbulan sampah sekalipun yang diintervensi adalah pencegahan timbulan di sumber.
- Jumlah Sampah Terpilah:** Jumlah sampah yang terpilah juga tidak menunjukkan peningkatan signifikan dalam skenario B. Pada tahun 2018, jumlah sampah terpilah adalah 11 ton, meningkat menjadi 100,67 ton pada tahun 2030. Peningkatannya hampir sama dengan skenario BAU yang meningkat menjadi 119,67 ton pada tahun 2030. Dalam hal ini juga tidak ada perubahan signifikan pada jumlah sampah terpilah.
- Jumlah Sampah Residu:** Jumlah sampah residu dalam skenario B justru mengalami peningkatan secara signifikan. Pada tahun 2018, residu tercatat sebesar 2 ton. Residu

terus mengalami peningkatan hingga mencapai 22,11 ton pada tahun 2030. Dibandingkan dengan skenario BAU, peningkatan residu lebih tajam dalam skenario B.



Gambar 6. Hasil Simulasi Model Skenario B

Peningkatan pencegahan sampah dalam skenario B menghasilkan dampak yang signifikan justru pada peningkatan residu. Dibandingkan dengan skenario BAU, skenario B menunjukkan pengelolaan sampah yang tidak efektif meskipun jumlah peserta dan timbulan sampah tidak berubah secara signifikan.

Skenario C

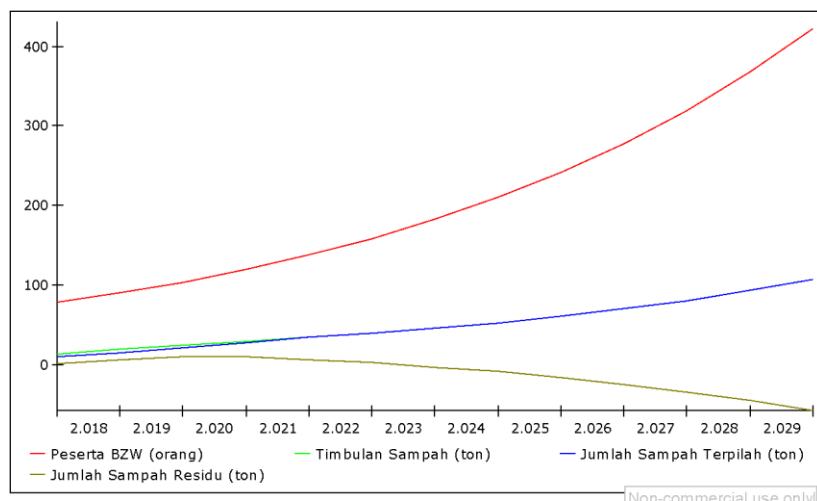
Tabel 7. Hasil Simulasi Model Skenario C

| tahun | Peserta BZW (orang) | Timbulan Sampah (ton) | Jumlah Sampah Terpilah (ton) | Jumlah Sampah Residu (ton) |
|-------|---------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 2.018 | 79,00 | 14,00 | 11,00 | 2,00 |
| 2.019 | 90,85 | 20,51 | 15,65 | 7,07 |
| 2.020 | 104,48 | 25,50 | 22,86 | 10,35 |
| 2.021 | 120,15 | 30,16 | 28,93 | 9,99 |
| 2.022 | 138,17 | 35,05 | 34,50 | 7,32 |
| 2.023 | 158,90 | 40,46 | 40,22 | 3,21 |
| 2.024 | 182,73 | 46,60 | 46,49 | -1,97 |
| 2.025 | 210,14 | 53,62 | 53,57 | -8,15 |
| 2.026 | 241,66 | 61,68 | 61,66 | -15,33 |
| 2.027 | 277,91 | 70,93 | 70,92 | -23,64 |
| 2.028 | 319,60 | 81,57 | 81,57 | -33,20 |
| 2.029 | 367,54 | 93,81 | 93,81 | -44,21 |
| 2.030 | 422,67 | 107,88 | 107,88 | -56,87 |

Skenario C dilakukan dengan peningkatan pengolahan sampah organik dari 38,15% menjadi 45% dan pengolahan sampah anorganik dari 37% menjadi 40%. Berikut adalah analisis berdasarkan tabel hasil simulasi:

1. **Jumlah Peserta BZW:** Dalam skenario C, jumlah peserta BZW sama seperti dalam skenario BAU, yang menunjukkan bahwa perubahan tingkat pengolahan sampah tidak memengaruhi jumlah peserta.

2. **Timbulan Sampah:** Timbulan sampah meningkat seiring waktu dalam skenario C, dimulai dari 14 ton pada tahun 2018 dan mencapai 107,88 ton pada tahun 2030. Pola ini hampir identik dengan skenario BAU, menunjukkan bahwa timbulan sampah lebih dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah peserta, bukan oleh tingkat pengolahan sampah.
3. **Jumlah Sampah Terpilah:** Dalam skenario C, jumlah sampah terpilah mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan skenario BAU. Pada tahun 2018, jumlah sampah terpilah tercatat 11 ton, dan pada tahun 2030 mencapai 107,88 ton. Peningkatan kapasitas pengolahan sampah organik dan anorganik menghasilkan proporsi sampah yang lebih besar dapat dikelola secara terpilah. Di sisi lain, pada Skenario C sejak tahun 2023, jumlah timbulan sampah dan jumlah sampah terpilah relative sama. Bahkan pada tahun 2028 hingga 2030 jumlahnya sama persis. Hal ini membuktikan bahwa pemilahan sampah yang dilakukan oleh peserta BZW dalam pengelolaan sampah dengan Prinsip 3AH mencapai 100%. Nilai ini sejalan dengan upaya peningkatan pengolahan sampah organic dan anorganik.
4. **Jumlah Sampah Residu:** Sampah residu menunjukkan penurunan signifikan dalam skenario C. Pada tahun 2018, residu hanya sebesar 2 ton, kemudian mulai negatif pada tahun 2024 (-1,97 ton) dan terus menurun hingga -56,87 ton pada tahun 2030. Dibandingkan dengan skenario BAU, skenario C menunjukkan pengurangan residu yang lebih cepat karena perbaikan pengolahan sampah organik dan anorganik.



Gambar 7. Hasil Simulasi Model Skenario C

Nilai residu negatif dalam model (misalnya -56,87-ton pada tahun 2030) bukan berarti secara fisik sampah menjadi negatif, tetapi menunjukkan bahwa kapasitas pengolahan sampah dalam sistem melebihi jumlah sampah residu yang dihasilkan setelah proses pencegahan dan

pemilihan. Dengan kata lain, model membaca kelebihan kapasitas pengolahan sebagai “defisit residu”.

Namun demikian, hasil ini tidak sepenuhnya dapat dipahami sebagai kondisi realistik di lapangan. Nilai negatif menandakan bahwa pada tingkat intervensi tertentu, kapasitas pengolahan organik dan anorganik sangat optimal sehingga seluruh sampah yang dipilah diasumsikan dapat diolah, dan sistem bahkan memiliki kapasitas lebih.

Secara realistik, ini berarti bahwa:

1. Zero Waste Tercapai: Residu sampah yang harus dibuang ke TPA telah mencapai nol.
2. Potensi Pengolahan Eksternal: Kapasitas pengolahan yang dibangun (misalnya, fasilitas komunal atau bank sampah yang didukung oleh alumni BZW) memiliki kelebihan kapasitas yang dapat digunakan untuk mengolah sampah dari sumber eksternal (non-peserta BZW) atau untuk menampung sampah yang sebelumnya terakumulasi.
3. Konversi ke Produk Bernilai: Residu yang seharusnya menjadi beban telah dikonversi sepenuhnya menjadi produk bernilai (kompos, bahan daur ulang) yang keluar dari sistem sebagai output positif, bukan sebagai input negatif ke TPA.

Oleh karena itu, nilai -56,87 ton harus diinterpretasikan sebagai kelebihan kapasitas pengolahan yang setara dengan 56,87 ton, yang menegaskan keberhasilan program BZW dalam mencapai target zero waste dan bahkan berpotensi menjadi pusat pengolahan sampah bagi komunitas yang lebih luas.

Selain itu, jumlah sampah terpilah mencapai 100% dari timbulan sampah yang dihasilkan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan pemodelan sistem dinamis efektif dalam mendukung pengambilan keputusan strategis untuk pengelolaan sampah berbasis komunitas, serta memberikan rekomendasi untuk memperkuat literasi lingkungan dan efisiensi pengolahan sampah guna mencapai keberlanjutan.

4. KESIMPULAN

Melalui validasi model, pemodelan sistem dinamik terbukti dapat diaplikasikan untuk menganalisis berbagai macam faktor yang terkait dengan pengelolaan sampah yang dilakukan oleh Peserta BZW dengan Prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah). Terdapat 4 (empat) skenario pengelolaan sampah yang disimulasikan untuk dapat menentukan skema pengelolaan sampah yang terbaik. Kriteria-kriteria yang digunakan dalam memilih skenario terbaik adalah skenario yang menghasilkan nilai terendah pada jumlah timbulan sampah dan jumlah sampah residu.

Sedangkan pada jumlah sampah terpilah dan jumlah peserta BZW diharapkan peningkatan yang akan berdampak pada peningkatan literasi lingkungan di masyarakat.

Dari hasil simulasi, terlihat bahwa timbulan sampah yang dihasilkan oleh Peserta BZW akan terus meningkat setiap tahunnya, dan pada tahun 2030 diperkirakan sebesar 107,88 ton/tahun. Nilai ini terdapat pada Skenario BAU dan Skenario C. Untuk jumlah sampah terpilah tertinggi terdapat pada Skenario BAU sebesar 119,67 disusul scenario C sebesar 107,88 kemudian scenario B 100,67 dan terkecil adalah jumlah sampah terpilah pada scenario A yaitu 33,95. Sedangkan sampah residu paling kecil dihasilkan dari Skenario A sebesar -87,87, kemudian Skenario C dengan jumlah -56,87 dan Skenario BAU -45,09. Untuk Skenario B justru menghasilkan sampah residu paling banyak yaitu 22 ton/tahun.

Berdasarkan hasil simulasi sistem dinamis, dari keempat skenario yang telah disimulasikan maka skenario C dengan intervensi pada peningkatan pengolahan sampah organik dan anorganik adalah skenario yang paling optimal. Skenario C ini dipilih dengan mempertimbangkan jumlah sampah terpilah yang sama dengan jumlah timbulan sampah yang dihasilkan setelah dilakukan upaya pencegahan. Hal ini menandakan bahwa tingkat literasi lingkungan Peserta BZW meningkat sehingga upaya pemilahan berjalan paling optimal. Dimana jumlah sampah residu yang dihasilkan juga mengalami penurunan yang paling signifikan berbanding lurus dengan peningkatan pengolahan sampah baik organik dan anorganik. Ke depannya diperlukan lebih banyak pengujian skenario agar memperoleh skenario yang lebih efektif dan efisien.

Dengan prediksi ini diharapkan dapat membantu Pengurus Kelas Belajar Zero Waste dalam memproyeksikan rencana pengelolaan sampah dengan Prinsip 3AH (Cegah, Pilah, Olah) dapat berkelanjutan dan optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajzen, I. (1991). The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179-211.
- Al Biruni, Visya. (2021). Pengalaman & Pembelajaran Mengikuti Kelas Belajar Zero Waste. <http://www.evisyahida.com/2021/10/kelas-belajar-zero-waste.html>
- ALumnia. (2024, Juli 26). D.K. Wardhani: Membentuk Perilaku Kolektif Minim Sampah. Majalah Alumni IAITB Jakarta. <https://alumnia.iaitbjakarta.id/2024/07/26/d-k-wardhani-membentuk-perilaku-kolektif-minim-sampah/>

- Chawla, L., & Cushing, D. F. (2007). Education for strategic environmental behavior. *Environmental education research*, 13(4), 437-452.
- Ding, Z., Yi, G., Tam, V. W., & Huang, T. (2016). A system dynamics-based environmental performance simulation of construction waste reduction management in China. *Waste management*, 51, 130-141.
- Febiarthy, Anggy. (2024). Analisis Perilaku Pro Lingkungan Pada Komunitas Virtual Belajar Zero Waste. Tesis. Universitas Indonesia.
- KLHK. (2021). Laporan Kinerja Pengelolaan Sampah Nasional. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.
- Manasakunkit, C., & Chinda, T. (2017). Development of a municipal solid waste dynamic model in Bangkok, Thailand. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 39(5).
- Maulizar, Tata. (2024). Komunitas Nasional BZW Ajak Masyarakat Kurangi Sampah. Rri.co.id <https://www.rri.co.id/hobi/569084/komunitas-nasional-bzw-ajak-masyarakat-kurangi-sampah>
- Mirna. (2021). Kelas Belajar zero waste: Bawa Belajar Itu Proses Sampai Akhir. <https://www.mirnaaf.com/2021/10/kelas-belajarzerowaste-bawa-belajar.html>
- Muhammad, Fikri. (2020). DK Wardhani: Melindungi Lingkungan dengan Rumah Tangga Minim Sampah. National Geographic. <https://nationalgeographic.grid.id/read/132121929/dk-wardhani-melindungi-lingkungan-dengan-rumah-tangga-minim-sampah?page=all>
- Pahl-Wostl, C. (2009). A Conceptual Framework for Analyzing Adaptive Capacity and Its Application to Water Management. *Global Environmental Change*, 19(3), 354-365.
- Popli, K., Sudibya, G. L., & Kim, S. (2017). A review of solid waste management using system dynamics modeling. *Journal of Environmental Science International*, 26(10), 1185–1200. doi:10.5322/JESI.2017.26.10.1185.
- Pretty, J. (2003). Social Capital and the Collective Management of Resources. *Science*, 302(5652), 1912-1914.
- Rusvinasari, D., & Risnanto, A. S. (2024). Rancangan Prediksi Volume Sampah TPA Kota Semarang Dengan Pendekatan Sistem Dinamik. *Journal of Data Science Theory and Application*, 3(1), 14-22.
- Sterman, J. (2002). System dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world (ESD-WP-2003- 01.13-ESD Internal Symposium). Cambridge, MA: MIT.