



Pemodelan Sistem Dinamis Analisis Ketercapaian Reduksi Sampah Plastik Pada TPA Kota Surabaya

Yuni Krida Sakti^{1✉}, Dwi Andi HR²

Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Industri, Universitas 45 Surabaya^(1,2)

DOI: 10.31004/jutin.v7i3.32112

✉ Corresponding author:
[kridasakti81@gmail.com]

Article Info	Abstrak
<p>Kata kunci: Reduksi; Sampah Plastik; Tempat Pembuangan Akhir (TPA); Simulasi sistem dinamis; Bank Sampah</p>	<p>Timbunan sampah plastik di kota Surabaya mengalami peningkatan secara signifikan per tahunnya. Terdapat kurang lebih 128.480 ton per tahun sampah plastik di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo Surabaya, dengan laju pertumbuhan sekitar 1,29% per tahun. Sedangkan Bank Sampah Induk Surabaya (BSIS) di Tahun 2023 yang bermitra dengan 600 Bank Sampah Unit (BSU) dan 1190 nasabah individu, telah mereduksi sampah plastik sekitar 60 ton per tahun. BSIS di tahun tersebut mereduksi timbunan sampah plastik TPA 0,05%. Pemkot Surabaya menargetkan BSIS mereduksi timbunan sampah plastik 1825 ton per tahun. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi ketercapaian target tersebut, melalui metode pemodelan simulasi sistem dinamis. Dengan menggunakan analisa dan perhitungan dari data sekunder, maka di dapatkan rata-rata laju pertumbuhan mitra aktif BSU 11,5% per tahun dan nasabah individu 15,8% per tahun. Berdasarkan hasil simulasi sistem dinamis, diketahui bahwa target kemungkinan dapat dicapai pada tahun 2030 dengan reduksi sampah plastik sebesar 1.862 ton per tahun.</p>
<p>Keywords: Reduction; Plastic waste; Final Disposal Site (TPA); Dynamic system simulation; Waste Bank</p>	<p>Abstract</p> <p>The accumulation of plastic waste in the city of Surabaya has increased significantly every year. There are approximately 128,480 tons of plastic waste per year at the Benowo Surabaya Final Disposal Site (TPA), with a growth rate of around 1.29% per year. Meanwhile, the Surabaya Main Waste Bank (BSIS) in 2023, which partners with 600 Waste Bank Units (BSU) and 1190 individual customers, has reduced plastic waste by around 60 tons per year. In that year, BSIS reduced landfill plastic waste by 0.05%. The Surabaya City Government targets BSIS to reduce plastic waste accumulation by 1825 tons per year. This research aims to predict the achievement of this target, through dynamic system simulation modeling methods. By using analysis and calculations from secondary data, the average growth rate for BSU active partners is 11.5% per year and individual customers is 15.8% per year. Based on the results of dynamic system simulations,</p>

it is known that the target can possibly be achieved in 2030 with a reduction in plastic waste of 1,862 tons per year.

1. INTRODUCTION

Pesatnya pertumbuhan perekonomian di Kota Surabaya sebagai kota terbesar kedua di Indonesia berbanding lurus terhadap peningkatan kepadatan penduduknya, sehingga berdampak terhadap peningkatan jumlah sampah kota secara signifikan per tahunnya. Total sampah Kota Surabaya mencapai 792.290 ton perhari, dimana sampah plastik menyumbang 14% yaitu sekitar 111.300 ton sampah plastik per tahun (City, 2024). Sumber sampah plastik tertinggi dihasilkan dari tempat tinggal keluarga tunggal atau sektor perumahan sebesar 72% diikuti komersial 12%, selanjutnya 6% Institusi dan sektor lain-lain 10%. Terdapat 74,3 % dari total sampah plastik yang dihasilkan berakhir di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo Surabaya. Hanya sekitar 9% sampah plastik yang disortir untuk di daur ulang atau di kelola oleh Bank Sampah. Pengoperasian Bank sampah memperkuat pengelolaan sampah plastik serta dukungan kesadaran Masyarakat akan lingkungan dapat membantu mengurangi jumlah sampah plastik di Surabaya ((UN-ESCAP), 2018). Berdasarkan data Pemkot Surabaya total sampah sekitar 1600 ton per hari masuk ke TPA Benowo Surabaya, 22% lebih diantaranya merupakan sampah plastik (Widiyana, 2023). Dalam hal ini berarti terdapat 352 ton per hari yaitu sekitar 128.480 ton per tahun total timbunan sampah plastik di TPA Surabaya. Menurut data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) Republik Indonesia bahwa jumlah sampah plastik Kota Surabaya mengalami peningkatan secara signifikan dari tahun ke tahun. Tercatat peningkatan sampah plastik di TPA Benowo Surabaya dari 12,96% di tahun 2013 menjadi 22,01% pada tahun 2020 (KLHK, 2022). Dari data tersebut dapat diketahui bahwa rata-rata laju pertumbuhan timbunan sampah plastik TPA mencapai 1,29% per tahunnya.

Pemkot Surabaya memiliki Bank Sampah Induk (BSIS) sebagai Upaya pengurangan sampah melalui pemilahan sampah plastik serta keberadaannya bertujuan untuk memperkuat Gerakan pengolahan sampah mulai tiap rumah. BSIS bermitra dengan nasabah Bank Sampah Unit (BSU) dan nasabah individu, dimana Masyarakat dapat setor sampah plastik yang bernilai ekonomis ke Bank sampah tiap RW atau bisa langsung ke BSIS (Elaine, 2023). Pertumbuhan nasabah kolektif BSU dan nasabah individu semakin meningkat setiap tahun, tercatat pada tahun 2010 jumlah nasabah BSU 440 unit dan kurang lebih 1000 nasabah individu (Surabaya), 2021), Dan pada tahun 2022 tercatat 1190 nasabah individu (Fahamsyah, 2023) sedangkan di tahun 2023 DLH mencatat jumlah nasabah BSU 600 unit yang menyebar di setiap kelurahan (Elaine, 2023). Dari data-data tersebut dapat diketahui bahwa terdapat rata-rata laju pertumbuhan jumlah BSU sekitar 11,4% dan jumlah nasabah individu sekitar 15,8% per tahun. Namun laju pertumbuhan tersebut tidak diikuti dengan nilai efektivitas BSIS yang masuk klasifikasi rendah yaitu sekitar 25,18% (Widyati et al., 2022). Diketahui aktivitas BSIS belum optimal dimana per hari maksimal mengurangi sampah plastik sekitar 2 ton per hari yaitu sekitar 720 ton per tahun. Namun Pemkot Surabaya tetap optimis untuk menargetkan reduksi sampah plastik bisa mencapai 5 ton per hari atau 1800 ton Per Tahun. Dengan menambah belasan tenaga kerja BSIS serta terus mendorong kesadaran Masyarakat untuk aktif dalam bank sampah dan hasil pengumpulan sampah akan disalurkan ke pabrik plastik melalui Kerjasama mitra dengan Perusahaan terkait (Widiyana, 2023).

Ulasan tersebut diatas yang melatarbelakangi penelitian ini dengan tujuan untuk memprediksi ketercapaian target reduksi timbunan sampah plastik di TPA Surabaya pada kurun waktu 10 tahun mulai tahun 2023 sampai 2033. Dengan menggunakan metode pemodelan simulasi sistem dinamis dan di sertai data-data sekunder dari literatur review yang telah dilakukan. Dihasilkan gambaran visual skema sebab akibat (*causal loop*) dan rancangan model skenario sistem simulasi (*flow stock diagram*) menghasilkan rincian prediksi secara numerik berupa tabel dan grafik yang menggambarkan peningkatan reduksi yang terjadi dari tahun ke tahun dengan durasi 10 tahun. Sehingga model simulasi tersebut dapat di gunakan sebagai acuan dalam pengambilan keputusan dalam perumusan strategi dalam jangka panjang.

2. METHODS

Metode yang di gunakan pada penelitian ini menggunakan simulasi sistem dinamis. Dengan menggunakan data-data sekunder serta fakta di lapangan dapat di gunakan acuan dalam perumusan model seluruh sistem yang diamati serta penentuan variabel-variabel yang terlibat dalam model konseptual dalam sistem tersebut (Bain Khusnul Khotimah,ST, 2015). adapun tahapan penelitian tersebut sebagai berikut;

Tahap Studi Literatur Dan Literatur Review

Studi lapangan meliputi kegiatan survey sampai observasi lokasi penelitian untuk memperoleh gambaran model seluruh sistem TPA Benowo Surabaya melalui kesesuaian data di lapangan. Untuk mendukung kelengkapan data-data yang diperlukan dalam penelitian ini dengan mereview berbagai sumber pustaka antara lain dari artikel jurnal penelitian, buku ajar terkait simulasi sistem dinamik, laporan tahunan instansi terkait, berita online. Selanjutnya dilakukan analisa untuk mengidentifikasi dan penentuan variabel - variabel yang terlibat dan saling berpengaruh terhadap ruang lingkup sistem yang kompleks terkait reduksi sampah plastik di TPA Surabaya. Variabel-variabel tersebut dibatasi oleh kerangka penelitian yang telah di tentukan, selanjutnya dilakukan perancangan model konseptual dalam sistem, sehingga dapat memberikan gambaran awal alur skenario model simulasi sistem dinamis tersebut (Budiharti et al., 2015).

Tahap proses pemodelan simulasi sistem dinamis

Setelah menentukan variabel-variabel yang berpengaruh terhadap perubahan sistem, maka dirancang ke dalam struktur model diagram sebab akibat atau biasa disebut *Causal Loop Diagram* (CLD). Langkah selanjutnya untuk mengetahui perilaku model simulasi sistem dinamis, yaitu dengan membuat *Flow And Stock Diagram* (SFD) atau Diagram stok dan alur yaitu sebuah diagram yang menggambarkan struktur fisik dari apa yang mendasari dari sebuah model simulasi dari sebuah sistem (Budiharti et al., 2015). Dengan menentukan kurun waktu yang akan dilakukan peramalan, dalam penelitian ini menggunakan prediksi 10 tahun ke depan, yang bertujuan untuk mengetahui peningkatan reduksi sampah plastik TPA Surabaya dari tahun 2023 sampai 2033 dengan bantuan software Stella 9.0.2. Langkah selanjutnya melakukan analisa dan pembahasan model skenario simulasi tersebut.

Tahap Pembahasan Dan Kesimpulan

Setelah mengetahui model visualisasi *Causal Loop Diagram* yang menggambarkan hubungan interaksi antar variabel sistem dalam loop umpan balik yang meliputi pola positif dan pola negatif yang menggambarkan pengaruhnya terhadap antar variabel. Variabel yang termasuk dalam pola positif adalah variabel sebab dan akibat mengalami peningkatan atau di notasikan positif dengan arah loop searah dengan jarum jam dan biasa notasikan dengan huruf "R" (*Reinforcement*). Sedangkan pola negatif jika pengaruh variabel mengalami penurunan yang di notasikan negatif dengan arah loop berlawanan arah jarum jam atau biasa di notasikan dengan huruf "B" (*Balancing*). Berdasarkan model CLD yang telah dibuat, maka dapat dirancang model *Stock And Flow Diagram* (SFD), sehingga dapat diketahui gambaran aliran masuk dan keluar yang mengidentifikasi akumulasi nilai stok yang bersifat *independent* di dalam sebuah sistem tersebut. Selanjutnya memberikan masing-masing nilai pada variabel-variabel serta merumuskan perhitungan matematis sederhana pada model SFD, yang bertujuan model simulasi yang telah dirancang dapat di jalankan dengan bantuan software stella 9.0.2, dan output dari simulasi tersebut berupa grafik visual dan tabel hasil prediksi mulai tahun 2023 sampai 2033. Dari hasil output simulasi tersebut dapat ditarik kesimpulan pada tahun berapa nilai reduksi sampah plastik TPA Surabaya mencapai target yang ditentukan.

3. RESULT AND DISCUSSION

Penentuan Variabel

Berdasarkan uraian pada bagian pendahuluan tersebut diatas, maka terdapat 9 variabel yang mencerminkan karakteristik terhadap sistem dan memiliki pengaruh terhadap peningkatan reduksi sampah TPA Surabaya yaitu;

1. Timbunan Sampah Plastik TPA
2. Laju Efektifitas Bank Sampah Induk Surabaya (BSIS) / Laju efektifitas reduksi
3. Jumlah timbunan sampah plastik BSIS
4. Jumlah reduksi sampah plastik BSIS
5. Laju pertumbuhan sampah plastik TPA
6. Jumlah sampah plastik hasil dari Bank Sampah Unit (BSU)
7. Laju pertumbuhan BSU
8. Jumlah sampah plastik dari nasabah individu
9. Laju pertumbuhan nasabah individu

Model *Causal Loop Diagram* (CLD)

Setelah menentukan 9 (sembilan) variabel yang telah diidentifikasi memiliki interaksi antar variabel sehingga mempunyai hubungan *causal feedback loop*, oleh karena adanya pola keterkaitan yang sangat erat antar variabel dalam model skenario sistem yang disimulasikan, sehingga dapat menghasilkan umpan balik yang akan berubah secara berkesinambungan selama kurun waktu tahun yang di prediksi yaitu selama 10 tahun ke depan mulai dari tahun 2023 sampai 2033. Variabel-variabel tersebut harus di klasifikasikan terlebih dahulu ke dalam 2 (dua) kelompok yaitu variabel yang termasuk dalam pola positif, yang menyatakan bahwa variabel tersebut pada model diagram sebab-akibat mengalami peningkatan atau di notasikan positif dengan arah loop searah dengan jarum jam dan biasa notasikan dengan huruf "R" (*Reinforcement*). Dan variabel mana saja yang termasuk klasifikasi variabel dengan pola negatif jika pengaruh variabel mengalami penurunan yang di notasikan negatif dengan arah loop berlawanan arah jarum jam atau biasa di notasikan dengan huruf "B" (*Balancing*).

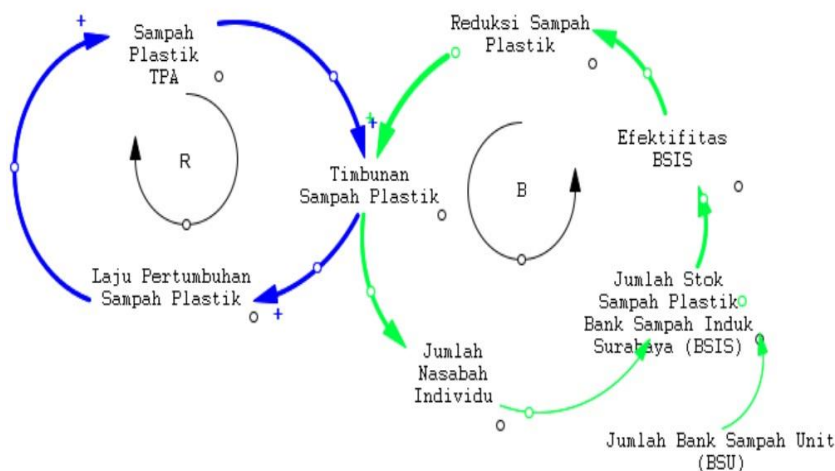
• **Variabel dengan pola positif**

1. Timbunan Sampah Plastik TPA
2. Laju pertumbuhan sampah plastik TPA

• **Variabel dengan pola negative**

1. Jumlah timbunan sampah plastik BSIS
2. Laju efektifitas reduksi
3. Jumlah sampah plastik hasil dari Bank Sampah Unit (BSU)
4. Laju pertumbuhan BSU
5. Jumlah sampah plastik dari nasabah individu
6. Laju pertumbuhan nasabah individu

Pola keterkaitan yang sangat erat antar variabel-variabel tersebut dirancang dalam model skenario sistem reduksi sampah plastik BSIS sehingga menghasilkan model diagram sebab akibat atau CLD sesuai pada gambar 1.



Gambar 1. Model Causal Loop Diagram Reduksi Sampah Plastik

Stock Flow Diagram (SFD)

Berdasarkan model CLD reduksi sampah plastik seperti gambar 1, maka dapat dijadikan acuan pembuatan model SFD untuk memecahkan masalah dinamis yang meliputi cakupan jumlah reduksi sampah plastik yang dapat diserap oleh BSIS, jumlah peningkatan timbunan sampah plastik TPA, dengan nilai-nilai variabel yang telah ditentukan di bagian pendahuluan. Selanjutnya perumusan matematis berdasarkan pola aliran perubahan *stock* serta menambahkan beberapa entitas atau informasi di dalam model sebuah *flow*, dimana variabel dapat mempengaruhi nilai dari *sebuah stock*. Adapun informasi nilai variabel yang telah didapatkan berupa nilai rata-

rata laju pertumbuhan jumlah BSU sekitar 11,4% dan jumlah nasabah individu sekitar 15,8% per tahun serta laju efektivitas BSIS dengan menggunakan nilai 0,48%. Reduksi sampah plastik BSIS sebesar 720 ton per tahun. Selanjutnya rata-rata laju pertumbuhan timbunan sampah plastik TPA sebesar 1,29% per tahun. Serta target yang diharapkan sebesar 1800 ton per tahun. Dari data informasi nilai variable diatas, maka rumusan matematis adalah sebagai berikut;

- Jumlah sampah BSIS(t) = stok sampah plastik BSIS (t-dt)+(stok sampah nasabah individu+stok sampah BSU)*dt
- Jumlah sampah di awal tahun = 720 ton/tahun

Rumus Matematis Aliran masuk (Inflows) :

- Jumlah Stok Sampah Nasabah_Individu = Stok sampah plastik_BSIS x laju_pertumbuhan_nasabah_individu
- Bank_Sampah_Unit = stok_sampah_plastik_BSIS x Laju_pertumbuhan_bank_sampah_unit (BSU)
- Jumlah timbunan sampah TPA (t) =
 timbunan_sampah_plastik_TPA (t - dt) + (jumlah_sampah_plastik - Reduksi_sampah_plastik) * dt

Keterangan:

Timbunan_sampah_plastik_TPA (t - dt) = 128.480 ton per tahun
 Laju_pertumbuhan_nasabah_individu = 15,8%
 Laju_pertumbuhan bank_sampah_unit (BSU) = 11,4%
 Stok sampah plastik BSIS (t-dt) = 720 ton per tahun
 Laju efektivitas reduksi sampah = 48%

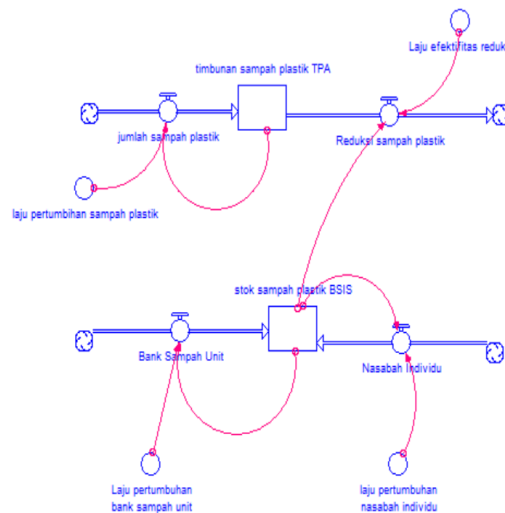
Rumus Matematis Aliran masuk (Inflows) :

- Jumlah peningkatan sampah plastik TPA = timbunan_sampah_plastik_TPA x laju_pertumbuhan_sampah_plastik

Rumus Matematis Aliran Keluar (Outflows) :

- Peningkatan Reduksi_sampah_plastik = stok_sampah_plastik_BSIS x Laju_efektivitas_reduksi

Model SFD sistem simulasi dinamis peningkatan jumlah reduksi sampah plastik BSIS dapat diamati pada Gambar 2, sedangkan hasil perhitungan matematis aliran masuk dan keluar dengan setting durasi waktu peramalan selama 10 tahun mulai dari tahun 2023 sampai 2033, meliputi gambar grafik yang dapat diamati pada Gambar. 3 serta daftar tabel data hasil perhitungan model simulasi tersebut dapat dianalisa pada tabel 1.



Gambar 2. Model SFD skenario simulasi reduksi sampah plastik



Gambar 3. Grafik simulasi reduksi sampah plastik

Tabel 1. Hasil Data Simulasi Pengelolaan Sampah Plastik Kota Surabaya

Tahun	Stok Sampah BSIS (Ton)	Timbunan Sampah Plastik TPA (Ton)	Stok Bank Sampah Induk (BSU) (Ton)	Jumlah sampah Nasabah Individu (Ton)	Jumlah Reduksi Sampah Plastik (Ton)
2023	720	128.480	82	113	345
2024	915	129.791	104	114	440
2025	1.164	131.026	132	184	560
2026	1.481	132.157	169	234	711
2027	1.884	133.151	215	298	905
2028	2.397	133.964	273	379	1.150
2029	3.049	134.541	348	482	1.463
2030	3.879	134.813	442	613	1.862
2031	4.934	134.690	562	779	2.368
2032	6.276	134.059	715	992	3.013
2033	7.983	132.775			

Berdasarkan gambaran visual simulasi peningkatan sampah plastik sesuai pada Gambar 3, diketahui bahwa terjadi kenaikan jumlah timbunan sampah plastik TPA Surabaya terus melaju naik mulai tahun 2023 sampai pada puncaknya di tahun 2030, namun prosentase kenaikan yang terjadi tidak signifikan. Menurut pola grafik tersebut terjadi prosentase penurunan pada tahun 2031 sampai 2033. Seiring dengan peningkatan reduksi sampah yang dilakukan oleh BSIS yang semakin beranjak naik mulai tahun 2023 sampai 2033. Jumlah reduksi yang meningkat didukung dengan peningkatan efektifitas kinerja BSIS, dimana pada tahun 2022 efektifitas BSIS termasuk klasifikasi rendah yang hanya mencapai 25,18%, namun dalam pengembangan skenario sistem simulasi pada penelitian ini meningkatkan nilai efektifitas kinerja BSIS sebesar 48%. Dengan begitu diharapkan mampu untuk memenuhi target Pemkot Surabaya mereduksi sampah plastik sampai mencapai 1800 ton per tahun atau 5 ton per hari. Berdasarkan data pada tabel 1. Dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan secara signifikan terhadap reduksi sampah plastik yang di kelola oleh BSIS sampai puncaknya pada tahun 2033, hal ini berbanding lurus dengan meningkatnya pula Laju pertumbuhan bank sampah unit (BSU) serta laju pertumbuhan nasabah individu. Jika minimal prosentase laju pertumbuhan BSU 11,4% per tahun dan laju pertumbuhan nasabah individu 15,8% per tahun dapat dipertahankan untuk tahun berikutnya, maka target mengurangi sampah plastik 1800 ton per tahun kemungkinan dapat tercapai pada tahun 2030 dengan capaian reduksi sampah plastik 1862 ton pertahun dan akan terus berkurang secara signifikan pada tahun 2033 sesuai perhitungan simulasi pada tabel 1.

4. CONCLUSION

Berdasarkan hasil pemodelan simulasi reduksi sampah plastik BSIS dapat diketahui variabel yang berperan penting terhadap peningkatan jumlah reduksi sampah plastik yaitu prosentase peningkatan efektifitas kinerja BSIS, laju peningkatan nasabah mitra BSU dan nasabah individu. Dengan besar peningkatan 48 % untuk efektifitas kinerja BSIS, dan 15,8% untuk laju pertumbuhan nasabah individu serta peningkatan 11,8% laju pertumbuhan mitra BSU per tahunnya, maka akan mampu mencapai target untuk mereduksi sampah plastik sampai 1862 ton per tahun pada tahun 2033.

5. REFERENCES

- (UN-ESCAP), K. E. dan S. P. untuk A. dan P. (2018). *Menangani Polusi Plastik di Surabaya, Indonesia*.
- An, B., Cahya, L. M., & Fudhla, A. F. (2013). Analisis Potensi Utilisasi Sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kota Metropolitan: Suatu Pendekatan Model Berbasis Sistem Dinamik (Study Kasus: TPA Kota Surabaya). *Prosiding National Engineering Conference*, 84–90. <https://doi.org/10.31219/osf.io/eg2t9>
- Bain Khusnul Khotimah, ST, M. K. (2015). *Teori Simulasi Dan Pemodelan: Konsep, Aplikasi Dan Terapan (Pertama)*. Wade Group.
- Budiharti, N., Cv, M., Litera, D., & Malang, B. (2015). *Simulasi Sistem Industri* (Herly (ed.); pertama). CV. Dream Litera Buana.
- City, G. space dan cleansing agency of surabaya. (2024). *Rencana aksi pengelolaan sampah plastik perairan di kota surabaya*.
- Elaine, M. (2023, September). Bank Sampah Induk Surabaya Diresmikan, Targetkan Pengurangan 120 Ton Tiap Bulan. <https://www.suarasurabaya.net/kelanakota/2023/bank-sampah-induk-surabaya>.
- Fahamsyah, K. (2023). Setor Sampah Bisa Datangkan Uang di Bank Sampah Induk Surabaya. <https://www.sapanusa.id/surabaya/30127885/setor-sampah-bisa-datangkan-uang-di-bank-sampah-induk-surabaya>.
- Forrester, J. W. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review*, 10(2–3), 245–256. <https://doi.org/10.1002/sdr.4260100211>
- Fudhla, A. F., Rachmawati, W., & Retnowati, D. (2021). Analysis of sugar import policy effects on sugar cane farmer's income in East Java: A system dynamic approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1072(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1072/1/012023>
- KLHK. (2022). Ironi Peningkatan Signifikan Jumlah Sampah Plastik di Surabaya. <https://www.liputan6.com/jatim/read/4896758>.
- Surabaya), B. A. (2021). Manfaatkan Bank Sampah Induk Surabaya, Bisa Dapat Uang, Sampah Berkurang. <https://kumparan.com/beritaanaksurabaya>.
- Widiyana, E. (2023). Surabaya Targetkan Pengurangan 5 Ton Sampah Plastik per Hari. <https://www.detik.com/jatim/berita/d-6815807>.
- Widyati, S., Meidiana, C., & Sari, K. E. (2022). Efektivitas dan efisiensi bank sampah induk surabaya. *Planning for Urban Region and Environment*, 11(April), 41–48.