

TESIS

**PERANCANGAN STRATEGI *CIRCULAR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT*
BERBASIS SISTEM DINAMIS PADA PENGELOLAAN SAMPAH DI KABUPATEN
SLEMAN, YOGYAKARTA**



DWINAZ FADZIL MUHAMMAD

23916022

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
PROGRAM MAGISTER FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2026

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dwinaz Fadzil Muhammad
NIM : 23916022
Program Studi : Teknik Industri
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Universitas : Universitas Islam Indonesia

Dengan ini menyatakan bahwa tesis yang berjudul:

" Perancangan Strategi *Circular Supply Chain Management* Berbasis Sistem Dinamis Pada Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta "

Adalah benar-benar karya saya sendiri dan tidak merupakan hasil penjiplakan (plagiarisme) dari karya orang lain, baik sebagian maupun seluruhnya, kecuali pada bagian-bagian yang dirujuk sumbernya sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa tesis ini merupakan hasil plagiarisme atau melanggar ketentuan akademik, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Indonesia.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan penuh tanggung jawab.

Yogyakarta, 17 Januari 2026



Dwinaz Fadzil Muhammad

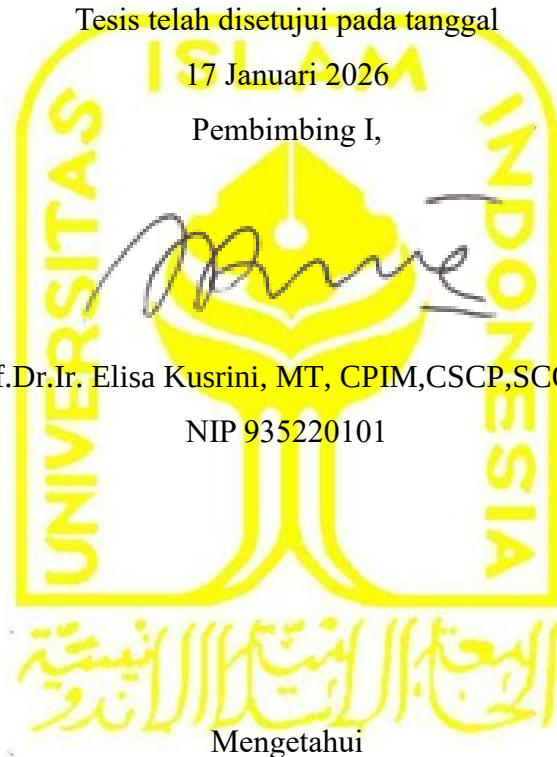
LEMBAR PENGESAHAN

PERANCANGAN STRATEGI *CIRCULAR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT* BERBASIS SISTEM DINAMIS PADA PENGELOLAAN SAMPAH DI KABUPATEN SLEMAN, YOGYAKARTA

Tesis telah disetujui pada tanggal

17 Januari 2026

Pembimbing I,



Prof.Dr.Ir. Elisa Kusrini, MT, CPIM,CSCP,SCOR-P

NIP 935220101

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Industri Program Magister

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia



Ir.Winda Nur Cahyo, S.P., M.T., Ph.D., IPM, ASEAN-Eng., APEC-Eng

NIP 025200519

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

PERANCANGAN STRATEGI *CIRCULAR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT* BERBASIS SISTEM DINAMIS PADA PENGELOLAAN SAMPAH DI KABUPATEN SLEMAN, YOGYAKARTA

DWINAZ FADZIL MUHAMMAD

23916022

Tesis Telah Diuji dan Dinilai Oleh Panitia Penguji

Program Studi Teknik Industri Program Magister

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Pada Tanggal 29 Januari 2026

Tim Penguji

Prof.Dr.Ir.ElisaKusrini,MT,CPIM,CSCP,SCOR-P

Ketua

Dr.Ir.Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc, IPU.

Anggota I

Dr.Harwati, S.T., M.T.

Anggota II

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Industri Program Magister

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia



Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM, ASEAN-Eng., APEC-Eng

NIP 025200519

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

“Barangsiapa mengerjakan amal saleh, baik laki-laki maupun perempuan dalam keadaan beriman, maka sesungguhnya akan Kami berikan kepadanya kehidupan yang baik dan sesungguhnya akan Kami beri balasan kepada mereka dengan pahala yang lebih baik dari apa yang telah mereka kerjakan”
(QS. An-Nahl: 97:)

“Dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi setelah Allah memperbaikinya.”
(QS. Al-A’raf: 56)

Tesis ini saya persembahkan dengan penuh rasa syukur dan hormat kepada:

Bapak Umar Nasir dan Ibu Kusrini, sebagai kedua orang tua tercinta yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, pengorbanan, serta dukungan moral dan spiritual yang tiada henti. Segala capaian dalam studi ini tidak akan terwujud tanpa keikhlasan, kesabaran, dan ketulusan yang selalu menyertai setiap langkah perjalanan saya.

Universitas Islam Indonesia, sebagai institusi pendidikan yang telah memberikan lingkungan akademik yang kondusif, nilai-nilai keilmuan, serta kesempatan untuk berkembang secara intelektual dan profesional selama menempuh pendidikan magister.

Ibu Prof. Dr. Ir. Elisa Kusrini, MT, CPIM, CSCP, SCOR-P, selaku dosen pembimbing tesis, atas bimbingan, arahan, ilmu pengetahuan, serta keteladanan akademik yang diberikan dengan penuh kesabaran dan dedikasi. Dukungan dan masukan yang konstruktif selama proses penyusunan tesis ini menjadi fondasi penting dalam penyelesaian penelitian ini.

Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta menjadi bentuk tanggung jawab akademik yang bernilai bagi semua pihak.

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Wr. Wb. Al-hamdulillahi robbil'alamin

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufiq serta hidayahnya, sehingga kita masih diberi kesempatan dan kemudahan untuk terus menggali ilmunya. Shalawat dan Salam selalu tercurah kepada baginda Agung Rasulullah Muhammad SAW, yang telah menuntun kita dari zaman jahiliyah menuju zaman yang terang benderang penuh ilmu seperti saat sekarang ini. Sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini tepat pada waktunya dengan judul “Perancangan Strategi *Circular Supply Chain Management* Berbasis Sistem Dinamis Pada Pengelolaan Sampah Di Kabupaten Sleman, Yogyakarta ” Sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada Program Studi Magister Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Teknologi Informasi Universitas Islam Indonesia. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih dan penghargaan yang tulus kepada semua pihak yang telah banyak memberi motivasi, bimbingan, dorongan dan bantuan dalam penulisan Tesis ini, baik secara langsung maupun tidak langsung, terutama pada:

1. Allah SWT dan Nabi Muhammad SAW sebagai sumber petunjuk & kekuatan dalam perjalanan kehidupan penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU., Dekan Fakultas Teknologi industri, Universitas Islam Indonesia
3. Bapak Dr.Drs. Imam Djati Widodo, M.Eng.Sc., Ketua Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Winda Nur Cahyo, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN-Eng., APEC-Eng. Selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Dan Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
5. Ibu Prof.Dr.Ir. Elisa Kusrini, MT., CPIM,CSCP,SCOR-P, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan mengarahkan sehingga tesis ini dapat di selesaikan.
6. Pengurus Dinas Lingkungan Hidup Sleman dan staff kebersihan yang telah memberikan kesempatan penulis dan fasilitas untuk melaksanakan penelitian dna pengambilan data.
7. Kedua orang tua yang senantiasa memberikan doa, perhatian, dan motivasi tiada henti.
8. Seluruh Dosen Magister Teknik Industri Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu dan pengalaman selama perkuliahan maupun di luar perkuliahan.
9. Sahabat dan teman-teman yang selalu memberikan semangat dan dukungan selama perkuliahan serta memberikan bantuan penulis secara langsung maupun tidak langsung sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan pada penulisan Laporan ini. Penulis mengharapkan adanya kritik maupun saran yang bersifat membangun yang bertujuan untuk menyempurnakan isi dari Tesis ini serta bermanfaat bagi semua pihak yang berkepentingan pada umumnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 17 Januari 2026



Dwinaz Fadzil Muhammad

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk merancang strategi *Circular Supply Chain Management* (CSCM) berbasis sistem dinamis dalam pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Peningkatan jumlah penduduk dan aktivitas ekonomi menyebabkan peningkatan volume sampah yang signifikan sehingga diperlukan model pengelolaan yang berkelanjutan dan efisien. Pendekatan CSCM digunakan karena mampu mengintegrasikan prinsip ekonomi sirkular melalui konsep 5R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover, and Redesign*) untuk menciptakan sistem rantai pasok tertutup (*closed-loop system*) pada pengelolaan sampah. Metode penelitian menggunakan pendekatan *system dynamics modeling* dengan tahapan analisis kualitatif dan kuantitatif melalui pembuatan *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock and Flow Diagram* (SFD). Data penelitian diperoleh dari observasi lapangan, wawancara dengan Dinas Lingkungan Hidup, serta literatur pendukung. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model *eksisting* pengelolaan sampah di Sleman telah menerapkan sebagian prinsip CSCM namun masih bersifat semi-linier. Melalui pengembangan empat skenario simulasi, Skenario ke-4 yang mengintegrasikan Pusat Olah Organik (POO), TPS3R Pencacah Plastik, dan TPST Kompos dinilai paling optimal dalam mengurangi timbulan sampah dan meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah. Skenario tersebut berhasil membentuk sistem *multi-loop circular chain* yang meminimalkan limbah, memaksimalkan pemanfaatan sumber daya, dan mengubah paradigma dari *waste management* menjadi *resource management*. Model yang dihasilkan diharapkan menjadi acuan strategis bagi pemerintah daerah dalam merumuskan kebijakan jangka panjang menuju pengelolaan sampah yang berkelanjutan.

Kata kunci: *Circular Supply Chain Management*, Sistem Dinamis, Pengelolaan Sampah, TPS3R, TPST, POO, Skenario, Simulasi.

.

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Batasan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
1.6 Sistematika Penelitian	7
BAB II	9
TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Kajian Induktif	9
2.2 Kajian Deduktif.....	16
2.2.1 Konsep Pengelolaan Sampah	16
2.2.2 <i>Supply Chain</i>	17
2.2.3 <i>Circular Economy</i>	17
2.2.4 <i>Circular Supply Chain Management</i>	20
2.2.5 Integrasi CE ke dalam CSCM	24
2.2.6 Teknologi dan kompetensi di CSCM.....	31
2.2.7 CSCM dengan prinsip 5R.....	34
2.2.8 <i>Sustainability</i> CSCM	36
2.2.9 Simulasi Pengolahan Sampah dengan prinsip CSCM.....	37
2.2.10 Sistem Dinamis pada Pengolahan Sampah dengan prinsip CSCM.....	41

2.2.11	Proses Permodelan pada Pengolahan Sampah dengan prinsip CSCM.....	45
2.2.12	Sumber Informasi dalam Pembuatan Model Simulasi	47
2.2.13	Umpan Balik (<i>Feedback</i>).....	48
2.2.14	Diagram <i>Loop</i> Sebab-akibat (<i>Causal Loop Diagram</i>).....	48
2.2.15	Diagram Alir (<i>Stock and Flow Diagram</i>)	50
2.2.16	Struktur dan Perilaku Dinamis	52
BAB III		54
METODE PENELITIAN		54
3.1	Subjek dan Objek Penelitian	54
3.2	Ruang lingkup Penelitian	54
3.3	Fokus dan Kajian Penelitian	55
3.4	Populasi Sampel.....	55
3.5	Instrumen Penelitian.....	55
3.6	Sumber Penelitian	56
3.7	Prosedur Penelitian.....	57
3.8	Deskripsi Tahapan Penelitian	59
BAB IV		64
4.1	Pengumpulan Data	64
4.1.1	Daerah Penelitian.....	64
4.1.2	Data Kependudukan Kabupaten Sleman	66
4.2	Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman	69
4.2.1	Model <i>Existing</i> Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	79
4.2.2	Skenario Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman	89
BAB V		123
5.1	Analisis Uji Beda.....	123
5.1.1	Uji Beda Model <i>Existing</i> dan <i>Real Data</i>	123
5.1.2	Uji Beda Hasil Simulasi pada TPS3R	124
5.1.3	Uji Beda Hasil Simulasi pada TPST.....	125
5.1.4	Uji Beda Hasil Simulasi pada TPA	126
5.1.4	Uji Beda Hasil Simulasi pada <i>Landfill</i>	127
5.2	Analisis Model <i>Existing</i> (<i>Baseline</i>)	128
5.3	Analisis Skenario 1	129
5.4	Analisis Skenario 2.....	131
5.5	Analisis Skenario 3.....	132
5.6	Analisis Skenario 4.....	133

BAB IV	138
6.1 Kesimpulan.....	138
6.2 Saran.....	139
DAFTAR PUSTAKA	141
LAMPIRAN.....	146

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kajian Literatur	10
Tabel 2.2 <i>Product or Service Circular Design</i>	24
Tabel 2.3 Jenis dan Timbulan Sampah.....	29
Tabel 2.4 Teknologi Terkini yang Digunakan dalam Rantai Pasokan	32
Tabel 2.5 Kompetensi Umum	33
Tabel 4.1 Luas Daerah berdasarkan Kecamatan di Kabupaten Sleman.....	64
Tabel 4.2 Jumlah Penduduk Kabupaten Sleman 2015-2025	67
Tabel 4.3 Jumlah Migrasi Penduduk Kabupaten Sleman	67
Tabel 4.4 Rasio Migrasi Penduduk Kabupaten Sleman.....	68
Tabel 4.5 Data TPS3R Kabupaten Sleman	70
Tabel 4.6 Data TPST Kabupaten Sleman	72
Tabel 4.7 Data RDF (<i>Refuse-Derived Fuel</i>)	74
Tabel 4.8 Data Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sleman.....	75
Tabel 4.9 Pusat Olah Organik (POO).....	75
Tabel 4.10 Data Timbunan Sampah Sleman	76
Tabel 4.11 Data Jenis Timbunan Sampah Sleman	77
Tabel 4.12 Data Sumber Timbunan Sampah Sleman.....	78
Tabel 4.13 Data Pencapaian Timbunan Sampah Sleman.....	78
Tabel 4.14 Verifikasi dan Validasi Model <i>Eksisting</i>	87
Tabel 5.1 <i>Landfill Compare</i>	134
Tabel 5.2 TPA <i>Compare</i>	135
Tabel 5.3 TPST <i>Compare</i>	136
Tabel 5.4 TPS3R <i>Compare</i>	136

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Circular Economy</i>	18
Gambar 2.2. Model Linear Ekonomi	18
Gambar 2.3. Aliran Sumber Daya melalui <i>Value Chain</i>	19
Gambar 2.4. <i>Linear and closed Supply Chain</i>	22
Gambar 2.5. <i>Circular Supply Chain</i>	22
Gambar 2.6. Pengadaan Sirkular	26
Gambar 2.7. Siklus Hidup Produk	27
Gambar 2.8. Pengelolaan Sampah Secara Umum	30
Gambar 2.9. Hirarki Pengelolaan Sampah.....	30
Gambar 2.10 Simulasi Memberikan Cara Virtual dalam Melakukan Eksperimen terhadap Sistem.....	40
Gambar 2.11 Proses Sistem Dinamik	45
Gambar 2.12 Cara Penulisan Diagram <i>Loop</i> Sebab-Akibat	49
Gambar 2.13 Polaritas Hubungan	50
Gambar 2.14 Cara Penulisan Diagram Alir	51
Gambar 2.15 Analogi Hidrolik	51
Gambar 2.16 Representasi Struktur Diagram Alir	52
Gambar 2.17 Perilaku model secara umum	53
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahap 1	57
Gambar 3.2 Diagram Alir Tahap 2.....	58
Gambar 3.3 Diagram Alir Tahap 3	59
Gambar 4.1. Peta wilayah Kabupaten Sleman.....	65
Gambar 4.2. <i>Casual Loop Diagram</i> (CLD) Model <i>Existing</i> Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	82
Gambar 4.3. <i>Stock Flow Diagram</i> (SFD) Model <i>Existing</i> Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	84
Gambar 4.4. Hasil Simulasi Model <i>Existing</i> Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	86
Gambar 4.5. <i>Casual Loop Diagram</i> (CLD) Model Skenario 1 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	91
Gambar 4.6. <i>Stock Flow Diagram</i> (SFD) Model Skenario 1 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	93
Gambar 4.7. Hasil Simulasi Skenario 1	95
Gambar 4.8. <i>Casual Loop Diagram</i> (CLD) Model Skenario 2 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	98

Gambar 4.9. <i>Stock Flow Diagram</i> (SFD) Model Skenario 2 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	101
Gambar 4.10 Hasil Simulasi Skenario 2	103
Gambar 4.11 <i>Casual Loop Diagram</i> (CLD) Model Skenario 3 Penglolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	106
Gambar 4.12 <i>Stock Flow Diagram</i> (SFD) Model Skenario 3 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	108
Gambar 4.13 Hasil Simulasi Skenario 3	110
Gambar 4.14 <i>Casual Loop Diagram</i> (CLD) Model Skenario 4 Penglolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	113
Gambar 4.15 <i>Stock Flow Diagram</i> (SFD) Model Skenario 4 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.....	116
Gambar 4.16 Hasil Simulasi Skenario 4	118
Gambar 5.1 Hasil Uji paired sample <i>t-test Model Existing</i> dan <i>Real Data</i>	123
Gambar 5.2 Hasil Uji Anova Simulasi TPS3R	124
Gambar 5.3 Hasil Uji Anova Simulasi TPST	125
Gambar 5.4 Hasil Uji Anova Simulasi TPA.....	126
Gambar 5.5 Hasil Uji Anova Simulasi <i>Landfill</i>	127
Gambar 5.6 <i>Pivot Chart</i> Hasil <i>Running</i> Simulasi Jumlah Penduduk dan Timbunan Sampah Kabupaten Sleman	128
Gambar 5.7 <i>Pivot Chart</i> Hasil <i>Running</i> Simulasi Exisiting Kabupaten Sleman	129
Gambar 5.8 <i>Pivot Chart</i> Hasil <i>Running</i> Simulasi Skenario 1 Kabupaten Sleman	130
Gambar 5.9 <i>Pivot Chart</i> Hasil <i>Running</i> Simulasi Skenario 2 Kabupaten Sleman	131
Gambar 5.10 <i>Pivot Chart</i> Hasil <i>Running</i> Simulasi Skenario 3 Kabupaten Sleman	132
Gambar 5.11 <i>Pivot Chart</i> Hasil <i>Running</i> Simulasi Skenario 4 Kabupaten Sleman	134
Gambar 5.12 <i>Pivot Chart Landfill Compare</i>	135
Gambar 5.13 <i>Pivot Chart TPA Compare</i>	135
Gambar 5.14 <i>Pivot Chart TPST Compare</i>	136
Gambar 5.15 <i>Pivot Chart TPS3R Compare</i>	137
Gambar 5.16 Penambahan Unit Fasilitas Pengolahan Sampah untuk Mencapai <i>Zero Waste</i>	137
Gambar 5.17 Target Efektifitas & Efisiensi Pengolahan Sampah untuk Mencapai <i>Zero Waste</i>	137

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan perekonomian perkotaan dan bertambahnya jumlah penduduk perkotaan menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan yang mengancam kesehatan akibat timbunan sampah perkotaan (Zhou et al., 2019). Khususnya dalam beberapa tahun terakhir, konsumsi berbagai jenis sampah kota meningkat secara signifikan (Tirkolae et al., 2020). Pengelolaan sampah kota menjadi tantangan yang semakin besar bagi pemerintah kota di negara-negara berkembang (Azevedo et al., 2019). Permasalahan sampah memberikan tekanan besar pada sistem pengelolaan sampah perkotaan yang terpusat (Kuznetsova et al., 2019). Pengelolaan sampah yang tepat perlu dilakukan guna menghindari permasalahan terbatasnya tempat pembuangan sampah yang dapat menimbulkan penyakit (Fetnat et al., 2019).

Sistem pembuangan limbah kota adalah salah satu layanan kota yang paling penting (Phonphon et al., 2019). Pengelolaan limbah dianggap sebagai masalah rantai pasokan strategis karena melibatkan pembangkitan, pengumpulan, pemisahan, pengangkutan, pemrosesan, dan distribusi (Mohammadi et al., 2019). Tantangan ini membebani kapasitas yang banyak pada pemerintah daerah, karena limbah kemasan makanan atau minuman menimbulkan masalah lingkungan, ekonomi dan sosial (Bugge et al., 2019). Upaya pemerintah daerah sangat penting untuk menemukan solusi pengelolaan yang terjangkau dengan dampak lingkungan yang minimal (Edwards et al., 2019).

Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman mengalami hambatan karena ditutupnya Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan secara Permanen (jogjaprovo.go.id, 2024). Terjadinya kelebihan kapasitas atau *overload* di TPA Piyungan Yogyakarta menyebabkan keluarnya Surat Edaran dari DLHK DIY No. 658/09735 tentang Libur Pelayanan Sampah, TPA Piyungan menutup pelayanan sementara mulai tanggal 18-20 Maret 2022, kemudian keluar SE No. 035 Tahun 2023 tentang Penutupan Pelayanan TPA Regional Piyungan mulai 23 Juli – 5 September 2023. Dengan penutupan TPA piyungan ini menyebabkan penumpukan sampah di dimana-mana sehingga menyebabkan bau, sumber penyakit bagi masyarakat dan pencemaran lingkungan. (rsudprambanan.slemankab.go.id, 2024).

Alasan ditutupnya Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan secara Permanen karena Pemda DIY melakukan Sistem desentralisasi penuh pengelolaan sampah oleh Kabupaten/Kota

di wilayah DIY dengan mengeluarkan SE No. 030 Tahun 2022 Tentang Gerakan Pilah Sampah dari Rumah ke semua Instansi SKPD dan seluruh masyarakat di Kabupaten Sleman, Perubahan dalam pengelolaan sampah dari sistem kumpul, angkut, buang menjadi kurangi dari sumber, pilah, dan olah. Gerakan masyarakat mengolah sampah dilatarbelakangi banyaknya produksi sampah di Kabupaten Sleman dari waktu ke waktu sehingga perlu peningkatan kesadaran dan gerakan bersama untuk lebih mengelola sampah secara bijak. Sampah ini harus dikelola dengan dipilah dan dikelompokkan agar mempunyai nilai guna dan daya guna sehingga dapat didaur ulang. Proses daur ulang sampah secara mandiri oleh masyarakat dapat meningkatkan perekonomian dan mengurangi beban alam (prambanan.slemankab.go.id, 2024).

Namun, penerapan desentralisasi dalam pengelolaan sampah di Yogyakarta, termasuk di Kabupaten Sleman, belum berjalan dengan baik. Penutupan TPA Piyungan telah memunculkan dampak negatif yang signifikan, seperti penumpukan sampah di berbagai tempat dan ruas jalan akibat tidak adanya tempat pembuangan akhir yang tersedia. Sistem desentralisasi penuh yang diterapkan mengharuskan setiap kabupaten/kota untuk mandiri dalam mengelola sampahnya, tetapi implementasinya tampaknya masih terkendala oleh berbagai faktor. Salah satu masalah utama adalah rendahnya partisipasi masyarakat dalam memilah dan mengolah sampah di tingkat sumber, yang mungkin disebabkan oleh kurangnya edukasi dan sosialisasi terkait sistem baru ini. Selain itu, partisipasi Dinas Lingkungan Hidup dalam memberikan fasilitas dan pengawasan yang memadai juga tampaknya belum optimal, sehingga koordinasi dan eksekusi kebijakan pengelolaan sampah menjadi tidak efektif. Sehingga pembuangan di TPA Piyungan tetap dilakukan namun dibatasi, pembuangan limbah sampah di TPA Piyungan dilakukan karena sampah yang tidak terolah masih tetap ada meskipun ditetapkan kebijakan Desentralisasi, pembuangan sampah di TPA Piyungan dilakukan sesuai kebijakan dan prosedur oleh pemerintah DIY Provinsi, bukan pemerintah Daerah Kabupaten. TPA Piyungan juga melakukan proses pengembangan menjadi TPST Piyungan, hal ini tentu menjadi *improvement* yang sangat signifikan dalam mengolah sampah yang tadinya dibuang di *landfill* menjadi tempat 3R sampah di hilir.

Terdapat beberapa konsep untuk mengatasi permasalahan sampah melalui daur ulang yaitu *open landfill*, *zero waste*, dan *circular economy* atau *circular supply chain management*. Apabila pembuangan sampah dengan sistem TPA terbuka (*open dumping*) yang sudah banyak di praktikan, sampah akan tertinggal di area terbuka sehingga memerlukan lahan yang luas untuk membuang sampah. Hal ini juga memakan tempat dan dapat menimbulkan pencemaran udara dan lingkungan serta dapat menyebabkan berbagai penyakit. Ini adalah filosofi yang

mempromosikan desain ulang siklus sumber daya dari sistem linier ke *loop* tertutup untuk mencapai *zero waste*. Hasilnya, seluruh produk digunakan kembali dan tidak ada limbah yang ditambahkan atau dikirim ke tempat pembuangan akhir (TPA). *Zero waste* juga menghindari penggunaan plastik sekali pakai (Zaenafi Ariani N. D., 2022).

Circular supply chain management adalah pendekatan manajemen rantai pasok yang berfokus pada integrasi prinsip *Circular Economy* dalam seluruh tahap prosesnya, mulai dari desain produk, produksi, distribusi, hingga akhir siklus hidup produk. Sistem ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya, mengurangi limbah, dan memaksimalkan nilai produk melalui strategi seperti daur ulang, penggunaan kembali, remanufaktur, dan inovasi desain yang berkelanjutan. Dalam *Circular supply chain management*, limbah dianggap sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan produk baru atau bahan baku yang bernilai tambah, sehingga menciptakan sistem tertutup yang efisien. Model ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan, tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional dan menciptakan peluang ekonomi baru melalui pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan (Lacy et al., 2020).

Circular Economy bertujuan untuk menggantikan konsep produk “akhir masa pakai” dengan penggunaan energi terbarukan, menghilangkan penggunaan bahan kimia berbahaya, dan mengurangi limbah melalui bahan dan desain produk yang lebih baik. Dalam sistem ini, *Circular Economy* memperpanjang umur produk melalui inovasi desain, pemeliharaan, penggunaan kembali, remanufaktur, daur ulang menjadi produk asli (*recycling*) dan daur ulang menjadi produk lain (*upcycling*) (Zaenafi Ariani N.d., 2022). Dalam kaitannya dengan keberlanjutan produk plastik, sistem *Circular Economy* dapat digunakan untuk berbagai tujuan, Misalnya, daur ulang plastik memaksimalkan konsumsi plastik dengan menggunakannya kembali dalam campuran aspal atau mengubah plastik yang bernilai ekonomi rendah menjadi bahan bakar. *Circular Economy* kini menjadi solusi permasalahan sampah dan beberapa negara sudah mulai menerapkannya. Menurut *World Economic Forum*, ekonomi sirkular merupakan sistem industri yang bertujuan untuk menciptakan produk baru dan memberi nilai tambah pada produk lama melalui pengelolaan limbah terpadu dengan menggunakan bahan yang sudah ada (Yasmin, 2020).

Circular economy (CE) dan *circular supply chain management* (CSCM) adalah konsep yang saling terkait dalam pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan, namun memiliki fokus yang berbeda. *Circular economy* adalah sistem ekonomi holistik yang bertujuan untuk

menggantikan model linear "ambil-gunakan-buang" dengan pendekatan siklus tertutup, di mana limbah dan produk akhir dianggap sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali. CE mencakup berbagai strategi seperti daur ulang, penggunaan kembali, dan inovasi desain untuk memperpanjang umur produk serta mengurangi dampak lingkungan. Sementara itu, *circular supply chain management* adalah implementasi konsep *circular economy* secara spesifik dalam rantai pasok, mencakup seluruh tahap, mulai dari desain produk hingga logistik terbalik untuk mengelola produk akhir dan limbahnya. Persamaan antara keduanya adalah keduanya berupaya mengurangi limbah, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan meningkatkan keberlanjutan melalui inovasi dan efisiensi. Namun, perbedaannya terletak pada lingkupnya CE bersifat makro dan mencakup seluruh sistem ekonomi, sedangkan CSCM bersifat mikro, berfokus pada operasionalisasi prinsip CE dalam aliran material dan produk di dalam rantai pasok (Genovese et al., 2017).

Berdasarkan penelitian Theeraworawit et al. (2022), pendekatan *circular supply chain* dalam pengelolaan sampah bertujuan untuk meminimalkan limbah dan memaksimalkan nilai sumber daya melalui tiga tahap utama. Pertama, integrasi konsep daur ulang dalam manajemen rantai pasok yang mencakup desain ulang produk untuk penggunaan kembali. Kedua, implementasi *reverse logistic* untuk mengelola produk bekas dan limbah. Ketiga, analisis efisiensi proses pengelolaan dengan menggunakan metode bibliometrik untuk mengevaluasi keberhasilan implementasi strategi. Hasilnya menunjukkan peningkatan keberlanjutan operasional dan pengurangan limbah signifikan melalui pendekatan ini.

Sedangkan pada penelitian Danny Ibarra Vega et al. (2024), konsep *circular economy* dalam pengelolaan sampah berfokus pada tiga langkah utama: pertama, menyusun hipotesis dinamis untuk menunjukkan hubungan sebab-akibat dalam sistem pengelolaan sampah (*Causal Loop Diagram*). Kedua, Memetakan modul sistem, yaitu kesehatan, ekonomi, dan ekonomi sirkular, serta menghubungkannya dengan variabel kunci (*Stock and Flow Diagram*). Ketiga, Menganalisis skenario prospektif (*Business as Usual* dan *strategi intervensi*) dengan parameter spesifik dari kota Cartagena, Kolombia (Simulasi Model). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi, evaluasi strategi model dinamis, skenario prospektif dan rekomendasi kebijakan.

Kemudian Pada penelitian Dennis Vegter et al. (2023), melakukan penggunaan model dinamika sistem untuk mengembangkan sistem pengukuran kinerja rantai pasok sirkular. Dengan membuat *Casual Loop Diagram* untuk mengidentifikasi interdependensi antara tujuan

kinerja rantai pasok sirkular (model kualitatif), Simulasi berdasarkan data perusahaan untuk memvalidasi model kualitatif (model kuantitatif) dan dilakukan Validasi dengan dua perusahaan kecil dan menengah (SME) yang sedang bertransisi ke manajemen rantai pasok sirkular. Hasilnya didapat Relevansi *Lifetime* Layanan, Maturitas Sirkularitas, Efek *Rebound*, Memberikan alat evaluasi bagi perusahaan untuk mendukung transisi ke rantai pasok sirkular, Menyediakan metrik kinerja yang relevan, seperti sirkularitas, efisiensi energi, dan dampak lingkungan. Mengintegrasikan interdependensi antara tujuan kinerja dan Memungkinkan identifikasi aksi yang efektif dan mencegah konsekuensi tak diinginkan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Circular Supply Chain Management* (CSCM) untuk mengimplementasikan prinsip 5R Serta *sustainability* CSCM untuk menganalisis dan mengevaluasi pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman menggunakan metode pemodelan sistem dinamis. Dengan menggunakan metode pemodelan simulasi sistem dinamis dan disertai data-data dihasilkan gambaran visual skema sebab akibat (*causal loop diagram*) 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. Sehingga model simulasi tersebut dapat di gunakan sebagai acuan dalam pengambilan keputusan dalam perumusan strategi dalam jangka panjang. Oleh karen itu, adanya alternatif pengelolaan sampah kota Yogyakarta. Analisis yang digunakan adalah dengan membuat model simulasi untuk mendapat gambaran atau fenomena alternatif yang dirancang dapat meningkatkan pelayanan kebersihan. Kemudian dalam mengamati variabel-variabel dalam pengelolaan sampah yang dipengaruhi oleh perubahan jumlah penduduk terhadap waktu dilakukan dengan pendekatan sistem dinamis. Peneliti mencoba melakukan “Perancangan Strategi *Circular Supply Chain Management* Berbasis Sistem Dinamis Pada Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka yang menjadi rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana strategi implementasi *Circular Supply Chain Management* berdasarkan model *Existing* (representasi kondisi aktual dari pengelolaan sampah yang diterapkan di Kabupaten Sleman) ?
2. Skenario apa yang paling efektif dan efisien untuk Pengelolaan sampah berdasarkan *Circular Supply Chain Management* di Kabupaten Sleman, Yogyakarta ?

3. Berdasarkan skenario terpilih, apa saja yang harus dilakukan Pemerintah Kabupaten Sleman untuk meningkatkan pengelolaan sampah berdasarkan prinsip *Circular Supply Chain Management* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk memberikan usulan perbaikan pada sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Sementara secara khusus penelitian bertujuan untuk :

1. Mengetahui strategi pengelolaan sampah dengan prinsip *Circular Supply Chain Management* berdasarkan model *Existing* yang diterapkan di Kabupaten Sleman, Yogyakarta.
2. Mengetahui skenario yang paling efektif dan efisien pada pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta.
3. Mengetahui apa saja yang harus disiapkan Pemerintah Kabupaten Sleman untuk meningkatkan pengelolaan sampah berdasarkan prinsip *Circular Supply Chain Management*.

1.4 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini dapat menghasilkan strategi *circular supply chain management* dengan sistem dinamis yang tepat dan pengembangan sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta, maka perlu dibuat batasan masalah. Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini hanya dilakukan di Kabupaten Sleman, Yogyakarta.
2. Penelitian ini hanya berfokus pada pengelolaan sampah daerah dengan batas waktu 2024 - 2034 yang dilakukan oleh TPST serta TSP3R yang berada di proses pengolahan sampah tengah dan TPA di hilir, tanpa melibatkan proses pengolahan sampah di hulu, seperti bank sampah unit, komposting skala kecil yang dilakukan oleh RT/RW, karena pemrosesan sampah hulu sudah dilakukan *improvement* oleh pemerintah daerah Kabupaten Sleman melalui kebijakan Desentralisasi sehingga penelitian ini hanya berfokus pada pengembangan proses tengah dan hilir guna mengurangi sampah yang masuk di TPA dan *landfill*.
3. Penelitian ini hanya mencakup variabel yang mendukung proses pengolahan data berbasis simulasi sistem dinamis pada pengolahan sampah, serta optimasi menggunakan pendekatan prinsip *circular supply chain management* yang

dijadikan acuan untuk strategi pengembangan sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini sebagai berikut:

1. Memberikan perbaikan dan *improvement* dengan prinsip *Circular Supply Chain Management* berdasarkan model *Existing* yang diterapkan di Kabupaten Sleman, Yogyakarta.
2. Memberikan skenario yang paling efektif dan efisien pada pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta.
3. Memberikan skenario terpilih dan apa saja yang harus disiapkan oleh pemerintah Kabupaten Sleman, Yogyakarta untuk meningkatkan pengelolaan sampah berdasarkan prinsip *Circular Supply Chain Management*.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika penelitian ini dibuat guna membantu penulis dalam penulisan Laporan Tesis serta membantu pembaca agar mudah memahami laporan ini. Berikut merupakan sistematika penelitian dari Laporan Tesis ini:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini berisikan tentang gambaran umum penelitian yang dilakukan yang meliputi latar belakang permasalahan, rumusan permasalahan, batasan permasalahan, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisikan tentang segala informasi yang dijadikan acuan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Informasi tersebut dapat dikutip dari penelitian terdahulu serta teori yang berhubungan.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab metodologi penelitian berisikan objek penelitian, gambaran umum tentang metode yang digunakan pada saat pengumpulan data, serta langkah-langkah dalam pembuatan Laporan Penelitian Tesis.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Pada bab pengumpulan dan pengolahan data berisikan tentang data yang didapatkan dari hasil observasi yang selanjutnya dilakukan pengolahan data sesuai dengan metode yang sudah ditetapkan guna mendapatkan hasil sesuai dengan apa yang diharapkan.

BAB V

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab pembahasan berisikan tentang informasi dari hasil penelitian yang sudah dilakukan pengolahan data sebelumnya. Informasi tersebut disajikan dalam bentuk data, grafik, ataupun analisis yang disesuaikan dengan latar belakang permasalahan, rumusan masalah, serta tujuan penelitian.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini merupakan bab akhir dari laporan Tesis. Bab ini berisikan tentang kesimpulan secara keseluruhan dari laporan tugas akhir, serta saran yang dapat diberikan guna menyempurnakan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bagian daftar pustaka berisikan tentang daftar referensi yang digunakan penulis dalam mendukung penulisan laporan Tesis ini.

LAMPIRAN

Pada bagian lampiran berisikan tentang dokumentasi yang diambil atau yang digunakan pada saat melakukan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Induktif

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya tentang pengelolaan sampah, termasuk (Azevedo et al., 2019), yang membahas pengelolaan sampah kota di negara berkembang dari perspektif manajemen rantai pasokan berkelanjutan. Pengelolaan limbah yang berkelanjutan harus mempertimbangkan dampak ekonomi, lingkungan dan sosial, karena aspek terpenting dan banyak permasalahannya mencakup kurangnya jalur akses dan infrastruktur seperti tempat pembuangan sampah dan kontainer harus dirancang sesuai dengan hal tersebut. Lebih lanjut, studi tentang dukungan keputusan terpadu dan desain sistem pengelolaan sampah (Kuznestsova et al., 2019) menemukan bahwa sistem desentralisasi untuk pengelolaan sampah dapat meminimalkan sampah melalui pengelolaan proses yang lebih dekat, mengurangi jarak pengangkutan, dan lain-lain, dikatakan untuk memastikan kebutuhan kendaraan transportasi sampah.

Dalam penelitian Margallo et al., (2019) strategi pengelolaan sampah melalui analisis siklus hidup dan pengembangan indikator masalah , termasuk adanya tempat pembuangan sampah terbuka yang tidak terkendali (33%) dan tingkat pemulihan fraksi sampah yang rendah (4%, dll.). Selain itu, penerapan teknologi pengelolaan limbah canggih seperti insinerasi dan pencernaan anaerobik masih lambat. Lebih lanjut, Fuldauer et al., (2019) melakukan studi tentang perencanaan pengelolaan sampah untuk pembangunan berkelanjutan dan menemukan bahwa ruang pengolahan sampah terbatas dan infrastruktur belum berkembang serta menunjukkan bahwa hukum tidak diatur dan ditegakkan dengan baik. Terbatasnya peluang daur ulang karena pengangkutan sampah dan skala ekonomi merupakan faktor yang dapat diidentifikasi dalam pengelolaan sampah.

Berdasarkan penelitian Mohammadi dkk.(2019) Hasil yang dicapai dalam studi tentang sistem pengelolaan sampah kota dalam jaringan rantai pasokan terintegrasi menunjukkan seberapa efektif perencanaan rantai pasokan dan mengintegrasikan pembangkitan, pengumpulan, dan komponen sistem pengelolaan sampah. Penelitian ini mengintegrasikan pemisahan, pengangkutan, pengolahan, distribusi, dan pembuangan akhir ke dalam sistem yang terkoordinasi untuk mendapatkan rencana pengelolaan sampah kota yang paling layak dan hemat biaya.

Dalam studi Pujara et al., (2019), pengelolaan sampah bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dan mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan dengan menggunakan enam strategi. (1) pelatihan praktik pengelolaan sampah lingkungan, (2) kebijakan dan inisiatif pemerintah dalam pengelolaan sampah, (3) teknik pengomposan dalam sistem pengelolaan sampah, dan (4) anaerobik untuk produksi energi. Sanitasi tempat Pembuangan Akhir. Selain itu, dalam studinya tentang pengelolaan sampah, oleh Zhou et al.(2019) Mengembangkan model keberlanjutan sistem pengelolaan sampah China menggunakan model baru yaitu *Environment-Energy-Economy-Social* (3E+S) untuk dapat mengevaluasi kinerja lingkungan dan konsumsi energi dari suatu siklus hidup Dari sudut pandang, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pembakaran pada *Fluidized Bed Furnace* merupakan pilihan terbaik. Metode hierarki analitik dan bobot entropi menunjukkan kekokohan hasil yang kuat dan efektivitas perubahan pada model. Pada penelitian tentang penggunaan sumber daya berkelanjutan dan pengelolaan limbah yang dilakukan oleh Nizetic et al.(2019) berfokus pada pembangunan hijau atau ramah lingkungan, penggunaan dan konsumsi energi, pemanfaatan energi surya, efisiensi dan pengolahan limbah, serta kota pintar konsep dan teknologi telah menghasilkan perkembangan yang mengandalkan efisiensi sumber daya cerdas untuk pengelolaan limbah berkelanjutan.

Berikut merupakan 15 kajian literatur sebagai acuan dalam pembuatan penelitian Perancangan Strategi *Circular Supply Chain Management* Berbasis Sistem Dinamis Pada Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta.

Tabel 2.1 Kajian Literatur

No	Nama Peniliti / Tahun	Judul	Metode	Hasil dan pembahasan
1	Haitham A. Mahmoud et al. (2024)	<i>Modeling Circular Supply Chains as an Approach for Waste Management: A Systematic Review and a Conceptual Framework</i>	<i>Multi-Criteria Decision Making Models (MCDMM). Optimization Models. Computational Models. Simulation Models. Artificial Intelligence Models.</i> Kerangka konseptual berbasis <i>Reinforcement</i>	Penelitian menemukan bahwa MCDMM adalah pendekatan yang paling sering digunakan dalam studi CSCM, tetapi membutuhkan pengembangan lebih lanjut untuk mengatasi hambatan implementasi. Usulan model berbasis RL untuk menangani masalah <i>dynamic lot sizing</i> , memungkinkan

			<i>Learning</i> (RL) untuk masalah <i>lot sizing</i> dalam CSCM.	keputusan adaptif dalam rantai pasok sirkular.
2	Danny Ibarra Vega et al. (2024)	<i>The impact of circular economy strategies on municipal waste management: A system dynamics approach</i>	Simulasi model <i>Causal Loop Diagram</i> (CLD) dan <i>Stock and Flow Diagram</i> (SFD)	Memprediksi pengaruh strategi ekonomi sirkular terhadap pemanfaatan sampah, seperti insentif ekonomi, peningkatan kapasitas pemilahan, dan transformasi sampah. Model menunjukkan bahwa investasi dalam pemisahan sampah tanpa peningkatan kapasitas transformasi akan menurunkan efisiensi sistem.
3	Dino Rimantho & Marlina Tamba. (2021)	Usulan Strategi Pengelolaan Sampah Padat di TPA Burangkeng Bekasi dengan Pendekatan SWOT dan AHP	SWOT (<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>) dan AHP (<i>Analytical Hierarchy Process</i>)	Fokus pada sistem pengelolaan limbah terintegrasi untuk mengurangi limbah dan memanfaatkan hasilnya sebagai sumber pendapatan Meningkatkan kapasitas SDM melalui pelatihan serta melibatkan semua pemangku kepentingan dalam pengambilan keputusan.
4	Dean Eka Putri et al. (2023)	Analisis SWOT Keberlanjutan Bank Sampah Kota Padang Untuk Mendukung Penggunaan <i>Alternative Fuel and Raw Material</i> (AFR) pada PT. Semen Padang	SWOT (<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>) dan model simulasi.	Kolaborasi lintas sektor, peningkatan fasilitas, dan pengembangan kapasitas SDM. Kebutuhan Tambahan: Dibutuhkan 68 bank sampah baru untuk memenuhi skenario substitusi 0,03% bahan bakar berbasis sampah. Potensi Sampah: Sampah terpilah (kertas, kardus, plastik) memiliki nilai kalor yang memenuhi standar PT. Semen Padang untuk

				dijadikan bahan bakar alternatif.
5	Jose Arturo Garza-Reyes et al. (2018)	<i>A PDCA-based approach to Environmental Value Stream Mapping (E VSM)</i>	PDCA (<i>Plan-Do-Check-Act</i>) dan E-VSM <i>Environmental (Value Stream Mapping)</i> .	E-VSM berbasis PDCA mampu memberikan kerangka kerja sistematis untuk mengidentifikasi dan mengurangi limbah lingkungan secara efektif. Mengimplementasikan proseduroperasional untuk mengurangi limbah air. Mengadopsi sistem dan bahan yang lebih ramah lingkungan untuk meminimalkan dampak limbah.
6	Theeraworawit et al. (2022)	<i>Sustainable Supply Chain Management in a Circular Economy: A Bibliometric Review</i>	Analisis bibliometrik terhadap 709 dokumen.	Konsep manajemen rantai pasok berkelanjutan. pengelolaan sampah bertujuan untuk meminimalkan limbah dan memaksimalkan nilai sumber daya melalui tiga tahap utama. Pertama, integrasi konsep daur ulang dalam manajemen rantai pasok yang mencakup desain ulang produk untuk penggunaan kembali. Kedua, implementasi <i>reverse logistic</i> untuk mengelola produk bekas dan limbah. Ketiga, analisis efisiensi proses pengelolaan dengan menggunakan metode bibliometrik untuk mengevaluasi keberhasilan implementasi strategi.
7	Margallo et al., (2019)	Strategi pengelolaan sampah melalui	LCA (<i>Life Cycle Analysis</i>)	Hasil penelitian ini menunjukkan adanya tempat pembuangan sampah terbuka yang tidak terkendali (33%) dan tingkat pemulihan

		analisis siklus hidup LCA		fraksi sampah yang rendah (4%, dll.). Selain itu, penerapan teknologi pengelolaan limbah canggih seperti insinerasi dan pencernaan anaerobik masih lambat.
8	Parajuly et al. (2021)	<i>Designing Sustainable Circular Supply Chains</i>	Studi teoritis dan wawancara ahli	Pengelolaan daur ulang produk elektronik sehingga untuk meminimumkan <i>waste</i> .
9	Danis Mandasari (2020)	Pengembangan model pengelolaan sampah perkotaan yang berkelanjutan dengan metodologi sistem dinamik dan LCA kota Surabaya	LCA (<i>Life Cycle Analysis</i>) dan sistem dinamik.	Hasil utama dari penelitian ini adalah pengembangan model pengelolaan sampah perkotaan yang berkelanjutan di Surabaya dengan mengintegrasikan pendekatan Sistem Dinamik dan <i>Life Cycle Assessment</i> (LCA). dua pendekatan tersebut memberikan dampak yang signifikan dibandingkan kondisi eksisting, baik dari aspek pengurangan timbunan sampah, pengolahan sampah menjadi bahan baku atau energi, efisiensi biaya pengelolaan, pengurangan emisi, serta peningkatan penyerapan tenaga kerja.
10	Isti surjandari et al. (2020)	Model dinamis pengelolaan sampah untuk mengurangi beban penumpukan	Model dinamis dan AHP.	Hasil penelitian, baik dengan sistem dinamis maupun skala prioritas AHP serta <i>Benefit-Cost ratio</i> (B/C), maka sebaiknya pengelolaan sampah yang dilakukan oleh pemerintah daerah DKI Jakarta dilakukan secara bertahap, pertama adalah dengan pengomposan. Hal ini didasarkan pada pertimbangan dari

				permasalahan yang ada (pencemaran, penolakan dari masyarakat, dan lain sebagainya), dan pertimbangan dari setiap kriteria dari semua aspek (terutama aspek sosial yang mempunyai preferensi terbesar dibanding dengan aspek yang lain yaitu 53,8%), dan juga berdasarkan kelayakan investasi (B/C rasio sebesar 1,41), serta faktor penurunan tumpukan sampah yang cukup tinggi.
11	Guarnieri et al. (2023)	<i>The Circular Economy and Circular Economic Concepts</i>	Analisis literatur.	Konsep ekonomi sirkular pada rantai pasok limbah. penelitian ini menyoroti kontribusi pengelolaan kemasan terhadap transisi ekonomi sirkular, termasuk penggantian material untuk meningkatkan daur ulang, program pendidikan lingkungan, dan dukungan kepada koperasi pemulung. Hasilnya menggarisbawahi pentingnya kolaborasi antara perusahaan, pemerintah, dan masyarakat untuk mempromosikan pengelolaan limbah yang lebih baik.
12	Erpin Habibah et al. (2020)	Analisis Terhadap Faktor yang Berpengaruh Terhadap Penerapan Kebijakan	Sistem dinamik	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengelolaan sampah Yogyakarta belum cukup baik. Beberapa faktor yang mempengaruhi diantaranya kebijakan pemerintah belum diketahui secara

		Pengelolaan Sampah di Yogyakarta Menggunakan Pemodelan Sistem Dinamis		menyeluruh, budaya peduli sampah dan kesadaran masyarakat masih rendah, serta fasilitas TPA belum memadai.
13	Riri Nasirly & Yeni Komariah. (2023)	<i>The Identification of Waste Supply Chain Structure for Circular Economy: Case Study in Pangkalan Kerinci</i>	<i>Waste Supply Chain, Circular Economy</i>	Merekomendasikan peningkatan jumlah bank sampah dan tempat sampah, serta optimalisasi rute pengangkutan sampah untuk meningkatkan efisiensi. Diperlukan juga partisipasi masyarakat dalam memilah sampah dari sumbernya untuk mengurangi volume sampah yang dikirim ke TPA. Selain itu, penerapan konsep ekonomi sirkular dapat membantu mengurangi dampak lingkungan dari sampah yang tidak terkelola dengan baik.
14	Dennis Vegter et al. (2023)	<i>Performance measurement system for circular supply chain management</i>	CSCM (<i>circular supply chain management</i>), Model dinamik dengan simulasi.	Mengintegrasikan interdependensi antara tujuan kinerja. Memungkinkan identifikasi aksi yang efektif dan mencegah konsekuensi tak diinginkan. Penggunaan produk pemulihan, dan daur ulang hingga produk
15	Kastana Sapanli et al. (2023)	Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Berbasis <i>Circular Economy</i> di Tingkat Desa: Pendekatan	<i>Circular Economy</i> (CE), Sistem Dinamik	Penerapan skenario optimis sebagai kebijakan pengelolaan sampah rumah tangga di Desa Cibanteng berbasis <i>circular economy</i> . Implementasi kebijakan ini memerlukan sinergi antara masyarakat, pemerintah desa, institusi pendidikan,

		Sistem Dinamik		dan sektor swasta untuk mendukung pengelolaan sampah yang berkelanjutan serta mendukung pencapaian target <i>Sustainable Development Goals (SDGs)</i> .
16	Penelitian ini (2024)	Perancangan Strategi <i>Circular Supply Chain Management</i> Berbasis Sistem Dinamik Untuk Pengelolaan Sampah Di Kabupaten Sleman, Yogyakarta	CSCM (<i>circular supply chain management</i>), Model simulasi sistem dinamik dengan <i>Causal Loop Diagram (CLD)</i> dan <i>Stock and Flow Diagram (SFD)</i>	Penelitian ini menghasilkan rancangan model CSCM berbasis prinsip 5R yang disimulasikan menggunakan metode sistem dinamis. Model ini memberikan gambaran alur pengelolaan sampah secara menyeluruh dari hulu ke hilir, mencakup desain produk, logistik terbalik, dan pemanfaatan limbah sebagai sumber daya baru. Model skenario simulasi berupa <i>flow stock diagram</i> yang membantu memprediksi pengurangan limbah melalui penerapan CSCM dan berkontribusi pada solusi dalam implementasi CSCM di kabupaten Sleman.

2.2 Kajian Deduktif

Kajian deduktif digunakan sebagai acuan dari teori-teori dan prinsip yang sesuai dengan permasalahan yang terlibat dalam penelitian:

2.2.1 Konsep Pengelolaan Sampah

Pengertian pengelolaan sampah mencakup berbagai aktivitas manusia yang berkaitan dengan kegiatan pengolahan sampah, yaitu partisipasi dalam program-program, baik perumahan, lembaga, industri, dengan berbagai cara pengumpulan, termasuk pengumpulan sampah dari pintu ke pintu dan selektif dari kawasan komersial, menurut Fores et al., dengan mengoptimalkan aspek ekonomi dan lingkungan serta penerapan berbagai entitas jaringan: tempat sampah kota, pengumpulan tepi jalan, pengiriman mandiri, dan layanan Kontrak atau yang didelegasikan terpenuhi. Menurut

Mohammadi et al., (2019), pengelolaan sampah merupakan aktivitas rantai pasok yang strategis karena mencakup pembangkitan, pengumpulan, pemilahan, pemisahan, pengangkutan, pengolahan, distribusi, dan pembuangan akhir sampah.

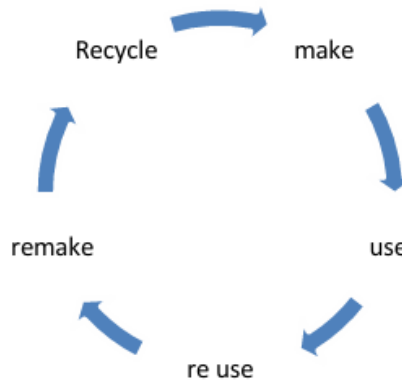
Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah mendefinisikan sampah sebagai sisa kegiatan sehari-hari manusia dan/atau proses alam yang berbentuk padat, sedangkan pengelolaan sampah meliputi pengurangan dan pembuangan sampah merupakan kegiatan yang sistematis, menyeluruh, dan berkelanjutan. Pengelolaan sampah harus menyeluruh, terpadu dari hulu hingga hilir, memberikan manfaat ekonomi, menyehatkan masyarakat dan aman bagi lingkungan, serta mampu mengubah perilaku masyarakat.

2.2.2 Supply Chain

Dari perspektif rantai pasok, dalam pengelolaan sampah kota, rantai pasok dianggap sebagai isu rantai pasok yang strategis, karena rantai pasok mencakup pembangkitan, pengumpulan, pemisahan, distribusi, pengolahan, dan pembuangan sampah. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempertimbangkan keseluruhan rantai pasokan ketika mempertimbangkan sistem pengelolaan sampah, karena penerapan teknik manajemen rantai pasokan yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah kota (Ahmad et al., 2016). Menurut Mohammadi et al. (2019), kemampuan mempertahankan keunggulan sebagai strategi jangka panjang suatu perusahaan sangat bergantung pada kemampuannya untuk menjadi mitra yang terintegrasi penuh dalam konteks rantai pasokan. Strategi rantai pasokan berfokus pada pengintegrasian proses internal dan eksternal organisasi di seluruh rantai untuk meningkatkan kinerja setiap anggota jaringan rantai pasokan sekaligus meningkatkan layanan kepada pelanggan, sehingga organisasi pengelolaan limbah dapat terus mengambil langkah-langkah yang bertujuan untuk mengurangi biaya dan meningkatkan efisiensi. Dengan meminimalkan pemborosan dalam rantai pasokan internal dan eksternal.

2.2.3 Circular Economy

Circular Economy (CE) diidentifikasi sebagai alternatif model dari ekonomi linier (membuat, menggunakan dan membuang). Filosofi CE didasarkan pada kekuatan pendorong yang efektif yang memiliki potensi besar untuk mendukung industri secara berkelanjutan dan ekonomis kinerja (Hobson 2018). CE didefinisikan sebagai sistem regeneratif sebagai itu ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. *Circular Economy* (Catherine Weetman 2016)

Perekonomian sebelumnya menganut sistem linier yang mempunyai satu cara memproduksi barang. Linier tidak mempedulikan ide-ide regeneratif dan paradigma ekonomi ini telah membuat khawatir terkait dengan sumber daya di masa depan. Karena planet bumi mempunyai jumlah sumber daya yang terbatas dan aksesibilitasnya mencakup banyak proses (Zakarya et al 2018).



Gambar 2.2. Model Linear Ekonomi (Jianguo et al 2016)

CE juga dapat didefinisikan sebagai proses yang bersifat restoratif dan menangani segala sesuatunya perekonomian sebagai sumber daya yang berharga. CE juga digambarkan sebagai proses dimana produk melalui perbaikan, dan remanufaktur ulang dapat memperpanjang umur produk dan memaksimalkan masa pakainya serta meningkatkan nilai produk dan material (Carter.M 2019). Ide ini berkembang menjadi kekuatan pendorong yang kuat yaitu keberlanjutan baik dalam praktik maupun penulisan (Hobson et al,2016) dan dapat membantu industri mencapai inovasi dalam keberlanjutan. *Circular Economy* menggambarkan dunia di mana penggunaan material dimaksimalkan ke tingkat nilai tertinggi dan peluang bisnis dari CE berpotensi besar namun memerlukan upaya yang lebih sirkular, solusi layanan produk yang berarti memikirkan kembali model bisnis mulai dari manufaktur, rantai pasokan, logistik terbalik, remanufaktur dan logistik ke pemasaran dan komunikasi (Carter M, 2019). CE merupakan suatu sistem dimana material akan berada dalam keadaan *loop* yang tertutup dan produk dapat menghasilkan nilai lebih dan dapat digunakan untuk lebih banyak

siklus, Kedua adalah remanufaktur yang mengembalikan produk yang sudah habis masa pakainya (Wang dan Kuah, 2018), ketiga adalah berbagi atau kolaborasi untuk memaksimalkan pemanfaatan utilitas. Keempat adalah perpanjangan masa produk dan produk dirancang untuk jangka waktu yang lebih lama (Tse et al 2015).

Istilah CE mengacu pada konsep lain seperti *Space Economy* (Boulding 1996), *Limits to Growth* (Meadows et al 1972), *Steady State Economy* (Daly 2005), *Performance economy* (Stahel, 2010). Definisi lain dari *Circular Economy* telah ditemukan dalam literatur yang sifatnya adalah sebagai berikut:

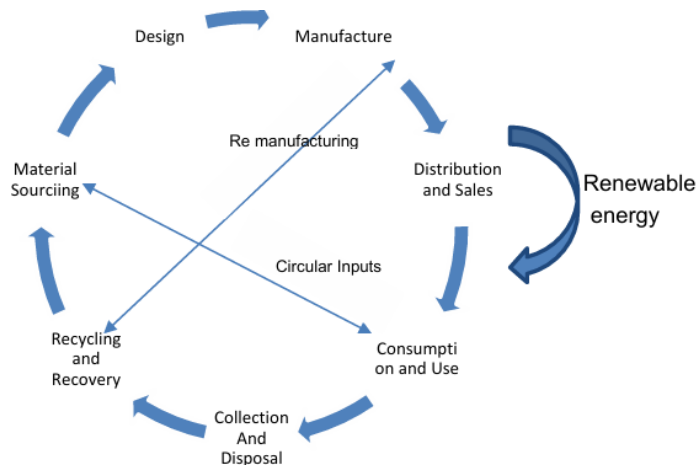
1. Aliran material dalam perekonomian industri harus bersifat sirkular dengan tingkat tinggi tanpa memasuki biosfer (EMF, 2012).
2. Perekonomian industri bergantung pada energi terbarukan, melalui desain sirkular menghilangkan bahan kimia beracun dan membuang limbah. (EMF,2013).
3. Mekanisme penciptaan nilai yang berbeda yang dapat membantu industri untuk tumbuh (EMF 2015 a, EMF 2015 b).
4. Penggunaan kembali produk dan material dalam kondisi ekonomi yang meminimalkan nilai *destruction* dan memaksimalkan *value* (Bastien et al).

Perlu dicatat bahwa daftar definisi CE di atas tidak lengkap dan mungkin sudah ada literatur yang belum diulas Prinsip yang paling umum adalah optimalisasi stok yang Memaksimalkan sumber daya, diketahui bahwa sumber daya terbatas dan dari sekian banyak konsep dapat didirikan :

1. “*Space Economy*”, yang menyarankan penggantian *supply chain* linier konvensional ke sistem perputaran atau sirkular. (Bulding 1996).
2. “*Steady State Economy*”
3. “*Limits to Growth*” adalah pertumbuhan ekonomi dan populasi yang eksponensial dengan pasokan sumber daya yang terbatas.
4. Konsep yang didalamnya terdapat *loop* tertutup dan pendekatan yang bersifat buaian ke buaian (Stahel dan Reday-Mulvey 1981).

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan dalam CE adalah Eco-efisiensi. Pendekatan ini membantu mengurangi limbah dan pada saat yang sama juga meningkatkan limbah produktivitas (EMF 2012). Ada konsep lain yaitu *eco Effectiveness* (EMF,2012). yang mengubah aliran produk dan material. Tujuan dari pendekatan ini (EMF 2012) adalah menjadi lebih dari buaian ke buaian daripada

memperlambat dari buaian/tempat awal ke kuburan proses/tempat akhir. Pendekatan sirkularitas berbeda-beda di antara pendekatan-pendekatan yang kembali ke pendekatan *original manufacture*. (WEF 2016) menyarankan siklus lengkap pada tingkat CE.



Gambar 2.3. Aliran Sumber Daya melalui *Value Chain*. (Yulia et al 2018)

Pada Gambar 2.3, terdapat *Value Chain* yang didorong oleh energi terbarukan dan aliran material lingkaran tertutup dan dalam *loop* tertutup, pembagian antara penggunaan dan sumber material. Hal ini dimungkinkan karena produk yang digunakan dan dikonsumsi mempunyai nilai tambah pada material suatu saat nanti. Pembagian lainnya adalah antara daur ulang dan manufaktur yang memungkinkan untuk dilakukan kembali diproduksi atau diperbaharui untuk digunakan kembali.

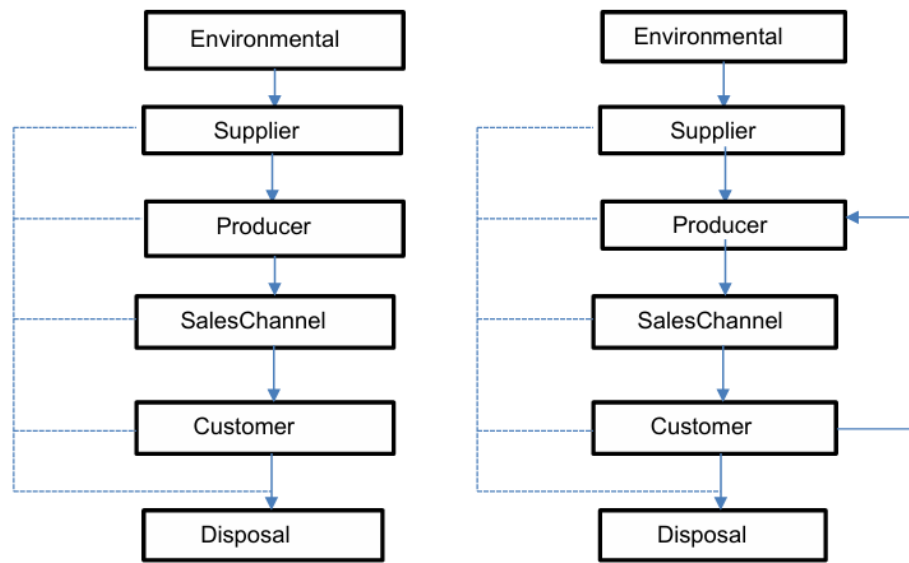
2.2.4 Circular Supply Chain Management

Sumber daya planet bumi ini terbatas sehingga dikenalkan istilah manajemen rantai pasokan sirkular (CSCM) menjadi semakin penting di era ini, begitu pula dengan degradasi lingkungan sebuah faktor yang menggeser perekonomian dan rantai nilai ke arah yang berkelanjutan dan sirkular praktik. Minat untuk menyelidiki rantai pasokan sirkular semakin meningkat di beberapa dekade terakhir (Agarwal et al 2015). Rantai pasokan didefinisikan sebagai proses yang mencakup pengadaan bahan mentah, kemudian pembuatan dan perakitan, lalu pengiriman hasil akhir produk kepada pelanggan (Beamon, 1999). Sarkis (1999) percaya bahwa pasokan tradisional rantai didasarkan pada aliran material yang linier dan gagal memasukkan aspek lingkungan dan manajemen siklus hidup produk. Melalui manajemen rantai pasokan yang berkelanjutan, hal ini dapat terwujud meminimalkan aliran material dalam produksi dan dapat mengurangi limbah melalui pasokan rantai (Sarkis dkk 2011). Dalam SCM ada

sejumlah konsep seperti *Green Supply Chain* (GSM), *Sustainable Supply Chain* (SSC), *Environmental Supply Chain* (ESC) dan *Closed loop Supply Chain* (CSC) telah digunakan (Gurtu dkk 2015). Sementara “*Circular Supply Chain*” dapat digunakan untuk menghubungkan CE dengan SCM (Canning,2006).

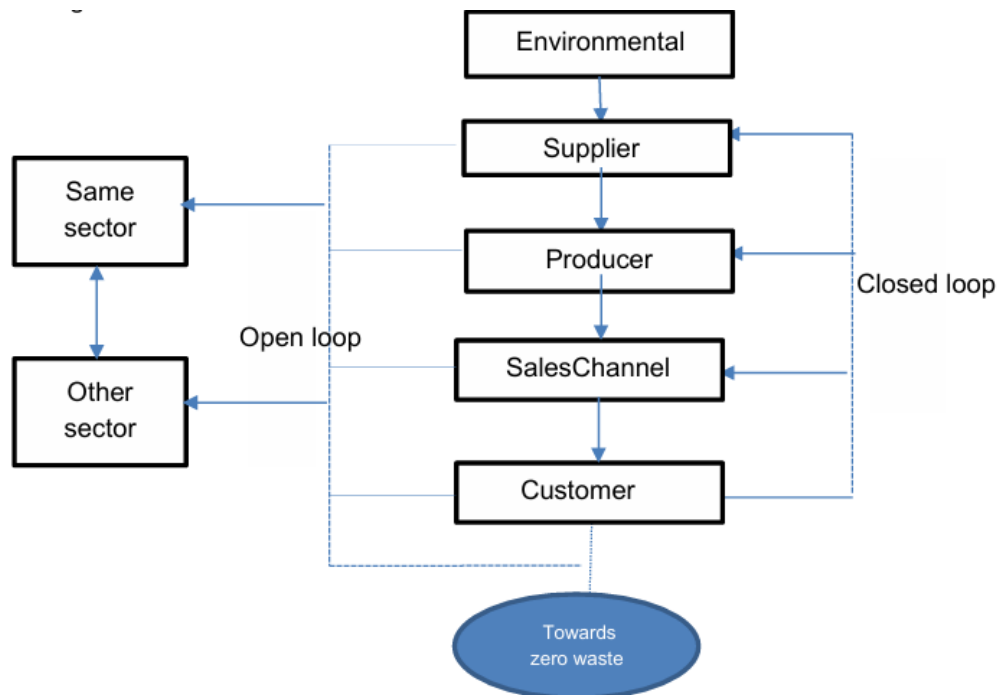
Menurut gagasan Elkington (2004) tentang *triple bottom line* (TBL) yang mengatakan bahwa kemampuan keberlanjutan organisasi tergantung pada lingkungan alam, masyarakat dan kinerja ekonomi (Carter dan Dale, 2008). Berdasarkan ketiga komponen terminologi tersebut adalah berbeda dan dapat muncul dari literatur misalnya *Green Supply Chain* (GSM), *Sustainable Supply Chain* (SSC), *Environmental Supply Chain* (ESC) dan *Closed loop Supply Chain* (CSC) (Souza 2013). CSCM dapat diaplikasikan untuk manufaktur serta produk jasa dengan pendekatan ekonomi sirkular. Sekarang dibandingkan dengan rantai pasok sirkular, rantai pasok linier dan tertutup dapat diilustrasikan pada Gambar 2.4.

Dalam rantai pasokan linier, bahan mentah diambil dari lingkungan dan *End of Life* (EOL) bahan limbah dibuang ke tempat pembuangan sampah seperti yang ditunjukkan pada gambar Gambar 2.4. Meskipun *Closed loop Supply Chain* meningkatkan kinerja lingkungan mendaur ulang bahan dan kemasan yang berguna ke produsen (Guide Van Wassenhore, 2006). Namun, *loop* tertutup memiliki keterbatasan, jika menyangkut pemulihan ada batasan pada rantai pasokan asli dan tidak ada rantai pasokan sekunder terlibat (Toffel, 2004). Tapi tetap saja lingkaran tertutup dapat mendaur ulang sejumlah besar manfaat material dalam rantai pasokan yang sama (Weetman 2017).



Gambar 2.4. *Linear and closed Supply Chain* (Farooque et al)

Rantai pasokan sirkular melangkah lebih jauh dan memulihkan limbah dengan melibatkan atau bekerja sama dengan organisasi lain di sektor yang sama atau sektor yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. *Circular Supply Chain* (Farooque et al)

CSCM merupakan konsep yang berlandaskan *no waste* atau *zero waste* karena dapat memulihkan ke sektor industri yang sama atau limbahnya dapat dimanfaatkan ke sektor lain juga.(Farooque dkk 2017).Kedua jenis sumber daya tersebut adalah sebagai berikut

1) *Primary Resource Flow*

Aliran linear tradisional dari sumber daya, di mana bahan baku diekstraksi, digunakan untuk produksi, didistribusikan, dikonsumsi, dan akhirnya dibuang. Model ini sering disebut sebagai model ekonomi linier dengan pendekatan *take-make-dispose*.

2) *Circular Resource Flow*

Aliran yang berfokus pada pengelolaan ulang sumber daya agar tetap berada dalam siklus ekonomi, mengurangi kebutuhan untuk ekstraksi sumber daya baru, dan meminimalkan limbah.

Sumber daya yang mengalirkan barang dalam rantai pasokan linier dan *loop* tertutup diketahui sebagai aliran sumber daya primer seperti terlihat pada Gambar 2.5. Sedangkan aliran yang bagus adalah material atau energi yang dapat didaur ulang, ditahan, digunakan kembali dikenal dengan aliran sumber daya melingkar. Melalui inovasi sistem yang luas, CSCM berupaya untuk menghasilkan nol limbah. Misalnya, produk tekstil atau daur ulang botol PET dapat digunakan dalam industri konstruksi (Nasir et al 2017) sedangkan sisa makanan dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi (Genovese et al 2017).

Ide CSCM muncul pada awal tahun 1970 dengan memperhatikan faktor lingkungan dalam rantai pasokan. Universitas Michigan (Asosiasi Riset Manufaktur) melihat konsep CSCM pada tahun 1996. CSCM bertujuan untuk refleksi penuh terhadap lingkungan hidup degradasi dan pemanfaatan sumber daya. Ini membantu meminimalkan dampak rantai pasokan pengelolaan industri manufaktur dan pemanfaatan sumber daya. Hal Ini memperkenalkan desain rantai pasokan baru dari perspektif keberlanjutan. Desainnya dibuat untuk keseluruhan rantai pasokan mulai dari pembelian bahan mentah, proses manufaktur, konsumsi pengguna akhir untuk mendaur ulang sampah. Kerjasama yang erat antara dalam industri dan antar industri untuk pengelolaan lingkungan di seluruh rantai pasokan untuk mencapai optimasi lingkungan yang lebih baik. Perbandingan antara manusia *Circular Supply Chain Management* dan linear dapat dibuat sebagai berikut:.

1. Manajemen rantai pasokan melingkar mempertimbangkan tiga masalah i) rantai pasokan masalah pengelolaan ii) Masalah lingkungan iii) masalah optimalisasi sumber daya sementara rantai pasokan linier atau tradisional tidak peduli dengan lingkungan perlindungan.

2. CSCM fokus pada kegiatan ekonomi dan perlindungan lingkungan serta optimalisasi sumber daya sementara rantai pasokan tradisional sebagian besar fokus pada benefit ekonomi.
3. Transmisi informasi yang terlibat dalam rantai pasokan linier sangat umum terjadi dan hadir sementara CSCM meningkatkan informasi mengenai dampak lingkungan, perlindungan sumber daya dan aliran energi manajemen rantai pasokan
4. Fungsi rantai pasok adalah Kualitas Waktu, Biaya, Pelayanan sementara fungsi CSCM adalah Waktu, Kualitas, Pelayanan, Lingkungan dan Sumber Daya.

2.2.5 Integrasi CE ke dalam CSCM

Setiap fungsi manajemen rantai pasokan harus diintegrasikan ke dalam CE sehingga terjadi transisi ekonomi linier ke dalam CE dapat terwujud. Hal ini memerlukan perubahan model bisnis dan praktik yang berkaitan dengan desain produk hingga konsumsi dan penggunaan kembali (Hobson et al 2017). Dimulai dari desain melingkar atau *Green* desain dan kemudian praktik berbeda di dalam setiap fungsi manajemen rantai pasokan seperti pengadaan dan produksi ramah lingkungan, konsumsi dan digunakan kembali atau didaur ulang harus diadopsi. Konsumsi dan daur ulang adalah bagian paling penting dan kritis dari *Value Chain* dan CE (Masi et al 2012).

1. Desain Model Bisnis atau produk

Desain produk dan model bisnis adalah bagian terpenting dari segi material dan konsumsi energi sehingga oleh karena itu desain produk/jasa mempunyai pengaruh yang besar pada rantai pasokan (De los Rios dan Charnley 2017). Desainer harus melihat ke arah yang aspek yang berbeda seperti pengemasan berkelanjutan, pelabelan produk dan harus melihat perbedaan ke aspek sosial, ekonomi dan lingkungan hidup. Pendekatannya harus sesuai dengan keadaan model bisnis yang sirkular dan cocok dengan semua kriteria yang mengarah pada transisi CE (Andrews, 2015). Terdapat banyak literatur mengenai strategi perancangan bisnis sirkular model dan praktik desain produk yang berbeda sesuai dengan praktik model bisnis yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 *Product or Service Circular Design*

No	Produk atau Layanan Praktik Desain	Praktik sesuai dengan Model Ekonomi Sirkular
----	---------------------------------------	---

1	Desain untuk Digunakan Kembali.	Desain untuk digunakan kembali adalah praktik di mana produknya adalah bahan yang mempunyai umur panjang dan dapat bertahan lama digunakan kembali untuk tahapan utama produksi. Dengan menggunakan bahan daur ulang, hal ini dapat memperlambat sumber aliran. (Moreno dkk 2016).
2	Desain untuk Perbaikan dan Pemeliharaan.	Hal ini mengacu pada penggunaan produk dalam jangka waktu lama selama fase penggunaan (van den dan Bakker,2015). Untuk mempertahankan fungsionalitas dan memulihkan produk ke kondisi yang baik setelah kerusakan produk dalam proses servis, diperlukan pemeliharaan dan perbaikan.
3	Desain untuk Didistribusikan Ulang atau Digunakan Kembali.	Mengacu terhadap barang yang dibuang dapat digunakan kembali atau didistribusikan ke segmen yang sama atau segmen lain sehingga umur barang tersebut melampaui siklus hidup pertama. (Potting dkk 2017).
4	Desain untuk Pembaruan.	Berkaitan dengan praktik pengurangan remanufaktur tetapi lebih dari sekedar perbaikan. Tetapi kualitasnya lebih berharga dibandingkan dengan praktik perbaikan (Sihvonen dan Ritola, 2015).
5	Desain untuk Pembuatan Ulang.	Memulihkan kualitas produk menjadi seperti baru. Hal ini dapat memulihkan aktivitas yang mempengaruhi strategi arus balik (Bakker dkk 2014).
6	Desain untuk Pembongkaran.	Disebut sebagai produk dan bagiannya dapat dirakit dan dipisah dengan cepat yang mudah digunakan untuk siklus berbeda dalam ekonomi sirkular (Bocken dkk 2016).
7	Desain untuk Daur Ulang.	Memungkinkan daur ulang material dan merupakan operasi pemulihan dimana material limbah diolah kembali menjadi tujuan awal material atau tujuan lain. (Bocken dkk 2016).

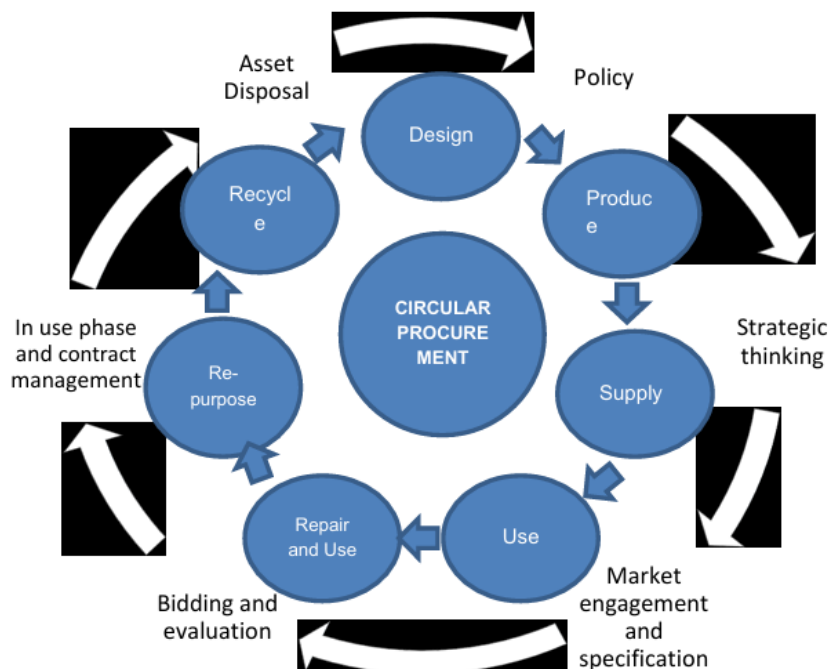
Petunjuk Kerangka Kerja Limbah Eropa (EC,2009) adalah salah satu prinsip panduan yang bisa membantu merancang seluruh proses sirkular. Desain untuk produk berbentuk sirkular merupakan hal yang penting untuk CE karena seluruh proses didasarkan pada desain sirkular dan oleh karena itu memiliki peran sangat penting dalam CE.

2. Pengadaan dan CE

Menurut (Meehan dan Bryde, 2011), CE akan mendefinisikan kembali harga, kualitas, waktu dan nilai uang dalam prinsip fungsi pengadaan. Umumnya CE membutuhkan bahan

baku yang bersifat restoratif atau regeneratif secara biologis dan berdampak positif terhadap lingkungan (Genovese dkk 2014). Ada tiga jenis model untuk mengimplementasikan pengadaan sirkular:

1. Tingkat sistem: Organisasi pembelian dapat membuat kontrak berdasarkan dari sirkularitas. Misalnya perjanjian *take back* atau sistem pelayanan produk.
2. Tingkat Pemasok: Tergantung pada pemasok seberapa besar sistem dan Proses mereka bersifat melingkar untuk memastikan produk dan layanan yang mereka tawarkan terpenuhi dengan pengadaan melingkar.
3. Tingkat Produk: Berfokus pada produk yang mungkin dimiliki oleh pemasok ke otoritas publik perlu melakukan pengadaan rantai pasokan yang lebih mendalam.



Gambar 2.6. Pengadaan Sirkular

Kerangka pengadaan publik berdasarkan CE mencakup teknis dan non-teknis pengadaan produk/jasa memberikan pedoman pengurangan bahan baku menggunakan dan meningkatkan optimalisasi sumber daya melalui pemulihan dan pengurangan limbah. (Witjes dan Lozano 2016).

3. Produksi dan CE

Bagi industri manufaktur, penting untuk mengurangi konsumsi sumber daya di dalam proses produksi untuk mempertahankan persaingan dan bertahan di era berkelanjutan saat ini.

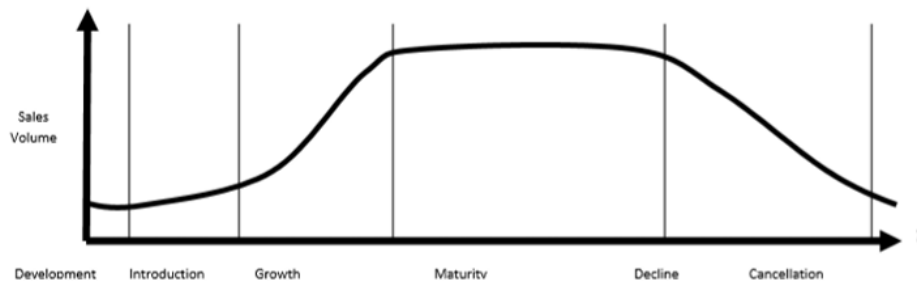
(Ridaura dkk 2018). Praktik manufaktur berkelanjutan dan CE sudah mulai diadopsi oleh industri manufaktur untuk mengurangi risiko lingkungan. (Moktadir dkk 2018). Dengan mengadopsi praktik produksi berkelanjutan, hal ini tidak hanya dapat mengurangi biaya, namun juga meningkatkan citra merek dan minat investor (Dubey et al 2015).

Banyak metode dan strategi telah dikembangkan dalam industri manufaktur untuk meningkatkan efisiensi material (Shabazi et al 2016). Manufaktur ramah lingkungan dan *Cleaner* Manufaktur adalah dua istilah yang sering digunakan dalam konteks efisiensi material, namun *Cleaner* Manufaktur tidak hanya mencakup produksi yang bersih tetapi juga kegiatan jasa yang bersih. Metode untuk menghasilkan produk yang bersih, ramah lingkungan, menghemat energi, dan mengurangi limbah dan juga bermanfaat untuk ekonomi yang dikenal sebagai *Cleaner Production* (Cui dan Song 2009). Di dalam *Cleaner Production*, penting juga untuk menghentikan penggunaan bahan-bahan yang tidak dapat diperbarui dan berbahaya. *Cleaner Production* bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan pada saat yang sama mengurangi kerusakan dan risiko lingkungan (Brown dan Stone, 2007). Mengintegrasikan CE ke dalam keberlanjutan produksi yang mampu mencapai penghematan energi yang besar dan mengurangi jejak karbon (Li dan Ma 2015). Produksi yang berkelanjutan dan sirkular dapat memungkinkan praktik CE untuk hal lain dalam fungsi rantai pasokan.

4. Logistik and CE

Undang-undang pemerintah telah mendorong organisasi untuk mendesain ulang jaringan logistik memastikan ramah lingkungan dan hemat biaya (Frato Neto dkk). Mempertimbangkan faktor lingkungan dan sosial Logistik ramah lingkungan diidentifikasi menghasilkan dan mendistribusikan barang dengan cara yang ramah lingkungan. Strategi distribusi harus dibuat sesuai dengan tindakan dampak lingkungan. Logistik tradisional berdasarkan distribusi maju (*Forward Logistic*) yaitu transportasi, gudang dan manajemen inventaris dari pemasok ke pelanggan, sedangkan logistik terbalik (*Reverse Logistic*) dikenal dengan logistik berkelanjutan. Sejauh ini logistik terbalik sebagian besar telah berintegrasi ke CE. Definisi logistik terbalik diberikan oleh Rogers dan Tibben (1998) “ proses merancang, melaksanakan dan mengelola aliran efektif bahan dari tempat pemanfaatan sampai ke tempat asal untuk tujuan penangkapan kembali nilai atau *dumping* yang tepat. Remanufaktur dan perbaikan ulang dapat dimasukkan dalam logistik terbalik. Menurut Rogers dan Timbekken logistik terbalik juga mencakup restok, kelebihan persediaan, kerusakan produk untuk digunakan kembali. Marco Serrato memberikan jawaban hubungan siklus hidup produk dan

tingkat pengembalian dengan logistik terbalik. Enam fase produk siklus hidup yang diberikan Tibben -Lembke (2002) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7:



Gambar 2.7. Siklus Hidup Produk

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, tahap pertama adalah tahap pengembangan di mana tidak ada pengembalian karena ada sedikit perubahan pada produk. Tahap kedua adalah pengenalan di mana Perusahaan mulai membuat rencana dengan produk yang akan dikembalikan pada tahap ini. Karena di fase ini produk baru dengan sedikit modifikasi dapat menggantikan produk yang sudah ada dan permintaannya diperkirakan akan sangat mirip dengan model sebelumnya. Pada tahap ketiga Fase pertumbuhan berarti produk diterima di pasar dan penjualan meningkat dan di sisi yang sama keuntungannya juga meningkat. Tahap keempat adalah kedewasaan, dalam tahap ini penjualan produk mencapai kematangan sehingga pengembalian produk memenuhi stabilitas. Volume pengembalian tergantung pada volume penjualan pada periode yang sama. Tahap selanjutnya adalah fase penurunan di mana logistik terbalik berfungsi hingga akhir fase ini. Dalam hal ini fase penjualan dan harga mulai menurun. Tahap terakhir adalah pembatalan tarif *return* akan terus menurun dan pada titik tertentu berhenti. Pengecer juga dapat mengirim dan mengembalikan produk yang tidak terjual.

CE mempunyai banyak pengaruh dalam manajemen logistik dan sejauh ini, *reverse logistic* mempunyai pengaruh yang besar dan telah diobservasi bahwa yang paling relevan berintegrasi dalam CE. Pentingnya *market* sekunder mengambil nilai dari produk dan membantu mendorong penggunaan kembali produk kaitannya dengan logistik terbalik (Dhakal dkk 2016).

5. Konsumsi dan CE

Filosofi ekonomi sirkular telah mengusulkan model yang lebih berkelanjutan yang bermanfaat bagi masyarakat dengan sumber daya digunakan kembali dan pengurangan limbah (EMF 2013). Dalam konteks CE, konsumsi adalah suatu bidang yang diminati dan itu tergantung pada konsumen. Menurut penelitian elektronik program pengumpulan sampah di

ponsel yang dilakukan oleh Canning (2006) menyarankan agar pelanggan mulai menerima ponsel rekondisi dan harus bekerja sama untuk mendapatkannya kembali, mengubah ponsel yang tidak diinginkan menjadi ponsel baru. Van Weelden et al menganalisis bahwa sebagian besar konsumen menolak produk rekondisi karena kurangnya kesadaran. Transisi menuju CE memerlukan perubahan dalam perspektif dan perilaku konsumen dan hal ini dapat dicapai dengan cara yang efektif kampanye kesadaran dan pendidikan berkelanjutan.

6. EOL, Pengelolaan Sampah dan CE

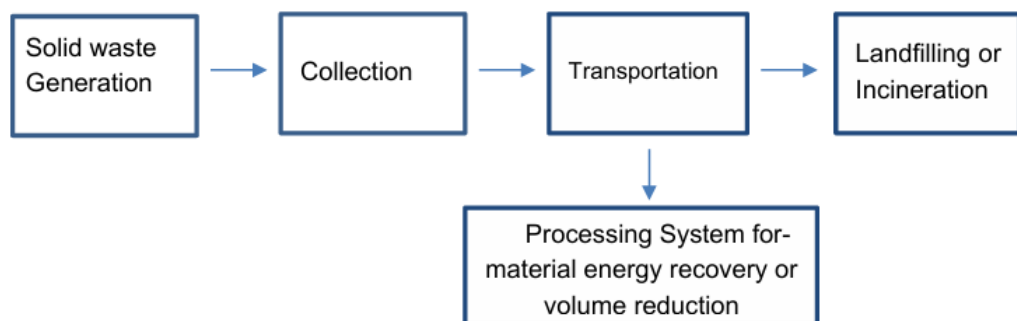
Akhir Masa Pakai/*End of Life* (EOL) dan pengelolaan limbah dalam konteks CE sangat penting untuk memulihkan nilai dan meningkatkan penggunaan sumber daya. Dengan meningkatnya timbulan sampah di bawah manajemen yang tidak efisien dapat menyebabkan tantangan besar dalam pembangunan dan negara-negara non-berkembang. Timbulan dan jenis sampah tertera pada Tabel 2.3 :

Tabel 2.3 Jenis dan Timbulan Sampah (*Adapted from What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management* 2012)

Sumber	Jenis penghasil sampah	Limbah padat
Perumahan	Masyarakat Umum dan Keluarga.	Limbah makanan, Kertas, kaca, polimer, barang elektronik, sampah rumah tangga.
Industri	Pabrik manufaktur, pabrik kimia, pembangkit listrik, dll.	Limbah kemasan.
Komersial	Hotel, restoran, pasar, perkantoran.	Kertas, bahan konstruksi dan pembongkaran, sisa makanan, kaca, logam, plastik, limbah elektronik.
Kelembagaan	Sekolah, Universitas, Bandara dll.	Kertas, plastik, sisa makanan, kaca, logam, limbah elektronik.
Konstruksi dan pembongkaran	Lokasi konstruksi baru, pembongkaran bangunan baru.	Baja, beton, batu bata, ubin.
Layanan kota	Pembersihan jalan, taman, pantai, pengolahan air limbah.	Sampah umum dari taman, pantai.

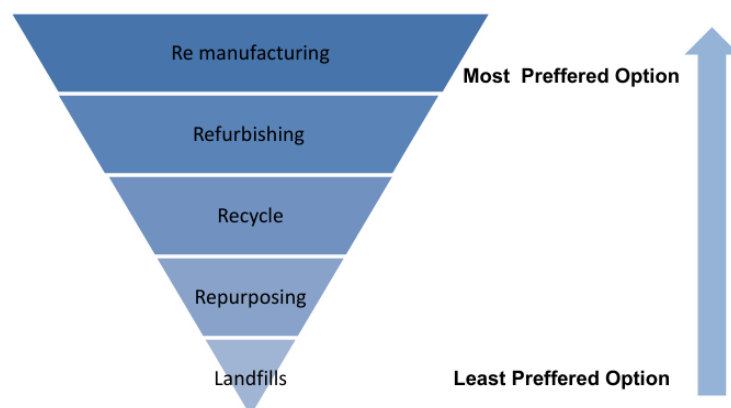
Proses	Pabrik kimia, Kilang, Ekstraksi mineral dan proses.	Limbah proses industri, skrap, terak, dll.
Limbah medis	Rumah sakit, panti jompo, klinik.	Darah, Sampah medis.
Pertanian	Tanaman, ladang, peternakan, dll.	Limbah pertanian, Limbah berbahaya (Pestisida).

SWM merupakan suatu sistem yang terdiri atas proses-proses mulai dari pengumpulan hingga pemulihan kembali untuk *land filling* seperti terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Pengelolaan Sampah Secara Umum (A.V Shekdar)

Hierarki pengelolaan sampah merupakan sebuah pendekatan untuk mengambil keuntungan penuh dari hulu hierarki pengelolaan limbah dan juga dikenal sebagai metode pemulihan sumber daya EOL. Metode ini termasuk penggunaan kembali, perbaikan, produksi ulang, dan daur ulang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Hirarki Pengelolaan Sampah

Remanufaktur: Meningkatkan sisa nilai produk bekas dengan melakukan transformasi ke dalam kondisi baru. (Debo et al, 2015). Proses ini lebih disukai daripada proses EoL lainnya karena bagian remanufaktur lebih ramah lingkungan, kualitasnya tinggi dan memiliki siklus hidup yang panjang (King et al, 2016).

Perbaikan: Proses mengembalikan produk bekas ke kondisi fungsional tanpa membongkar produk seluruhnya (Rathore et al, 2011). Hal ini dapat berguna untuk memulihkan nilai dari produk bekas menjadi produk yang bisa dipakai. Proses perbaikan memungkinkan konservasi yang mudah, pengambilan produk setelah siklus EOL. (vaan Weelden dkk 2016).

Penggunaan Kembali: Mengidentifikasi penggunaan baru untuk suatu produk yang dapat diperluas hingga digunakan oleh produk tersebut bentuk aslinya (Long et al 2016). Dalam konteks CE, penelitian ini menemukan bahwa 9 persen EoL *notebook* dapat digunakan kembali sebagai komputer tipis tanpa mengeluarkan biaya apa pun (Coughlan dkk 2018).

Daur Ulang: Dapat membantu mengurangi jumlah limbah dan pengembalian material ekonomi. Dalam industri baja, limbah merupakan sumber berharga untuk pembuatan baja dapat diperoleh kembali dari produk (Broadbent, 2016). Berbagai strategi telah diterapkan secara berbeda industri untuk didaur ulang. Daur ulang ban dan produk pertanian serta sampah plastik lainnya daur ulang adalah contoh dimana teknik pirolisis telah berhasil digunakan. Di dalam industri konstruksi menggunakan indikator kinerja dan melakukan metode terbaik untuk itu manajemen EoL (Navarro 2016). Bagi pasca pengguna kemasan plastik mempunyai potensi yang sangat besar untuk berkontribusi terhadap sirkularitas.

2.2.6 Teknologi dan kompetensi di CSCM

Dalam *Supply Chain Management* (SCM) teknologi dapat membantu dalam transformasi dari manajemen rantai pasokan linier hingga manajemen sirkular. Penting untuk diketahui tren dan pemahaman teknologi dan persaingan sirkular baru yang sama kompetensi adalah salah satu keterampilan yang paling dibutuhkan bagi wirausahawan dan manajer di dunia usaha sektor komersial dan publik (Carter et al., 2009; Isenberg dan Coates, 2015; *Council of Professionals Supply Chain Management*, 2018; Lengacher (2018) secara efektif dan secara efisien melakukan tugas-tugas SCM seperti perkiraan kebutuhan, analisis kapasitas, logistik dan perencanaan transportasi, pembelian dan manajemen pemasok, koordinasi, dan berkelanjutan dan rantai pasokan yang bertanggung jawab.

1. Teknologi

Karena teknologi baru dapat membantu transisi menuju CSCM, maka pemahaman dan mengetahui teknologi sangat penting dalam CSCM. Revolusi Industri keempat teknologi tersebut sebagai Industri 4.0 yang dimungkinkan oleh teknologi pintar seperti *Internet of Thing* IoT, *augmented reality*, *Big data*, *cloud computing*, simulasi, otomasi industri Teknologi 3D dan *cyber security* (Nascimento dkk, 2018). Baru-baru ini *Waste Electrical Equipment* (WEEE) telah menjadi masalah lingkungan yang parah karena pesatnya teknologi, perubahan teknologi dan budaya membuang di sebagian besar masyarakat. Untuk kota cerdas dan kota berkelanjutan tanpa limbah, kerangka kerja pengelolaan limbah berbasis IoT (WEEE). membantu menghubungkan pengelolaan limbah dengan keseluruhan siklus hidup produk. (Esmaeilian dkk 2018). Ide yang disarankan ini didasarkan pada empat strategi seperti pencegahan limbah, pemisahan sampah hulu, pengumpulan sampah tepat waktu. Menurut Alvarez dkk (2017) masuknya robot kooperatif ke dalam jalur daur ulang dapat membantu meningkatkan pemulihan komponen dan material yang berharga. Termasuk metode/teknik desain produk baruing *Design for Dismantling* (DFD) telah berkembang di banyak sektor usaha. DFD menawarkan nilai ke produk pada tahap EoL tetapi juga selama tahap konsumsi dan pemeliharaan (Sabaghi dkk, 2016).

Pencetakan 3D (pembuatan objek tiga dimensi dari desain digital melalui penambahan lapisan material secara berurutan) memiliki kemungkinan penerapan di CE tetapi pengetahuan mengenai hal tersebut masih kurang, ruang lingkup pencetakan 3D yang mengubah keberlanjutan. Ada kasus 3D yang patut diperhatikan aplikasi pencetakan dalam perspektif CE, Zhong dan Pearce (2018) mengumpulkan plastik dari limbah elektronik menjadi filamen pencetakan 3D dan menghasilkan produk konsumen yang bermanfaat seperti kamera, tripod, dll. Dengan bantuan literatur di atas, saya mencoba mencari tahu teknologi baru persyaratan kompetensi teknologi di setiap fungsi manajemen rantai pasokan sirkular di Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Teknologi Terkini yang Digunakan dalam Rantai Pasokan

Fungsi Manajemen Rantai Pasokan	Teknologi Terkini yang Digunakan dalam Rantai Pasokan
Pengadaan	1) Teknologi berbasis cloud dan IoT. 2) <i>Big Data Analytics</i> 3) Teknologi <i>Block Chain</i>
Produksi	1) Teknologi <i>Clean Production</i> 2) pencetakan 3D

	3) Otomasi industri 4) ERP
Logistik dan Transportasi	1) RFID 2) Robotika dan otomasi 3) Kecerdasan Buatan 4) Sistem manajemen transportasi 5) Teknologi <i>Block Chain</i>
Pengelolaan limbah EoL	1) IOT 2) Otomasi Industri 3) Desain untuk Pembongkaran

Meskipun setiap teknologi memiliki spesialis di setiap organisasi tetapi sebagai *supply chain specialist*, pengetahuan tentang teknologi ini sangat penting.

1. Kompetensi Desain Model Bisnis atau Pembuat Kebijakan CSCM

CSCM memerlukan pemikiran ulang yang menyeluruh dalam keseluruhan proses manajemen rantai pasokan, seluruh proses membutuhkan kompetensi dalam merancang produk, proses dan rantai pasokan (Bakkar dkk 2014). Menurut den Hollander et al (2017) menjelaskan tentang hierarki sampah yang merupakan salah satu prinsip panduan desain ramah lingkungan yang memberikan rincian pengelolaan sampah. Ada beberapa kompetensi dalam bidang sastra terkait, namun lima kompetensi generik berkelanjutan utama bagi pembuat kebijakan dan depenandatangan untuk rantai pasokan melingkar. Terdapat (1) pemikiran sistem, (2) antisipatif (3) normatif (4) kompetensi strategis dan interpersonal seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.5 :

Tabel 2.5 Kompetensi Umum

Kompetensi Generik	Desain untuk <i>Circular Economy</i>	Konsep dan Metode
Kompetensi berpikir sistem	<i>System thinking</i> dan <i>holistic thinking</i> .	Konsep : • Restoratif dan regeneratif berdasarkan desain • Pemikiran sirkularitas Metode :

		• Kompas sirkularitas dan jaringan sirkularitas
Kompetensi Antisipatif	• Mengingat produk sudah habis waktu selama proses • Merancang untuk siklus penggunaan ganda • Antisipasi cara sirkularitas akan berkembang selama beberapa kehidupan siklus.	Konsep : • Menghitung siklus yang digunakan Metode : • <i>Circular business model mapping tool</i> • Kerangka perubahan material
Kompetensi Normatif	• Menetapkan kriteria melingkar • Menilai solusi sirkularitas • Pertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan Pada tingkat sistem selama beberapa kehidupan siklus.	Konsep : • Mengukur sirkularitas • penilaian dampak sirkularitas Metode : • Indikator sirkularitas • Alat untuk mengukur dampak <i>circular strategy</i>
Kompetensi strategis	• Pelanggan menilai yang dirasakan. • Kontrak pengadaan atas dasar dari sirkularitas • Mempertimbangkan sirkularitas logistik dengan pengguna • Menghubungkan logistik terbalik dengan pengguna • mengembangkan <i>circular business model</i>	Konsep • <i>Circular supply chain business model</i> • <i>User experience (CRM)</i> Metode : • <i>Circular Business model canvas</i>
Kompetensi antar pribadi	• Pemahaman <i>Circular Supply chain</i> • <i>Circular economy story telling</i> • Memfasilitasi kolaborasi antara internal dan eksternal <i>stake holder</i>	Konsep • Kolaborasi melintasi <i>value net work</i> • <i>Circular economy vocabulary</i> Metode • Pemetaan nilai • Penciptaan bersama di laboratorium eksperimen

2.2.7. *Circular Supply Chain Management* dengan Prinsip 5R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover, dan Redesign*)

Circular Supply Chain Management (SCM) dan ekonomi sirkular bertujuan untuk menciptakan sistem ekonomi yang berkelanjutan dengan meminimalkan limbah, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan mendaur ulang produk yang ada. Prinsip 5R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover, dan Redesign*) menjadi panduan utama dalam

implementasinya. Konsep 5R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover, dan Redesign*) adalah inti dari penerapan keberlanjutan dalam *Supply Chain Management* (SCM) berbasis ekonomi sirkular. Implementasi 5R bertujuan mengurangi limbah, memaksimalkan pemanfaatan sumber daya, dan menciptakan nilai ekonomi dari proses daur ulang serta pemulihan. Dalam konteks SCM, konsep ini mencakup setiap tahapan rantai pasok, mulai dari perancangan produk hingga pengelolaan limbah pasca-konsumen. Hal ini memungkinkan perusahaan untuk meningkatkan efisiensi operasional sambil mengurangi dampak lingkungan.

Dalam *circular supply chain*, *Reduce* diterapkan dengan mengoptimalkan desain produk agar menggunakan lebih sedikit bahan baku, sementara *Reuse* fokus pada pemanfaatan kembali bahan atau komponen yang masih layak pakai. *Recycle* menjadi langkah strategis untuk mengolah material yang tidak dapat digunakan kembali menjadi bahan baku baru. Sementara itu, *Recover* melibatkan pemulihan energi atau material dari produk akhir yang tidak dapat didaur ulang secara langsung. Akhirnya, *Redesign* berperan dalam menciptakan inovasi produk dan proses agar lebih ramah lingkungan, seperti memprioritaskan desain modular yang mempermudah daur ulang atau perbaikan (Indrayani, 2021).

Salah satu upaya untuk menyelesaikan permasalahan limbah diatas adalah dengan pendekatan konsep ekonomi sirkular melalui implementasi. Konsep circular SCM dan ekonomi sirkular merupakan konsep baru yang mulai diimplementasikan oleh banyak negara didunia di berbagai bidang. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2020), implementasi konsep ini di bidang industri di Indonesia baru mencapai angka 9% dari keseluruhan jumlah industri yang ada. Implementasi *circular* SCM dan *economy circular* telah ditemukan di berbagai bidang industri. Setiap jenis industri memiliki bentuk implementasi konsep sirkular ekonomi yang berbeda-beda yang disesuaikan dengan bentuk proses produksinya diantaranya menggunakan prinsip 5R yaitu:

1. *Reduce* (Mengurangi)

Prinsip ini berfokus pada upaya meminimalkan penggunaan sumber daya alam dengan meningkatkan efisiensi dalam produksi. Tujuannya adalah untuk mengurangi limbah di sepanjang siklus hidup produk. Dalam praktiknya, perusahaan dapat mengoptimalkan desain produk agar lebih hemat bahan, mengurangi penggunaan energi, dan memilih material yang tahan lama. Dengan mengurangi kebutuhan sumber daya, perusahaan tidak hanya menghemat biaya produksi tetapi juga mengurangi jejak karbonnya.

2. *Reuse* (Menggunakan Kembali)

Prinsip *Reuse* menekankan pentingnya memanfaatkan kembali barang atau material yang masih layak pakai untuk mengurangi limbah. Contohnya adalah penggunaan kembali kemasan, palet logistik, atau komponen produk yang dapat diambil dari produk lama. Pendekatan ini tidak hanya menghemat biaya tetapi juga memperpanjang umur material sehingga mengurangi tekanan pada sumber daya alam baru.

3. *Recycle* (Daur Ulang)

Recycle adalah proses mengolah limbah menjadi bahan baku baru yang dapat digunakan kembali dalam produksi. Dengan teknologi modern, berbagai jenis limbah, seperti plastik, logam, dan kertas, dapat didaur ulang menjadi produk baru. Implementasi *recycle* membantu mengurangi jumlah limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir dan mendukung transisi menuju sistem produksi yang lebih ramah lingkungan.

4. *Recover* (Pemulihan Energi atau Material)

Prinsip ini bertujuan untuk memulihkan nilai dari limbah yang tidak dapat didaur ulang. Contoh implementasi *recover* meliputi konversi limbah organik menjadi energi melalui metode waste-to-energy atau pemulihan material seperti logam dari limbah elektronik. Dengan pendekatan ini, limbah yang sulit diolah tetap dapat memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan melalui pemulihan energi atau material.

5. *Redesign* (Merancang Ulang)

Redesign melibatkan inovasi dalam desain produk dan proses untuk mendukung keberlanjutan. Misalnya, menciptakan produk yang lebih mudah dibongkar untuk keperluan daur ulang atau mendesain ulang kemasan agar ramah lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya berorientasi pada efisiensi tetapi juga pada nilai tambah jangka panjang, seperti meningkatkan daya saing produk di pasar hijau yang semakin berkembang.

2.2.8. Sustainability pada Manajemen Rantai Pasok dan Circular Supply Chain

Konsep *sustainability* pada *supply chain management* (SCM) banyak mengambil inspirasi dari konsep *triple bottom line* (TBL) yang diajukan oleh Elkington (1994) yang menyatakan bahwa keberlanjutan sebuah organisasi bergantung pada tiga komponen, yaitu ekonomi, lingkungan, dan sosial. Pada *Circular SCM*, sebuah organisasi tidak hanya berkolaborasi dengan organisasi lain pada sektor yang sama (*closed-loop supply chain*), tetapi juga dengan organisasi di luar sektornya (*open-loop supply chain*) dengan tujuan

memaksimalkan penggunaan produk/material. Ini penting karena tingkat *value recovery* pada *closed-loop supply chain* sangat sempit karena terbatas pada rantai pasok produsen saja.

Closed-loop supply chain masih menghasilkan limbah yang banyak karena aktivitas daur ulang susah dilakukan jika pada rantai pasok yang sama. Oleh karena itu, *Circular SCM* tidak hanya fokus pada implementasi *closed-loop supply chain*, tetapi juga mengedepankan *value recovery* dari limbah organisasi lain di sektor yang sama (*open loop, same sector*) serta dari limbah yang dihasilkan organisasi lain di sektor yang berbeda (*open loop, cross sector*). *Circular SCM* didefinisikan sebagai koordinasi *forward* dan *reverse supply chain* melalui integrasi ekosistem bisnis dengan tujuan menciptakan nilai dari produk/jasa, *by-product*, dan alur penggunaan limbah melalui siklus hidup yang diperpanjang sehingga meningkatkan *sustainability* ekonomi, sosial, dan lingkungan organisasi

Circular SCM secara sistematis memperbaiki material teknis dan meregenerasi material biologis untuk mencapai visi *zero waste* melalui inovasi yang komprehensif pada model bisnis dan fungsi rantai pasok, mulai dari desain produk/jasa hingga *end-of-life* dan manajemen limbah; serta melibatkan semua pemangku kepentingan pada siklus hidup produk/jasa, termasuk produsen produk, penyedia jasa, konsumen, serta pengguna (Abidah et al., 2023)

2.2.9. Simulasi Pengolahan Sampah dengan prinsip CSCM

1. Definisi Simulasi

Secara kontekstual berdasarkan Oxford American Dictionary (1980), simulasi secara harfiah bisa berarti menjadi cara “buat mereproduksi syarat berdasarkan suatu situasi, melalui penggunaan contoh atau indera peraga, untuk keperluan penelitian, percobaan, atau latihan”. Dalam pembahasan dalam penelitian ini, definisi simulasi, ditekankan dalam penggunaannya pada membantu metode sistem dinamis.

Simulasi dalam konteks ini dapat diartikan sebagai peniruan suatu sistem dinamis dengan menggunakan model komputer untuk mengevaluasi dan meningkatkan kinerja sistem. Menurut Schriber (1987), simulasi adalah kegiatan memodelkan suatu proses atau sistem sehingga model yang dibuat memberikan respon serupa dengan sistem nyata terhadap kejadian yang terjadi seiring berjalannya waktu. Perilaku ini sering disebut sebagai perilaku "melihat sistem" dari waktu ke waktu (*behavior over time*), yang memfasilitasi penyelidikan komprehensif terhadap perilaku sistem.

Karena sifat model simulasi, khususnya model simulasi sistem dinamis, adalah penerapan perhitungan matematis yang kompleks, maka simulasi umumnya melibatkan penggunaan perangkat lunak untuk mendukung proses dan perhitungan yang terjadi dalam model yang dibuat dan dikendalikan. Kemampuan perhitungan diperlukan untuk mencapai hasil yang diinginkan.

Simulasi dirancang agar memiliki representasi grafis yang membantu pembuat kebijakan dan pengguna melakukan intervensi dalam model simulasi. Selama simulasi, pengguna juga dapat secara interaktif menyesuaikan kecepatan simulasi dan melakukan analisis "*what-if*" terhadap perubahan nilai parameter model. Teknologi simulasi juga memungkinkan model dioptimalkan untuk menciptakan kondisi yang diinginkan. Namun optimasi ini tidak dilakukan dengan simulasi itu sendiri, melainkan dengan adanya skenario yang memenuhi batasan probabilitas yang ada, sehingga model dapat dijalankan secara otomatis dan dianalisis menggunakan algoritma target tertentu.

2. Tujuan Simulasi

Simulasi menghasilkan sebuah alternatif baru untuk menguji kondisi yg diatur sebagai dampak dari pengaruh berdasarkan kondisi-kondisi yang telah diatur bisa terlihat sebelum di implementasikan pada praktik nyata, hal ini memberikan sebuah pemahaman apakah suatu keputusan yang sudah dibentuk adalah keputusan yg terbaik menurut parameter-parameter eksklusif yang diinginkan. Simulasi menghindari akan metode tradisional yang mahal, memakan waktu, dan menghabiskan banyak sumber daya. Dengan fokus dalam kondisi yang terdapat, metode pengambilan keputusan tradisional menggunakan cara *trial-and-error* telah dipercaya tidak sinkron lagi.

Kelebihan simulasi terletak dalam kemampuan simulasi menyediakan suatu metode analisis yang tidak hanya formal dan prediktif, namun juga secara akurat dapat mengevaluasi kinerja berdasarkan suatu sistem, bahkan sistem yg paling kompleks sekalipun. Dengan syarat persaingan pasar waktu ini yg menuntut "*getting it right the first time*", pentingnya simulasi semakin jelas supaya tidak dilakukan permulaan yang keliru.

Dengan menggunakan komputer untuk memodelkan suatu sistem sebelum sistem itu dibentuk atau untuk melakukan uji operasi sebelum sistem itu benar-benar diimplementasikan, kesalahan-kesalahan yang kerap kali ditemukan dalam waktu suatu sistem yang baru dijalankan atau waktu memodifikasi sistem yang lama bisa dihindari. *Improvement* pada umumnya menggunakan metode tradisional dapat memakan waktu berbulan-bulan bahkan bertahun-tahun

dapat dicapai dalam hitungan hari bahkan jam. Hal ini dimungkinkan lantaran simulasi berjalan pada saat yang dikompresi (*compressed time*) dimana waktu mingguan berdasarkan suatu sistem bisa disimulasikan pada beberapa menit bahkan beberapa detik.

Karakteristik dari suatu simulasi yang menyebabkan simulasi dianggap sebagai *tool* yang efektif untuk perencanaan dan pengambilan keputusan antara lain adalah sebagai berikut:

- Kemampuan menangkap ketergantungan di dalam sistem. (*interdependencies*)
- Kemampuan menggambarkan variasi di dalam sistem.
- Kemampuan untuk memodelkan sistem apapun.
- Kemampuan menunjukkan perilaku terhadap waktu.
- Memakan biaya dan waktu yang lebih rendah serta menggunakan sumber daya yang lebih efisien dibandingkan dengan metode tradisional yang melakukan eksperimen secara langsung pada sistem aktual.
- Kemampuan menyediakan informasi pada pengukuran kinerja yang berbeda-beda.
- Kemampuan visual yang menarik dan memancing keingintahuan dari orang-orang.
- Kemampuan menyajikan hasil yang mudah dimengerti dan mudah dikomunikasikan.
- Kemampuan untuk mengompresikan waktu.
- Menuntut perhatian untuk diberikan pada detail perancangan.

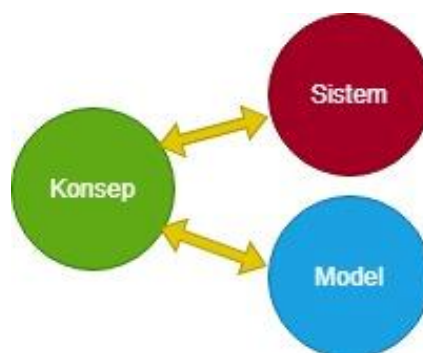
Karena simulasi dapat menggambarkan adanya saling ketergantungan (*interdependencies*) dan variasi, simulasi dapat memberikan pandangan yang mendalam mengenai dinamika yang kompleks dari suatu sistem yang tidak dapat diperoleh dengan menggunakan teknik analisis lainnya.

Simulasi memberikan kebebasan bagi perencana sistem untuk mencoba bermacam-macam ide yang berbeda untuk *improvement* dengan resiko yang nihil, yakni tidak menimbulkan biaya, tidak memakan waktu, dan tidak menimbulkan gangguan terhadap sistem aktual yang ada. Simulasi juga mampu menyajikan hasil secara visual dan kuantitatif dengan statistik kinerja yang tercatat secara otomatis dengan menggunakan bermacam-macam metrik pengukuran. Simulasi dapat dikerjakan dengan informasi yang tidak akurat, tetapi simulasi tidak dapat dibuat dengan data yang tidak lengkap.

3. Penggunaan Simulasi

Simulasi hampir selalu diterapkan sebagai bagian dari proses dalam perancangan sistem atau perbaikan proses yang besar. Alternatif-alternatif solusi akan dihasilkan dan kemudian dievaluasi, setelah itu solusi yang terbaik akan dipilih dan diimplementasikan.

Simulasi pada dasarnya merupakan sebuah alat yang digunakan untuk melakukan percobaan di mana model komputer dari sistem yang baru atau sistem yang sudah ada dibuat dengan tujuan untuk melakukan eksperimen. Model ini berperan sebagai pengganti dari sistem yang sebenarnya. Pengetahuan yang diperoleh dengan melakukan eksperimen pada model dapat ditransfer ke sistem yang sebenarnya.



Gambar 2.10 Simulasi Memberikan Cara Virtual dalam Melakukan Eksperimen terhadap Sistem (Bowden 2000)

Menjalankan simulasi adalah sebuah proses merancang model dari sistem yang nyata dan melakukan eksperimen dengan model ini. Melakukan eksperimen pada model akan mengurangi waktu, biaya, dan kerusakan jika dibandingkan dengan eksperimen yang dilakukan pada sistem aktual. Bertolak dari hal ini, simulasi dapat dianggap sebagai virtual prototyping tool untuk mendemonstrasikan bukti dari konsep yang ada.

4. Jenis-Jenis Simulasi

Cara simulasi bekerja didasarkan terutama pada jenis dari simulasi yang digunakan. Terdapat banyak pemahaman dalam mengkategorikan simulasi. Beberapa pemahaman yang umum adalah simulasi statis atau simulasi dinamis, simulasi stokastik atau simulasi deterministik, serta simulasi diskrit atau simulasi kontinu.

A. Simulasi Statis atau Simulasi Dinamis

Simulasi statis adalah simulasi yang tidak didasarkan atas waktu. Simulasi ini seringkali melibatkan random sampling untuk menghasilkan hasil statistik sehingga simulasi ini kerap kali disebut dengan simulasi Monte Carlo.

Sebaliknya, simulasi dinamis mengikutsertakan di dalamnya aliran waktu. Keadaan yang ada di dalam sistem akan berubah seiring dengan jalannya waktu. Karena sifat ini, simulasi dinamis tepat untuk digunakan untuk menganalisa sistem manufaktur dan sistem jasa.

B. Simulasi Stokastik atau Simulasi Deterministik

Simulasi di mana satu atau lebih variabel input di dalamnya bersifat random disebut dengan simulasi stokastik atau probabilistik. Simulasi stokastik menghasilkan output yang juga bersifat random dan karenanya hanya memberikan satu data point mengenai bagaimana perilaku dari sistem.

Sementara itu simulasi yang tidak mempunyai komponen input yang bersifat random dapat dikatakan sebagai simulasi deterministik. Model simulasi deterministik pada umumnya serupa dengan model stokastik, hanya saja model simulasi deterministik tidak memiliki *randomness*. Dalam simulasi deterministik, semua keadaan ke depan ditentukan begitu data input dan keadaan awal telah didefinisikan.

C. Simulasi Diskrit atau Simulasi Kontinu

Simulasi terkadang dapat dikategorikan sebagai simulasi diskrit (*discrete- event simulation*) atau simulasi kontinu (*continuous simulation*). Sebuah simulasi diskrit merupakan simulasi di mana perubahan terjadi pada titik-titik diskrit di dalam waktu yang dipicu oleh adanya *event*.

2.2.10. Sistem Dinamis pada Pengolahan Sampah dengan prinsip CSCM

1. Sistem

Secara luas sistem dapat didefinisikan sebagai keseluruhan interaksi antar unsur dari sebuah obyek dalam batas lingkungan tertentu yang bekerja untuk mencapai tujuan tertentu. Beberapa contoh sistem antara lain sistem perbintangan, ekosistem, sistem lalu lintas, sistem politik, sistem ekonomi, sistem manufaktur, dan sistem jasa.

Suatu sistem setidaknya terbentuk atas elemen-elemen sebagai berikut:

- Komponen-komponen atau bagian-bagian penyusun suatu sistem

- Interaksi antar komponen-komponen
- Tujuan bersama atas interaksi-interaksi antar komponen-komponen
- Lingkungan atau batasan sistem (*system boundary*)

Berdasarkan pengaruh hasil keluaran (*output*) sistem terhadap kondisi sistem, maka sistem dapat dibedakan menjadi:

- Sistem terbuka
Sistem terbuka ialah suatu sistem dimana *output* merupakan hasil dari *input*, walaupun demikian output terpisah dan tidak memiliki pengaruh terhadap *input* awal. Sistem ini tidak mengamati maupun bereaksi dengan performanya sendiri sehingga tidak memiliki kendali atas perilakunya di masa mendatang.
- Sistem tertutup
Sistem tertutup disebut juga feedback sistem, yaitu sistem yang memiliki struktur *loop* yang tertutup yang membawa hasil dari tindakan di masa lalu (*output* sebelumnya) kembali untuk mengendalikan tindakan (*input* saat ini) di masa mendatang. Sebuah *loop* umpan balik membutuhkan dua faktor penting untuk menjalankan operasinya yakni perbedaan antara hasil aktual dengan hasil yang diinginkan, serta aturan atau kebijakan yang menentukan aksi yang akan dilakukan terhadap suatu nilai perbedaan.

2. *System Thinking*

Untuk memahami apa itu sistem dinamis perlu diketahui terlebih dahulu apa itu berpikir sistem (*system thinking*) karena berpikir sistem merupakan konsep dasar dari pemahaman terhadap sistem dinamis. Berpikir sistem merupakan suatu konsep di mana suatu sistem hanya dapat dipahami jika dilihat secara keseluruhan sebagai suatu integritas.

” Berpikir sistem adalah kemampuan untuk melihat dunia sebagai suatu sistem yang kompleks, yang kita mengerti bahwa ‘kita tidak dapat melakukan hanya satu hal’ dan bahwa ‘segala sesuatu berkaitan dengan segala sesuatu’.” (Sterman, 2000, hal. 4).

Berdasarkan berpikir sistem, kita tidak dapat memahami suatu individu sebagai komponen dari sistem untuk dapat memahami sistem secara keseluruhan, sebab sistem memiliki karakteristik unik yang tidak dimiliki oleh komponen-komponen dari sistem tersebut. Karakteristik ini terbentuk karena adanya interaksi-interaksi antar komponen-komponen dalam sistem tersebut.

Dalam memahami sistem ada dua cara yang umum dilakukan:

- Mempelajari/menganalisis bagaimana komponen-komponen dari sistem bekerja sehingga kita mendapatkan hasil berupa pengetahuan mengenai kerja sistem tersebut
- Melakukan proses sintesis di mana kita melihat sistem secara keseluruhan sehingga mendapatkan hasil berupa pemahaman akan sistem tersebut. Cara ini merupakan prinsip dasar dari berpikir sistem

3. Sistem Dinamis

Pendekatan sistem dinamis mulai dikembangkan pada akhir dekade 1950-an hingga awal 1960-an di *Massachusetts Institute of Technology* oleh Jay Forrester sebagai suatu kerangka metodologis untuk menganalisis perilaku sistem yang kompleks. Pengakuan luas terhadap pendekatan ini semakin menguat setelah terbitnya karya perintis Forrester berjudul *Industrial Dynamics* pada tahun 1961, yang menjadi tonggak penting dalam memperkenalkan serta memformalkan konsep sistem dinamis ke dalam ranah akademik dan praktik manajerial.

Sistem dinamis merupakan pendekatan yang digunakan untuk meningkatkan pembelajaran dalam sistem kompleks melalui pengembangan model simulasi komputer (*management flight simulator*) guna memahami kompleksitas dinamis, mengidentifikasi resistensi kebijakan, serta merancang kebijakan yang lebih efektif (Stermann, 2000). Dalam perspektif ini, perilaku sistem ditentukan oleh struktur internal dan interaksi antar komponen yang membentuknya.

Sementara itu, Forrester (1991, hal. 5) dalam sebuah tulisannya yang berjudul *System Dynamics and 35 Years of Experience* juga mengemukakan sisi lain pengertian *system dynamics*: “*System dynamics combines the theory, methods, and philosophy needed to analyze the behavior of systems in not only management, but also in environmental change, politics, economic behavior, medicine, engineering, and other fields*”.

Konsep tersebut berakar pada pengalaman hidup penggagasnya sebelum merumuskan sistem dinamis. Dalam pertemuan internasional System Dynamics Society, Jay Forrester (1989) menyatakan bahwa pemikiran bidang ini telah terbentuk sejak masa kecilnya, terutama melalui pengalaman hidup di lingkungan peternakan yang memperkenalkannya pada mekanisme ekonomi seperti penawaran dan permintaan, perubahan harga dan biaya, dan tekanan perekonomian dunia pertanian menjadi pengalaman yang merasuk dalam jiwanya. Singkatnya, berbagai pengalaman yang diperolehnya dengan melakukan banyak proyek di

berbagai bidang, dari teknologi rendah hingga teknologi tinggi mendorongnya untuk menggabungkan kedua konsep tersebut, yaitu kekompleksan dan dinamika sistem dengan komputer.

Pada dasarnya, menurut Jenna Barnes, dalam jurnalnya yang berjudul “*System Dynamics and Its Use in Organization*”, terdapat empat konsep dasar dalam sistem dinamis yang menopang struktur dan perilaku sistem yang kompleks. Konsep tersebut adalah (Stermann, 2000):

A. Ruang lingkup yang tertutup

Istilah “tertutup” tidak berarti tanpa interaksi variabel eksternal, melainkan menunjukkan bahwa variabel utama yang membentuk hubungan sebab-akibat berada di dalam sistem, sedangkan variabel yang kurang signifikan ditempatkan di luar batas sistem.

B. *Loop* umpan balik sebagai komponen dasar sistem

Perilaku sistem ditentukan oleh struktur *loop* umpan balik yang terdapat dalam sistem tertutup, sehingga konfigurasi umpan balik tersebut menjadi faktor utama yang mengarahkan perubahan sistem dari waktu ke waktu.

C. *Level* dan *rate* (tingkat)

Dalam sistem dinamis terdapat dua variabel fundamental, yaitu *level* dan *rate*. *Level* merepresentasikan akumulasi suatu elemen dari waktu ke waktu, seperti jumlah pegawai atau persediaan di gudang, sedangkan *rate* merupakan variabel yang menentukan laju perubahan nilai pada level tersebut.

D. Kondisi yang ingin dicapai, kondisi riil, dan perbedaan antara kondisi yang ingin dicapai dengan kondisi riil.

Sistem dinamis menunjukkan adanya kondisi aktual dan kondisi tujuan yang ingin dicapai. Ketidaksesuaian antara keduanya menimbulkan kesenjangan yang menjadi pendorong terjadinya perubahan dalam sistem.

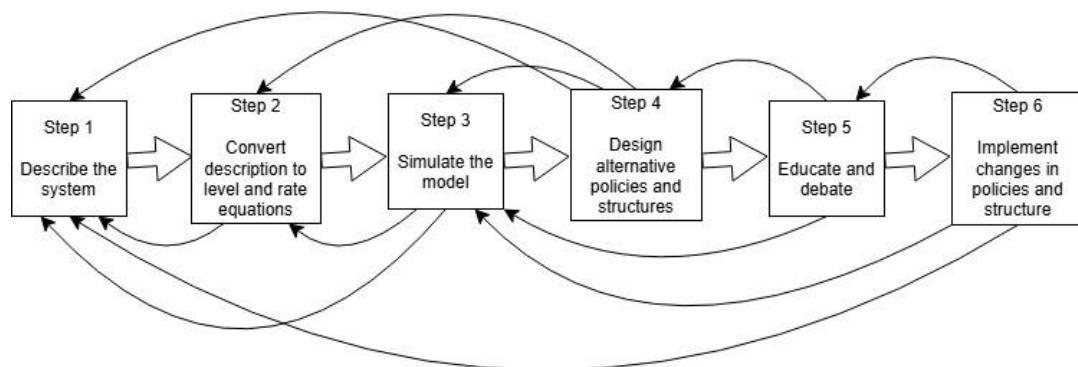
Setiap gejala, baik fisik maupun non-fisik, bagaimanapun kerumitannya, dapat disederhanakan menjadi struktur dasar yaitu mekanisme dari masukan, proses, keluaran, dan umpan balik. Mekanisme kerja berkelanjutan yang menunjukkan adanya perubahan menurut waktu bersifat dinamis. Perubahan tersebut menghasilkan kinerja sistem yang dapat diamati perilakunya.

Mekanisme berkelanjutan yang mencakup masukan, proses, keluaran, dan umpan balik dalam sistem nyata tidak berkembang secara bebas tanpa batas, melainkan berlangsung dalam kerangka pengendalian tertentu. Batasan tersebut dapat berasal dari faktor internal, seperti gangguan atau kerusakan pada sistem, maupun dari faktor eksternal berupa intervensi serta hambatan yang muncul dari lingkungan.

2.2.11. Proses Permodelan pada Pengolahan Sampah dengan prinsip CSCM

Model sistem dinamis bertujuan untuk mengkaji dan memahami struktur, kebijakan, serta keterlambatan (*delay*) dalam pengambilan keputusan yang memengaruhi perilaku sistem. Dalam perspektif ini, permasalahan tidak dipandang sebagai akibat faktor eksternal (eksogen), melainkan sebagai konsekuensi dari struktur internal sistem (endogen). Oleh karena itu, metodologi sistem dinamis menekankan pada pendalaman pemahaman sistem, di mana proses pemecahan masalah sekaligus memperkaya pemahaman terhadap dinamika yang terjadi.

Pada gambar 2.11 ditunjukkan rangkaian proses dalam sistem dinamik yang dijelaskan oleh Jay Forrester dalam jurnalnya, “*System Dynamics, System Thinking and Soft OR*”:



Gambar 2.11 Proses Sistem Dinamik (Forrester 1994)

Tahap awal diawali dengan investigasi terhadap perilaku sistem yang dianggap tidak diinginkan sebagai dasar untuk memahami dan memperbaikinya. Proses ini menekankan pemahaman sebagai langkah awal, dengan tujuan akhir berupa perbaikan kinerja sistem. Selanjutnya, sistem yang relevan dideskripsikan secara konseptual untuk merumuskan hipotesis mengenai mekanisme yang menyebabkan munculnya perilaku tersebut.

Langkah kedua adalah memulai memformulasikan suatu model simulasi. Deskripsi sistem dari langkah pertama diubah menjadi persamaan level dan rate dari suatu model sistem dinamik. Penulisan persamaan bisa memperlihatkan adanya gap dan ketidakkonsistenan yang harus di perbaiki di tahap sebelumnya (tahap deskripsi).

Langkah ketiga dilakukan setelah persamaan pada tahap sebelumnya memenuhi kelayakan logis untuk dijalankan sebagai model, yang umumnya diverifikasi melalui fitur pemeriksaan logis pada perangkat lunak sistem dinamis. Tahap simulasi tidak hanya menguji model, tetapi juga dapat memunculkan kebutuhan untuk memperjelas perumusan masalah dan menyempurnakan persamaan. Dalam praktik yang baik, simulasi harus merepresentasikan secara realistis tantangan yang dihadapi sistem nyata, dengan menitikberatkan pada kondisi aktual dan arah perbaikannya, bukan pada gambaran kondisi ideal di masa depan. Hasil simulasi awal biasanya memicu pertanyaan lanjutan serta pengulangan tahap sebelumnya hingga model dinilai memadai untuk mencapai tujuan. Validasi model tidak dapat dibuktikan secara absolut, melainkan dinilai berdasarkan tingkat kepercayaan terhadap kecukupan representasi, serta pertimbangan waktu dan biaya pengembangannya.

Tahap keempat berfokus pada identifikasi berbagai alternatif skenario atau opsi kebijakan untuk diuji melalui simulasi. Pengujian ini bertujuan menentukan skenario yang memiliki peluang implementasi paling optimal. Alternatif dapat dirumuskan berdasarkan intuisi yang berkembang pada tahap sebelumnya, pengalaman analis, masukan dari pihak yang terlibat dalam sistem, maupun melalui eksplorasi perubahan parameter secara otomatis yang lebih komprehensif, di mana pencarian parameter otomatis menjadi pendekatan yang sangat bermanfaat.

Tahap kelima menekankan pencapaian konsensus sebagai dasar proses implementasi, yang sekaligus menjadi tantangan utama dalam aspek kepemimpinan dan koordinasi. Terlepas dari jumlah pihak yang terlibat pada tahap sebelumnya, seluruh pemangku kepentingan akan berperan dalam pelaksanaan kebijakan. Pada fase ini, model berfungsi untuk menunjukkan bagaimana struktur sistem berkontribusi terhadap permasalahan yang dihadapi.

Tahap keenam merupakan implementasi kebijakan baru, yang keberhasilannya sangat dipengaruhi oleh kualitas tahapan sebelumnya. Kendala pada fase ini umumnya muncul akibat ketidaksempurnaan proses perumusan dan konsensus sebelumnya. Apabila model telah disusun secara relevan dan meyakinkan, serta proses pembelajaran pada tahap sebelumnya berjalan memadai, maka implementasi cenderung berlangsung lebih efektif. Meskipun demikian, proses ini memerlukan waktu yang relatif panjang karena kebijakan lama harus ditinggalkan sepenuhnya, sementara kebijakan baru menuntut penyediaan sumber informasi serta pelatihan yang sesuai.

2.2.12. Sumber Informasi dalam Pembuatan Model Simulasi

Pengembangan model memerlukan sumber informasi yang relevan dan memadai. Informasi yang digunakan dalam pemodelan sistem dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu data mental, data tertulis, dan data numerik. Di antara ketiganya, data mental umumnya mengandung informasi paling kaya, sedangkan data numerik memiliki kandungan informasi yang relatif lebih terbatas.

1. Data Tertulis

Dalam proses pemodelan, sumber informasi tidak hanya berasal dari data mental, tetapi juga dari data tertulis seperti dokumen resmi, kajian literatur, serta hasil wawancara atau kuesioner. Data tertulis umumnya memberikan informasi yang lebih terstruktur dan terverifikasi sehingga membantu memperjelas karakteristik sistem maupun permasalahan yang dianalisis, sekaligus melengkapi data mental yang cenderung bersifat konseptual. Meskipun demikian, jenis data ini tetap memiliki keterbatasan karena belum tentu mampu menjelaskan secara mendalam pola keterkaitan dan dinamika antarvariabel dalam sistem.

2. Data Numerik

Data numerik menyediakan informasi yang bersifat spesifik dan presisi sehingga memegang peranan penting dalam pendekatan ilmiah untuk pemecahan masalah. Keberadaannya memungkinkan proses kuantifikasi dalam pemodelan serta memperjelas representasi fungsi sistem secara matematis, khususnya ketika menganalisis permasalahan dengan karakteristik nonlinier yang kompleks. Namun demikian, meskipun memiliki tingkat ketelitian yang tinggi, data numerik relatif terbatas dalam kandungan informasi kontekstual dan kurang mampu merepresentasikan dimensi sosial maupun aspek tak kasatmata lainnya secara memadai.

3. Data Mental

Data mental merupakan jenis sumber informasi yang memiliki kandungan informasi paling kaya dan merupakan sumber utama dalam pembuatan suatu model. Data mental memuat informasi yang terlihat maupun tidak terlihat. Data mental terbentuk berdasarkan pengalaman dan pemahaman akan struktur terhadap suatu sistem atau permasalahan. Data mental mengandung informasi konseptual secara umum dalam melihat sistem secara keseluruhan. Informasi konseptual yang ada pada data mental tidak dapat digantikan oleh jenis informasi lain. Jika kita

mengganti informasi ini dalam bentuk numerik maka akan menjadi tidak efektif. Secara umum, informasi yang didasarkan atas pemahaman konseptual dan terkait dengan perilaku sistem dapat dicek ulang dengan menggunakan sumber informasi lain.

Namun, jika terlalu mengandalkan sumber informasi dari data mental dalam proses pembuatan model juga akan mengakibatkan ketidakefektifan. Hal ini dikarenakan perbedaan data mental yang dapat diperoleh dari individu yang berbeda. Selain itu kecenderungan biasanya data juga sangat besar karena data mental merupakan data kualitatif.

2.2.13. Umpan Balik (*Feedback*)

Sistem dinamis memandang sistem sebagai struktur tertutup yang berlandaskan umpan balik. Setiap variabel dapat berperan sebagai penyebab sekaligus akibat dalam hubungan yang saling berkaitan. Interaksi tersebut membentuk dinamika sistem. Perubahan pada satu variabel akan memengaruhi variabel lain dan kembali berdampak pada variabel awal.

Umpan balik adalah proses ketika suatu variabel memengaruhi dirinya sendiri melalui rangkaian hubungan kausal. Dalam sistem dinamis, umpan balik terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu:

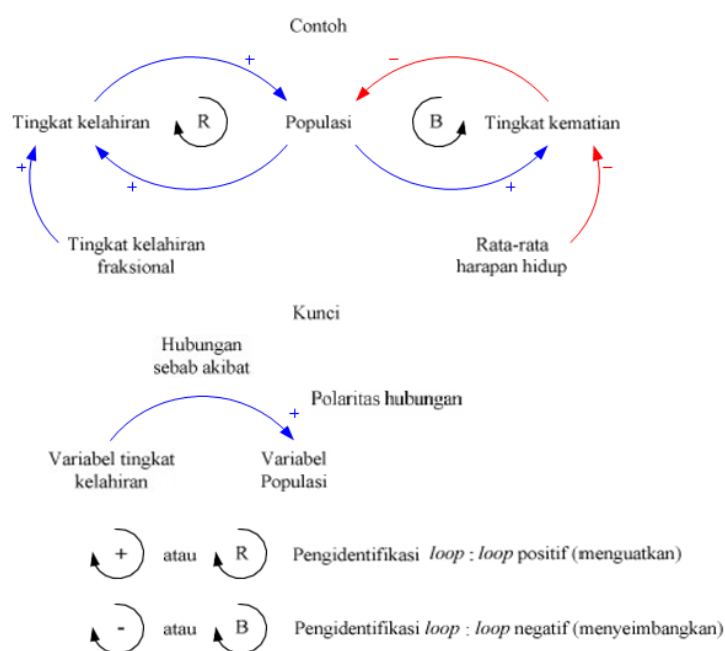
- Umpan balik positif
Umpan balik positif terjadi ketika peningkatan suatu variabel, setelah jeda waktu, kembali meningkatkan variabel tersebut. Mekanisme ini umumnya menghasilkan pola pertumbuhan eksponensial.
- Umpan balik negatif
Umpan balik dikategorikan sebagai negatif apabila peningkatan suatu variabel justru menyebabkan penurunan pada variabel yang sama. Mekanisme ini berfungsi menstabilkan atau menyeimbangkan sistem. Umpan balik negatif umumnya ditemukan pada sistem dengan pola perilaku yang bersifat osilatif.

2.2.14. Diagram *Loop* Sebab-akibat (*Causal Loop Diagram*)

Diagram *loop* sebab akibat adalah alat yang penting untuk merepresentasikan struktur umpan balik dari sistem. Diagram *loop* sebab akibat baik jika digunakan untuk (Sterman, 2000, hal. 137) :

- Menangkap dengan cepat hipotesis penyebab dinamika.
- Mendapat/menangkap mental model dari individu atau tim.
- Mengkomunikasikan umpan balik penting yang diyakini bertanggung jawab terhadap suatu masalah.

Diagram sebab-akibat terdiri atas variabel yang dihubungkan oleh panah untuk menunjukkan hubungan kausal. Di dalamnya juga diidentifikasi *loop* umpan balik sebagai bagian dari struktur sistem. Diagram ini digunakan untuk merepresentasikan hubungan sebab-akibat secara konseptual. Cara umum yang digunakan untuk menggambarkan sebab akibat:



Gambar 2.12 Cara Penulisan Diagram *Loop* Sebab-Akibat (Sterman 2000)

Hubungan sebab-akibat antarvariabel direpresentasikan melalui panah yang menunjukkan arah pengaruh, misalnya tingkat kelahiran yang dipengaruhi oleh jumlah populasi dan tingkat kelahiran fraksional. Setiap hubungan kausal memiliki polaritas positif (+) atau negatif (-) yang menunjukkan arah perubahan variabel dependen ketika variabel independen mengalami perubahan. Selain itu, *loop* dalam diagram diberi penanda untuk mengidentifikasi apakah termasuk umpan balik positif (menguatkan) atau negatif (menyeimbangkan).

Dapat diperhatikan bahwa pengidentifikasi *loop* berputar dalam arah yang sama dengan *loop* yang diwakilinya. Dalam contoh di atas, umpan balik positif yang berhubungan dengan kelahiran dan populasi adalah searah jarum jam dan begitu juga dengan pengidentifikasi *loop*-

nya. Sedangkan umpan balik negatif yang berhubungan dengan tingkat kematian dan populasi adalah berlawanan arah jarum jam sesuai dengan pengidentifikasi loop-nya. Gambar berikut akan menjelaskan polaritas hubungan:

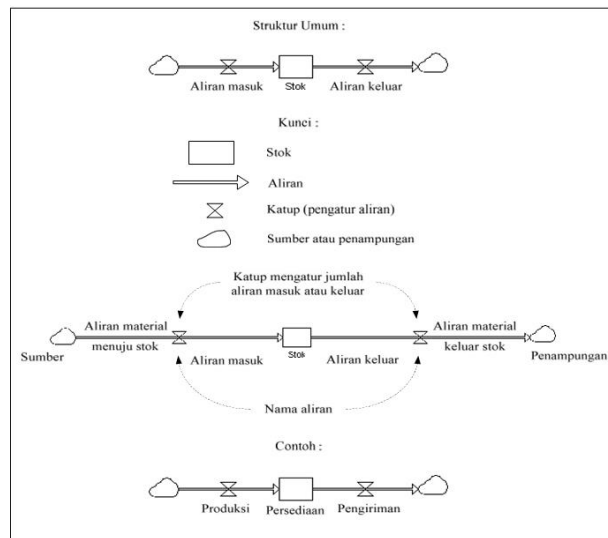
Simbol	Interpretasi	Persamaan matematika	Contoh
	Jika X meningkat (menurun), maka Y akan meningkat (menurun). Jika terjadi akumulasi, X menambah Y.	$\partial Y / \partial X > 0$ Jika terjadi akumulasi, $Y = \int_{t_0}^t (X + \dots) ds + Y_{t_0}$	Kualitas produk Penjualan Usaha Hasil Kelahiran Populasi
	Jika X meningkat (menurun), maka Y akan menurun (meningkat). Jika terjadi akumulasi, X mengurangi Y.	$\partial Y / \partial X < 0$ Jika terjadi akumulasi, $Y = \int_{t_0}^t (-X + \dots) ds + Y_{t_0}$	Harga produk Penjualan Frustrasi Hasil Kematian Populasi

Gambar 2.13 Polaritas Hubungan (Sterman 2000)

2.2.15. Diagram Alir (*Stock and Flow Diagram*)

Diagram sebab-akibat memiliki sejumlah keterbatasan dan berpotensi disalahartikan dalam penggunaannya. Salah satu kelemahan utamanya adalah ketidakmampuannya merepresentasikan struktur stok dan aliran (*stock and flow*) dalam sistem. Padahal, selain umpan balik, konsep stok dan aliran merupakan elemen fundamental dalam teori sistem dinamis.

Stok akumulasi merepresentasikan keadaan suatu sistem serta menjadi dasar informasi dalam pengambilan keputusan dan tindakan. Keberadaan stok memberikan sistem kapasitas untuk berkembang sekaligus berfungsi sebagai memori yang menyimpan kondisi masa lalu. Melalui proses akumulasi selisih antara aliran masuk dan aliran keluar, stok menimbulkan penundaan dalam sistem. Dengan demikian, pemisahan tingkat aliran menjadikan stok sebagai salah satu sumber utama ketidakseimbangan dalam sistem.

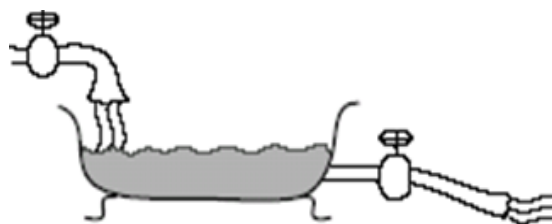


Gambar 2.14 Cara Penulisan Diagram Alir (Stermann 2000)

Gambar 2.14 menjelaskan penulisan diagram alir dalam sistem dinamis, di mana stok digambarkan dengan persegi panjang sebagai akumulasi variabel, aliran masuk berupa panah menuju stok yang menambah jumlah, dan aliran keluar berupa panah menjauhi stok yang mengurangi jumlah. Diagram ini memudahkan pemahaman hubungan antar komponen model.

Katup berfungsi sebagai pengendali besarnya aliran dalam sistem, sedangkan simbol awan merepresentasikan sumber dan penampungan aliran. Sumber menunjukkan asal stok atau tempat munculnya aliran yang berada di luar batas model, penampungan menggambarkan tujuan akhir aliran yang keluar dari batas model. Baik sumber maupun penampungan diasumsikan memiliki kapasitas tak terbatas sehingga tidak membatasi besarnya aliran.

Kaidah dalam diagram alir berlandaskan pada analogi hidrolik, yaitu perumpamaan aliran air yang masuk dan keluar dari suatu penampungan. Stok dapat dianalogikan sebagai bak air, di mana jumlah air pada waktu tertentu merupakan hasil akumulasi dari aliran masuk melalui keran dikurangi aliran keluar melalui pipa, dengan asumsi tidak terjadi percikan maupun penguapan.



Gambar 2.15 Analogi Hidrolik (Stermann 2002)

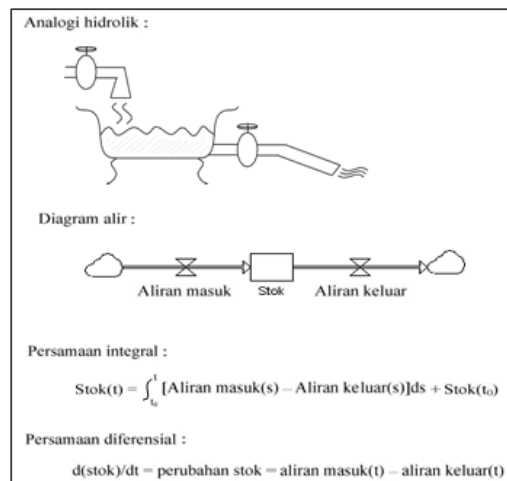
Dengan prinsip yang serupa, jumlah material dalam suatu stok merupakan hasil akumulasi dari aliran masuk dikurangi aliran keluar. Analogi ini memiliki makna matematis yang jelas dan tidak menimbulkan ambiguitas, karena stok berfungsi mengakumulasi atau mengintegrasikan aliran, sedangkan aliran yang menuju stok merepresentasikan laju perubahan dari stok tersebut. Oleh karena itu, struktur yang digambarkan dalam gambar 2.15 di atas sesuai dengan persamaan integral berikut ini:

$$\text{Stok}(t) = \int [\text{Aliran masuk}(s) - \text{Aliran keluar}(s)] ds + \text{Stok}(t_0)$$

Aliran masuk (s) menyatakan nilai aliran pada waktu s yang berada dalam rentang antara waktu awal t_0 hingga waktu t saat ini. Secara matematis, laju perubahan stok ditentukan oleh selisih antara aliran masuk dan aliran keluar, dirumuskan dalam persamaan diferensial.

$$d(\text{stock}) / dt = \text{aliran masuk}(t) - \text{aliran keluar}(t)$$

Secara umum, aliran dinyatakan sebagai fungsi dari stok serta berbagai variabel dan parameter kondisi lainnya dalam sistem. Gambar berikut memperlihatkan empat bentuk representasi yang ekuivalen dari diagram alir secara umum. Dari suatu sistem persamaan integral dan diferensial kita dapat membuat peta stok dan aliran yang sesuai:

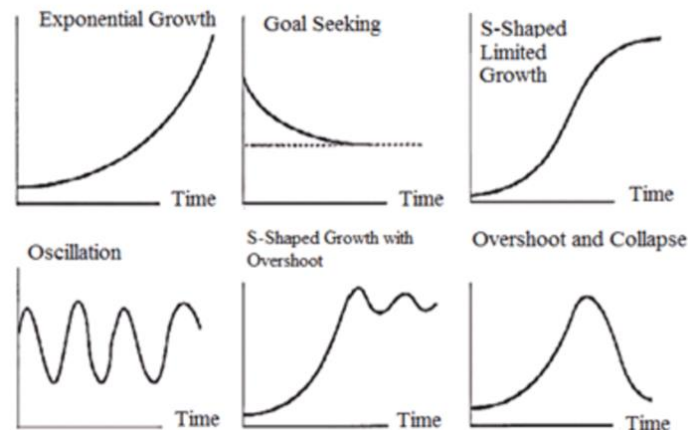


Gambar 2.16 Representasi Struktur Diagram Alir (John D. Sterman 2000)

2.2.16 Struktur dan Perilaku Dinamis

Perilaku dari sebuah sistem muncul dari strukturnya. Di mana sebuah struktur terdiri dari *loop* umpan balik, stok dan aliran, serta kenonlinieran yang diciptakan oleh interaksi dari struktur fisik dan institusional sistem dengan proses pengambilan keputusan dari agen-agen yang bertindak di dalamnya. Perubahan mengambil banyak bentuk, dan variasi dari

Kedinamisan yang dikemukakan penulis menunjukkan kompleksitas yang signifikan, karena terdapat berbagai variasi struktur umpan balik yang dapat menghasilkan beragam pola dinamika sistem. Pada praktiknya, dinamika tersebut hanya merepresentasikan sebagian kecil dari kemungkinan pola perilaku, seperti pertumbuhan eksponensial (*exponential growth*) maupun osilasi (*oscillation*). Gambar berikut menyajikan model perilaku secara umum.



Gambar 2.17 perilaku model secara umum (Sterman 2000)

Tiga pola dasar perilaku dalam sistem dinamik meliputi pertumbuhan eksponensial (*exponential growth*), pencapaian tujuan (*goal seeking*), dan osilasi (*oscillation*). Setiap pola tersebut dibentuk oleh struktur umpan balik sederhana, di mana pertumbuhan berasal dari umpan balik positif, pencapaian tujuan dari umpan balik negatif, dan osilasi dari umpan balik negatif yang disertai penundaan waktu dalam suatu *loop*. Selain itu, interaksi nonlinier antarstruktur umpan balik dasar dapat menghasilkan pola perilaku lain, seperti pertumbuhan berbentuk S (*S-shaped growth*), pertumbuhan S yang disertai *overshoot* dan osilasi, serta fenomena *overshoot* yang diikuti penurunan (*collapse*).

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menjelaskan mengenai alur kerangka penelitian yang terperinci serta penjelesannya serta pada bagian ini menjelaskan metode yang digunakan untuk penelitian guna mencapai tujuan dari rumusan masalah. Pada metode ini lingkup pembahasan objek dan subjek penelitian, ruang lingkup penelitian, populasi dan sampel, variabel dan definisi operasional, instrumen penelitian, pengumpulan data, analisis data, prosedur penelitian.

3.1 Subjek dan Objek Penelitian

1. Subjek penelitian

Subjek penelitian ini dilakukan dengan mengambil sumber data dari sudut pandang tertentu. Pertimbangan ini adalah orang yang diyakini lebih mengerti tentang informasi yang dibutuhkan, sehingga memudahkan peneliti untuk mencari informasi. Subjek pada penelitian ini adalah Kepala Bidang Kebersihan dan pengelolaan Ruang Terbuka Hijau, Kepala Seksi Pengelolaan Persampahan Kabupaten Sleman, Pengelola TPA, TPS3R dan TPST di Sleman, Pengawas TPA TPA, TPS3R dan TPST di Sleman, yang berada di bawah naungan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

2. Objek penelitian

Objek penelitian adalah isu, problem, atau permasalahan yang dibahas, dikaji, diteliti, dalam riset sosial. Adapun objek dari penelitian ini yaitu Analisis Penerapan *Circular Supply Chain Management* dalam pengolahan sampah di Kabupaten Sleman Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

3.2. Ruang lingkup penelitian

Ruang lingkup penelitian ini terbatas pada penerapan pendekatan *circular* SCM sebagai metode dalam pendekatan manajemen rantai pasok yang berfokus pada integrasi prinsip *Circular Supply Chain Management* dalam seluruh tahap prosesnya, mulai dari desain produk, produksi, distribusi, hingga akhir siklus hidup produk. Sistem ini bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya, mengurangi limbah, dan memaksimalkan nilai produk melalui strategi seperti daur ulang, penggunaan kembali, remanufaktur, dan inovasi desain yang berkelanjutan.

3.3. Fokus dan kajian penelitian

Fokus penelitian ini adalah untuk menganalisis dan mengevaluasi dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya serta mengurangi limbah dan memaksimalkan *value* dari produk dengan menggunakan strategi seperti daur ulang.

Lokasi penelitian ini Jl. KRT Pringgodiningrat No.9 Beran, Beran Kidul, Tridadi, Kec. Sleman, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Dan TPS3R, TPST serta TPA pada proses pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta.

3.4. Populasi dan sampel

A. Populasi

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh pihak yang terlibat dalam pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Hal ini mencakup pemerintah daerah (seperti Dinas Lingkungan Hidup), pengelola tempat pembuangan sampah serta pengolahan sampah TPS3R dan TPST, pelaku industri daur ulang, masyarakat, serta komunitas atau lembaga swadaya masyarakat (LSM) yang fokus pada pengelolaan limbah. Populasi ini dipilih karena mereka memiliki peran strategis dalam mendukung implementasi *Circular Supply Chain Management* (CSCM) berbasis ekonomi sirkular.

B. Sampel

Sampel penelitian diambil dari populasi tersebut dengan teknik tertentu, seperti *purposive sampling* atau *stratified random sampling*, tergantung pada fokus dan kebutuhan penelitian seperti Pelaku industri daur ulang lokal untuk mengeksplorasi potensi implementasi *circular supply chain management* dan ekonomi *circular*.

3.5. Instrument penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan dalam studi ini mencakup:

1. Wawancara

Wawancara dilakukan oleh Kepala Bidang Kebersihan dan pengelolaan Ruang Terbuka Hijau, Kepala Seksi Pengelolaan Persampahan Kabupaten Sleman, Pengelola TPA, TPS3R dan TPST di Sleman, Pengawas TPA, TPS3R dan TPST.

2. Observasi

Observasi dengan cara melakukan peninjauan langsung ke sumber sampah, Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST), Tempat Pengolahan Sampah 3R (TPS3R) dan Tempat Pembuangan Sampah Akhir (TPA).

3. Kajian literatur

Kajian literatur merupakan proses pencarian informasi mengenai metode maupun permasalahan yang diangkat pada penelitian saat ini melalui situs internet, jurnal, buku, dan lain sebagainya

4. 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.

3.6. Sumber penelitian

Sumber penelitian mencakup sebagai berikut:

1. Data primer

Data primer diperoleh langsung dari wawancara, dan observasi lapangan yang dilakukan selama penelitian. Data primer merupakan data yang didapatkan langsung dari sumbernya. Data ini harus didapatkan dari narasumber atau *expert* yang dijadikan sebagai sarana untuk mendapatkan informasi.

2. Data sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh secara tidak langsung dari lapangan dan dari pihak lain. Data sekunder untuk penelitian ini diperoleh dari buku, catatan, rekaman, jurnal, artikel, dan foto terkait proses pengelolaan sampah di kabupaten sleman DIY.

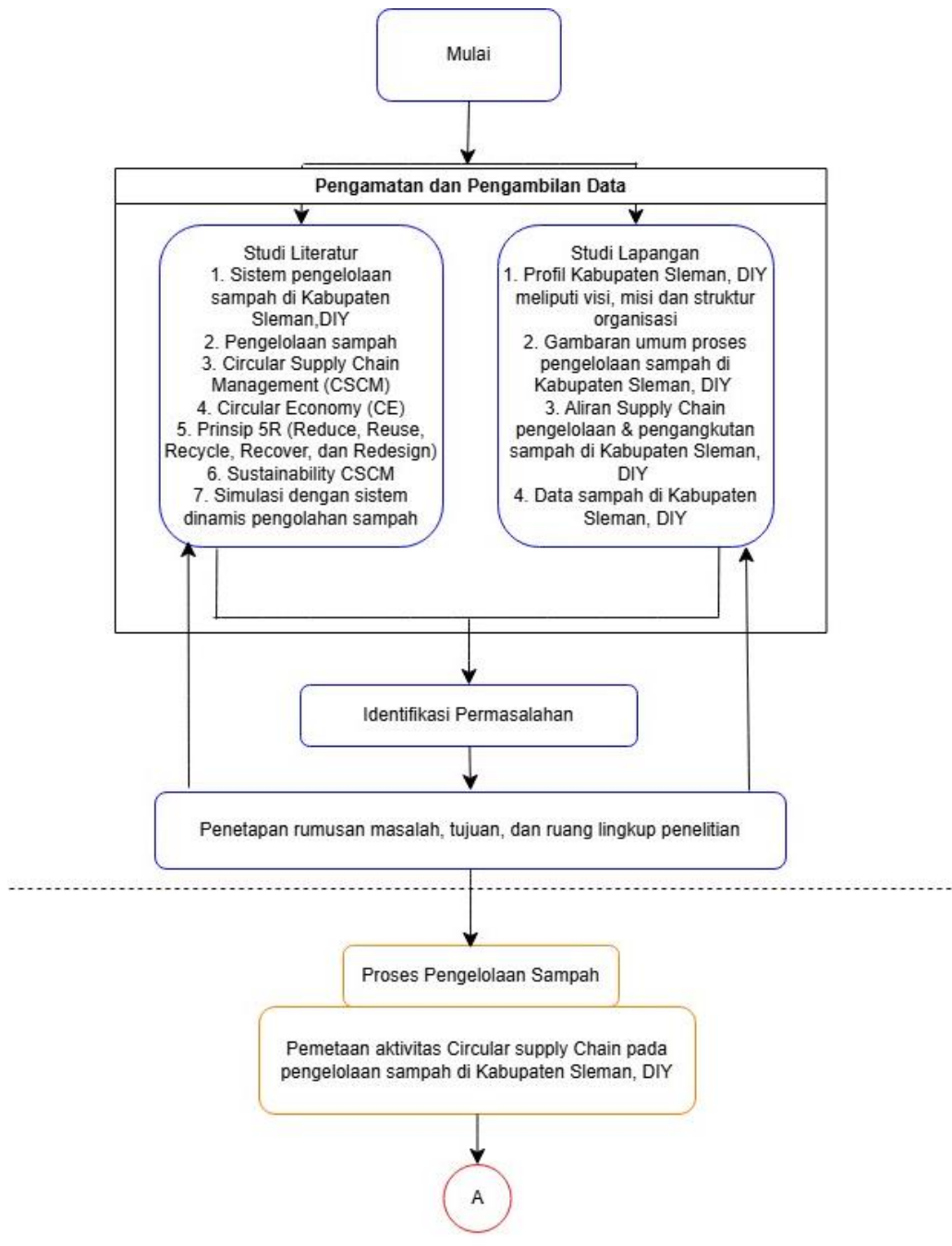
3. Pemodelan sistem dinamik

Sistem Dinamik menjelaskan pemodelan atas permasalahan yang muncul yang belum diketahui akar penyebabnya. Sterman (2000) menjelaskan dalam bukunya *Bussiness Dynamics* bahwa dalam membuat pemodelan sistem dinamik melalui beberapa tahap yaitu:

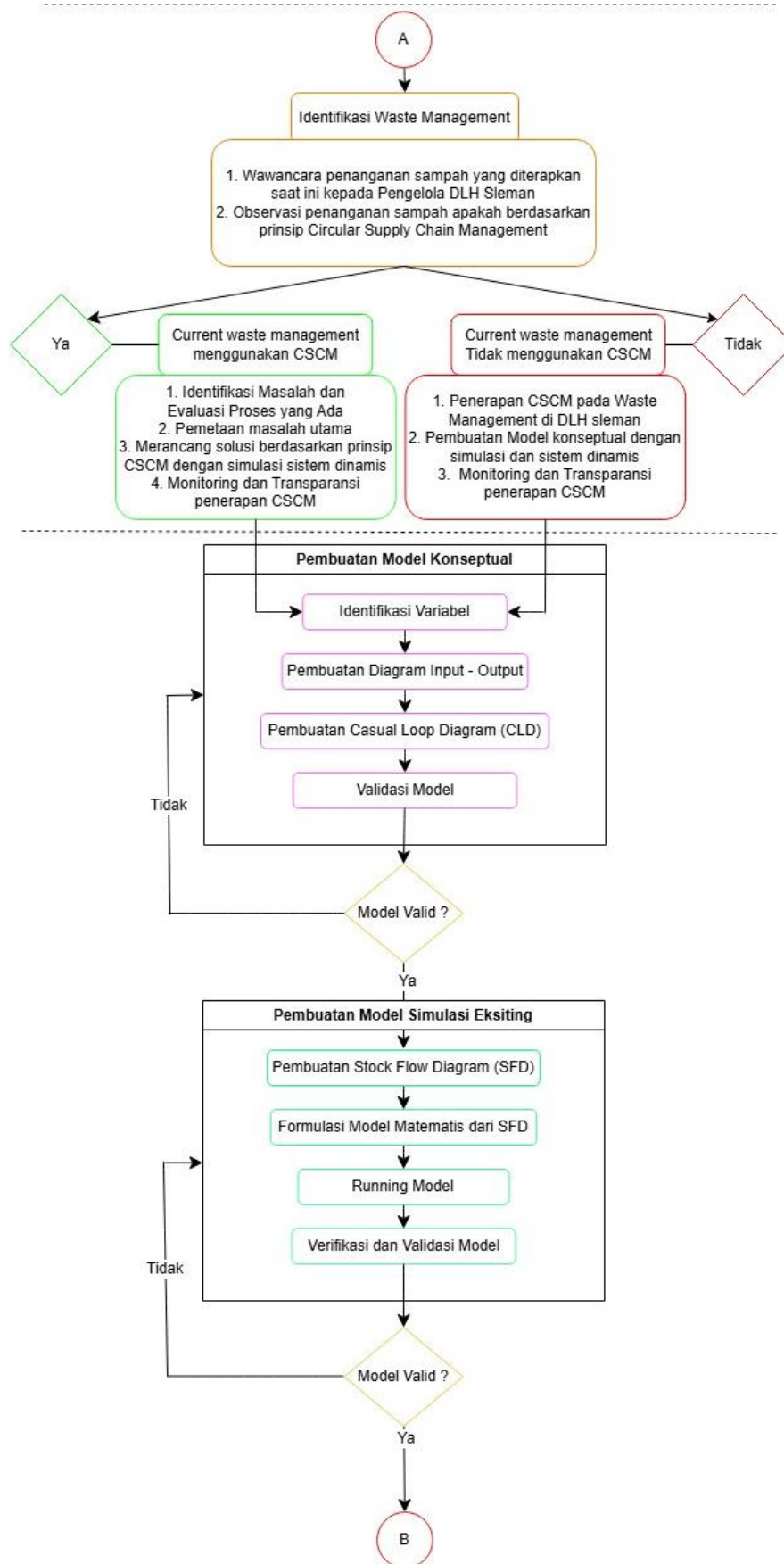
- a. Mengidentifikasi masalah dan data.
- b. Membuat *Causal Loop Diagram* (CLD).
- c. Mengaplikasikan CLD kedalam *Stock and Flows Diagram* (SFD).
- d. Mendeskripsikan akar permasalahan dari SFD yang didapatkan.

3.7. Prosedur penelitian

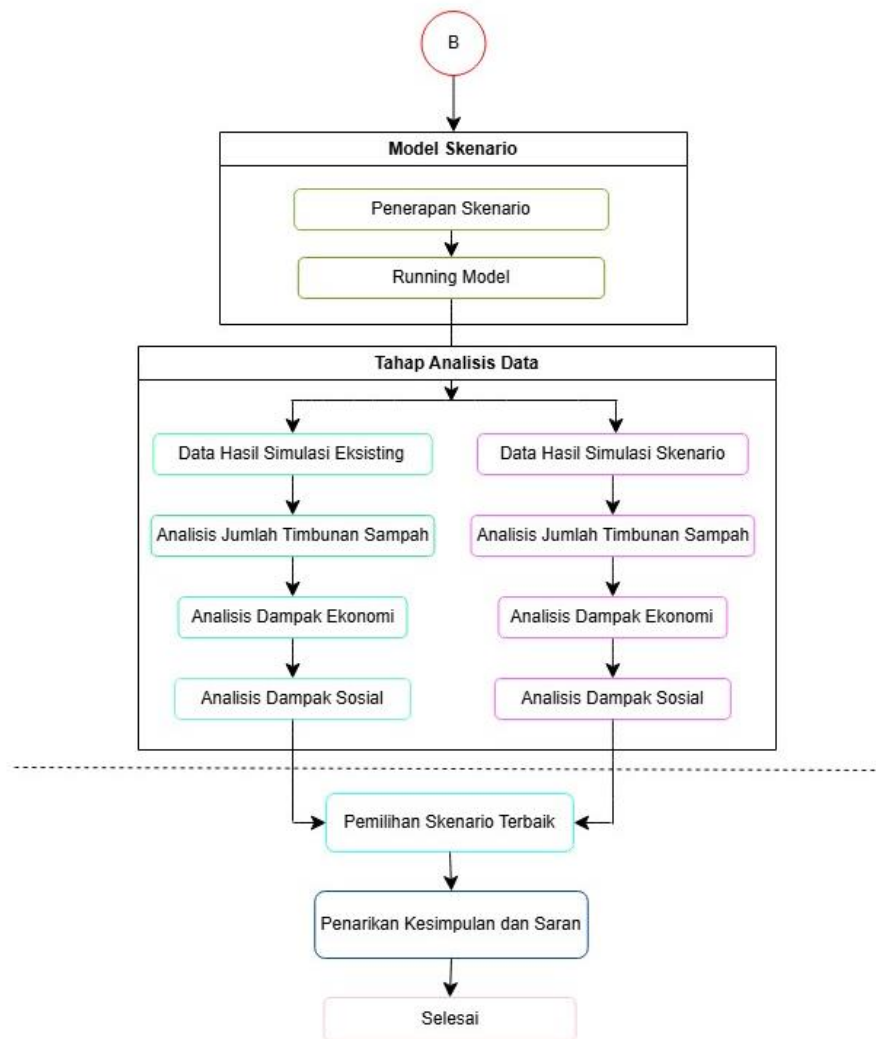
Berikut merupakan langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada diagram alir dengan rincian sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir tahap 1



Gambar 3.2 Diagram Alir tahap 2



Gambar 3.3 Diagram Alir tahap 3

3.8 Deskripsi Tahapan Penelitian

Adapun deskripsi tahapan penelitian untuk dapat menyelesaikan penelitian ini dijelaskan dibawah ini:

1. Mulai

Proses penelitian di awali oleh Langkah awal mencangkup studi literatur dan studi lapangan untuk memahami konteks dan data terkait pengelolaan sampah.

2. Studi Literatur

Pada tahap ini, penelitian mempelajari berbagai aspek dan teori yang relavan. Studi literatur merupakan tahap pencarian referensi yang mendukung diadakannya penelitian. Referensi yang digunakan bisa dengan membaca *textbook*, *e-book*, penelitian tugas akhir dan jurnal yang relevan dengan topik penelitian. Dari membaca beberapa literatur, kemudian diperoleh suatu permasalahan yang akan

diangkat dalam penelitian ini. Studi literatur yang ada berhubungan dengan *Circular supply chain* dan pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, antara lain:

- Sistem pengelolaan sampah di kabupaten sleman
- Konsep CSCM
- Konsep Circular Ekonomi dan prinsip 5R
- Simulasi sistem dinamis dalam pengelolaan sampah
- Konsep keberlanjutan dalam CSCM

3. Studi Lapangan

Studi lapangan adalah proses survei lapangan atau observasi dengan mengunjungi langsung objek penelitian di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Selain itu, hasil penelitian lapangan ini menjadi acuan dan memberikan landasan bagi penulis untuk melakukan penelitian dalam bidang keilmuan yang sesuai dengan situasi yang diteliti. Dalam proses ini data yang dikumpulkan adalah data langsung dari lokasi penelitian antara lain:

- Profil Kabupaten Sleman, termasuk visi, misi dan struktu organisasi
- Gambaran umum terkait proses pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman
- Identifikasi aliran *supply chain* pengelolaan sampah dan pengangkutan sampah
- Data terkait jumlah sampah yang dihasilkan

4. Identifikasi Permasalahan

Dalam penelitian ini mengidentifikasi isu-isu utama yang dihadapi dalam pengelolaan sampah. Hasilnya akan digunakan untuk merumuskan masalah, menentukan tujuan dan ruang lingkup penelitian

5. Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data penelitian dengan teknik Observasi dan wawancara yang meliputi data jumlah sampah yang dikelola, jenis sampah dan sumber sampah.

6. Pengolahan Data

Pada tahap ini data-data yang sudah dikumpulkan pada tahap pengumpulan data melalui identifikasi pengelolaan sampah dengan dilakukan observasi, wawancara.

- Wawancara dengan pengelola Dinas Lingkungan Hidup (DLH), TPS3R dan TPST di Sleman mengenai pendekatan pengelolaan sampah
- Observasi apakah pengelolaan sampah sudah sesuai dengan prinsip CSCM

Hasil indentifikasi:

- Jika “ya” maka melakukan evaluasi, merancang solusi berbasis CSCM, serta memonitor bagaimana cara penerapannya
- Jika “tidak” maka menerapkan CSCM melalui pembuatan model konseptual, simulasi dan sistem dinamis

7. Pembuatan model konseptual

Pada tahap ini model konseptuan dibuat berdasarkan:

- Identifikasi Variabel dengan menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi sistem dinamis
- Pembuatan Diagram *input-output* yang digunakan untuk menganalisis hubungan antar masing-masing variabel
- Pembuatan *Causal Loop Diagram* (CLD) digunakan untuk mengetahui hubungan sebab akibat antar masing-masing variabel, serta menyusun Diagram *feedback loop* untuk memetakan interaksi antar variabel dalam sistem
- Validasi Model digunakan untuk memastikan bahwa model yang sudah dibuat sesuai dengan kondisi nyata pengelolaan sampah. Menguji model konseptual untuk memastikan struktur dan hubungan variabelnya
 - Jika model tidak valid, maka perlu dilakukan revisi dan kembali ke tahap awal pembuatan model
 - Jika model valid, maka lanjut untuk ketahap berikutnya

8. Pembuatan Model Simulasi *Eksisting*

Setelah model konseptuan valid, tahap ini bertujuan untuk membangun model simulasi yang mempresentasikan sistem pengelolaan sampah. Berikut langkah-langkahnya :

- Membuat *Stock Flow Diagram* (SFD), menyusun diagram alur stok dan *flow* untuk menggambarkan proses dinamis dalam sistem.
- Formulasi Model Matematis dari SFD Mengonversi SFD ke dalam bentuk persamaan matematis agar dapat dijalankan secara simulasi.
- *Running Model* Menjalankan model matematis untuk memeriksa bagaimana sistem bekerja berdasarkan kondisi *eksisting*.
- Verifikasi dan Validasi Model Menguji hasil simulasi untuk memastikan bahwa model yang dibuat merepresentasikan sistem nyata secara akurat.

- Jika model tidak valid, maka perlu dilakukan revisi pada formulasi model dan kembali ke tahap sebelumnya.
- Jika model valid, lanjut ke tahap pengembangan model untuk implementasi konsep CSCM dan CE.

9. Model Skenario

Setelah model tervalidasi, langkah berikutnya adalah mengembangkan dan menjalankan simulasi berdasarkan skenario yang direncanakan. Proses ini meliputi:

- Penerapan Skenario, menentukan skenario yang akan diuji, misalnya perubahan kebijakan, implementasi teknologi baru, atau penerapan prinsip *Circular Supply Chain Management* (CSCM)
- *Running Model*, menjalankan simulasi berdasarkan skenario yang diterapkan untuk memperoleh data hasil simulasi.

10. Tahap Analisis Data

Pada tahap ini, data hasil simulasi dievaluasi untuk memahami dampaknya terhadap sistem pengelolaan sampah. Langkah-langkahnya sebagai berikut:

1. Data Hasil Simulasi *Eksisting*, menganalisis data dari model yang merepresentasikan kondisi sistem saat ini dan mengevaluasi jumlah timbunan sampah.
 - Analisis Jumlah Timbunan Sampah, mengukur jumlah sampah yang dihasilkan berdasarkan simulasi kondisi *eksisting*.
2. Data Hasil Simulasi Skenario, menganalisis data dari model yang merepresentasikan skenario yang telah diterapkan serta membandingkan dengan skenario yang sudah diterapkan.
 - Analisis Jumlah Timbunan Sampah Membandingkan jumlah timbunan sampah di bawah skenario baru dengan kondisi *eksisting*.

Setelah data hasil simulasi dianalisis, dilakukan evaluasi lebih lanjut melalui:

- Analisis Dampak Ekonomi, mengukur konsekuensi finansial dari tiap skenario, seperti biaya operasional, efisiensi anggaran, atau potensi pendapatan dari daur ulang.
- Analisis Dampak Sosial, menilai efek sosial dari tiap skenario, misalnya tingkat partisipasi masyarakat, peningkatan kesadaran lingkungan, atau dampak terhadap lapangan kerja.

3. Pemelihan Skenario Terbaik

Berdasarkan hasil analisis dampak ekonomi dan sosial dari tiap skenario, dilakukan pemilihan skenario terbaik yaitu:

- Memberikan dampak positif terbesar terhadap pengelolaan sampah.
- Memiliki keseimbangan antara manfaat ekonomi, sosial, dan keberlanjutan lingkungan.

11. Penarikan Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini disusun kesimpulan dari keseluruhan hasil penelitian untuk menjawab beberapa tujuan penelitian yang ingin dicapai Langkah terakhir adalah menyimpulkan hasil penelitian berdasarkan simulasi dan analisis data, serta memberikan saran implementasi. Dalam Proses ini meliputi:

- Kesimpulan berupa menyimpulkan efektivitas skenario yang diuji dan hasil dari model simulasi yang telah dibuat.
- Saran berupa memberikan rekomendasi untuk penerapan konsep CSCM yang telah diuji skenario.

12. Selesai

Penelitian ini ditutup dengan hasil akhir berupa pengelolaan sampah yang berkelanjutan dan berbasis prinsip CSCM.

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1 Pengumpulan Data

Proses mengumpulkan data dan informasi yang relevan dengan penelitian disebut pengumpulan data. Tujuan pengumpulan data adalah untuk mengumpulkan data yang dapat digunakan dalam proses pengolahan data. Ditambah lagi sebagai bahan yang digunakan sebagai dasar kajian, pengumpulan data juga bermanfaat sebagai pondasi awal penelitian .

4.1.1 Daerah Penelitian

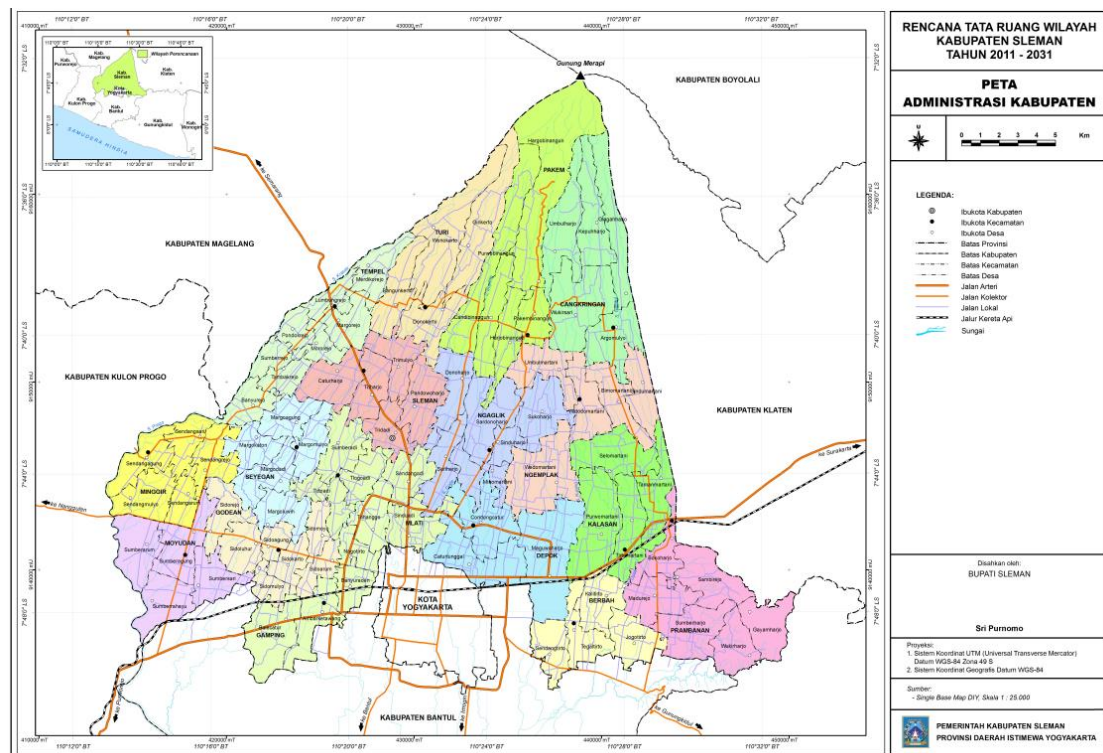
Daerah Penelitian ini dilakukan di kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Secara astronomis terletak pada koordinat diantara $110^{\circ} 33' 00''$ dan $110^{\circ} 13' 00''$ Bujur Timur, $7^{\circ} 34' 51''$ dan $7^{\circ} 47' 30''$ Lintang Selatan. Wilayah Kabupaten Sleman sebelah utara berbatasan dengan Kabupaten Boyolali, Propinsi Jawa Tengah, sebelah timur berbatasan dengan Kabupaten Klaten, Propinsi Jawa Tengah, sebelah barat berbatasan dengan Kabupaten Kulon Progo, Propinsi DIY dan Kabupaten Magelang, Propinsi Jawa Tengah dan sebelah selatan berbatasan dengan Kota Yogyakarta, Kabupaten Bantul dan Kabupaten Gunung Kidul, Propinsi D.I.Yogyakarta. Luas Wilayah Kabupaten Sleman adalah 57.482 Ha atau 574,82 Km² atau sekitar 18% dari luas Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta 3.185,80 Km², dengan jarak terjauh Utara – Selatan 32 Km, Timur – Barat 35 Km. Secara administratif terdiri 17 wilayah Kecamatan, 86 Desa, dan 1.212 Dusun.

Tabel 4.1 Luas Daerah berdasarkan Kecamatan di Kabupaten Sleman (Slemankab)

No	Kecamatan	Luas (Ha)	Jumlah Penduduk (Jiwa)	Kepadatan (Km ²)
1	Moyudan	2.762	33.595	1,216
2	Godean	2.684	57.245	2,133
3	Minggir	2.727	34.562	1,267
4	Gamping	2.925	65.789	2,249
5	Seyegan	2.663	42.151	1,583
6	Sleman	3.132	55.549	1,774
7	Ngaglik	3.852	65.927	1,712
8	Mlati	2.852	67.037	2,351
9	Tempel	3.249	46.386	1,428
10	Turi	4.309	32.544	0,755
11	Prambanan	4.135	44.003	1,064
12	Kalasan	3.584	54.621	1,524

13	Berbah	2.299	40.226	1,750
14	Ngemplak	3.571	44.382	1,243
15	Pakem	4.384	30.713	0,701
16	Depok	3.555	109.092	3,069
17	Cangkringan	4.799	26.354	0,549
Jumlah		57.482	850.176	1,479

Adapun gambar 4.1 merupakan gambar peta Wilayah Kabupaten Sleman beserta dengan batas batas Wilayah kabupaten Sleman.



Gambar 4.1 Peta wilayah Kabupaten Sleman (Bapedda Sleman)

Berdasarkan karakteristik sumber daya yang ada, wilayah Kabupaten Sleman terbagi menjadi 4 kawasan, yaitu :

1. Kawasan lereng gunung Merapi, dimulai dari jalan yang menghubungkan kota Tempel, Pakem, dan Cangkringan (*ringbelt*) sampai dengan puncak gunung Merapi. Wilayah ini merupakan sumberdaya air dan ekowisata yang berorientasi pada kegiatan gunung Merapi dan ekosistemnya.
2. Kawasan timur meliputi Kecamatan Prambanan, sebagian Kecamatan Kalasan, dan Kecamatan Berbah. Wilayah ini merupakan tempat peninggalan purbakala (candi) yang merupakan pusat wisata budaya dan daerah lahan kering serta sumber bahan batu putih.

3. Wilayah tengah yaitu wilayah aglomerasi kota Yogyakarta yang meliputi Kecamatan Mlati, Sleman, Ngaglik, Ngemplak, Depok, dan Gamping. Wilayah ini merupakan pusat pendidikan, perdagangan dan jasa.
4. Wilayah barat meliputi Kecamatan Godean, Minggir, Seyegan, dan Moyudan, merupakan daerah pertanian lahan basah yang tersedia cukup air dan sumber bahan baku kegiatan industri kerajinan mendong, bambu, serta gerabah.

Berdasarkan jalur lintas antar daerah, kondisi wilayah Kabupaten Sleman dilewati jalur jalan negara yang merupakan jalur ekonomi yang menghubungkan Sleman dengan kota-kota pelabuhan utama (Semarang, Surabaya, Jakarta). Jalur ini melewati wilayah Kecamatan Prambanan, Kalasan, Depok, Mlati, Tempel, dan Gamping. Selain itu, wilayah Kecamatan Depok, Mlati, dan Gamping juga dilalui jalan lingkar yang merupakan jalan arteri primer, sehingga kecamatan-kecamatan tersebut menjadi wilayah yang cepat berkembang, yaitu dari pertanian menjadi industri, perdagangan, pendidikan dan jasa. Berdasarkan pusat-pusat pertumbuhan, wilayah Kabupaten Sleman merupakan wilayah hulu kota Yogyakarta.

Berdasar letak kota dan mobilitas kegiatan masyarakat, dapat dibedakan fungsi kota sebagai berikut:

1. Wilayah aglomerasi (perkembangan kota dalam kawasan tertentu) merupakan perkembangan kota Yogyakarta, maka kota-kota yang berbatasan dengan kota Yogyakarta yaitu Kecamatan Depok, Gamping serta sebagian wilayah Kecamatan Ngaglik dan Mlati merupakan wilayah aglomerasi kota Yogyakarta.
2. Wilayah sub-urban (wilayah perbatasan antara desa dan kota) meliputi kota Kecamatan Godean, Sleman, dan Ngaglik terletak agak jauh dari kota Yogyakarta dan berkembang menjadi tujuan kegiatan masyarakat di wilayah kecamatan sekitarnya, sehingga menjadi pusat pertumbuhan.
3. Wilayah fungsi khusus/wilayah penyangga (*buffer zone*) meliputi Kecamatan Tempel, Pakem, dan Prambanan yang merupakan pusat pertumbuhan bagi wilayah sekitarnya.

4.1.2 Data Kependudukan Kabupaten Sleman

Tingkat kelahiran, kematian, migrasi, dan faktor lain menyebabkan populasi suatu wilayah berubah setiap saat. Salah satu sumber data kependudukan adalah sensus penduduk yang dilakukan setiap sepuluh tahun sekali. Jadi, pada tahun di mana sensus tidak dilakukan,

data kependudukan diperoleh dari hasil proyeksi penduduk. Jumlah penduduk Kabupaten Sleman dari tahun 2015 hingga 2025 disajikan dalam Tabel 4.2.

Tabel. 4.2 Jumlah Penduduk Kabupaten Sleman 2015-2025 (Yogyakarta.bps.go.id)

Tahun	Jumlah Penduduk	Satuan
2015	1.164.392	Jiwa
2016	1.180.908	Jiwa
2017	1.197.563	Jiwa
2018	1.214.346	Jiwa
2019	1.231.246	Jiwa
2020	1.248.258	Jiwa
2021	1.265.429	Jiwa
2022	1.282.804	Jiwa
2023	1.300.361	Jiwa
2024	1.318.086	Jiwa
2025	1.335.947	Jiwa

Berdasarkan data pada Tabel 4.2 dapat diketahui laju pertumbuhan penduduk Kabupaten Sleman menunjukkan persentase pertambahan penduduk dalam jangka waktu tertentu. Dapat diketahui laju pertumbuhan penduduk pada tahun 2016 sebesar 1,11%, tahun 2017 sebesar 1,11, tahun 2018 sebesar 1,22, tahun 2019 sebesar 1,22, tahun 2020 sebesar 0,29, tahun 2021 sebesar 1,27, tahun 2022 sebesar 1,10, tahun 2023 sebesar 1,01, tahun 2024 sebesar 1,00, tahun 2025 sebesar 0,98. Dapat diketahui bahwa laju pertumbuhan penduduk kabupaten Sleman pada beberapa tahun 2015 hingga tahun 2025 mengalami penurunan dan peningkatan yang beragam, penurunan dan peningkatan laju pertumbuhan sendiri diakibatkan dari berbagai faktor, seperti angka kelahiran yang tinggi dan tingkat kematian yang tinggi, ataupun pendatang yang menetap dan menjadi warga Kabupaten Sleman.

Tabel. 4.3 Jumlah Migrasi Penduduk Kabupaten Sleman (Yogyakarta.bps.go.id)

Migrasi Penduduk	per	Kecamatan di	Kabupaten Sleman	DIY
Kecamatan/ <i>District</i>	Lahir/ <i>Born</i>	Datang/ <i>In Migration</i>	Pindah/ <i>Out Migration</i>	Mati/ <i>Death</i>
1. Moyudan	388	3 370	407	220
2. Minggir	339	682	396	237
3. Seyegan	593	1 172	523	277
4. Godean	765	1 954	931	337
5. Gamping	1 031	2 713	1 273	385
6. Mlati	1 126	3 168	1 511	539
7. Depok	1 307	4 507	2 515	619
8. Berbah	657	1 845	780	288
9. Prambanan	657	1 155	630	213
10. Kalasan	967	2 716	1 099	423
11. Ngemplak	544	2 462	931	336

12. Ngaglik	1 195	3 728	1 643	494
13. Sleman	815	1 958	1 015	419
14. Tempel	612	1 024	635	328
15. Turi	434	756	370	219
16. Pakem	417	1 032	476	223
17. Cangkringan	370	558	291	165
Jumlah/Total	12 217	34 800	15 426	5 722
Tahun/Year 2017	14 025	13 695	10 141	5 134
Tahun/Year 2018	13 601	29 209	12 624	4 174

Berdasarkan tabel “Migrasi Penduduk per Kecamatan di Kabupaten Sleman (2018)”, pertumbuhan penduduk Sleman sangat kuat didorong oleh migrasi. Total kelahiran 12.217 dan kematian 5.722 menghasilkan pertambahan alami sekitar +6.495 jiwa, sementara arus masuk 34.800 dan arus keluar 15.426 memberi migrasi bersih $\pm$ 19.374. Artinya, kira-kira tiga perempat kenaikan penduduk bersih Sleman pada 2018 berasal dari migrasi, bukan kelahiran. Semua kecamatan mengalami surplus migrasi (*in > out*). Surplus terbesar ada di Moyudan (+2.963), Ngaglik (+2.085), Depok (+1.992), Mlati ($\sim$ +1.776), dan Kalasan (+1.617), disusul Gamping dan Ngemplak.

Dibanding ringkasan tahunan, arus *in-migration* 2018 juga melonjak dibanding 2017 (29.209 vs 13.695), sementara kelahiran dan kematian cenderung menurun. Pola ini menunjukkan penarikan penduduk menuju koridor perkotaan/pe-ri-urban (Depok–Mlati–Gamping–Ngaglik–Kalasan) serta kantong pertumbuhan baru seperti Moyudan. Implikasinya, kebutuhan layanan dasar, perumahan, dan transportasi akan paling tertekan di kecamatan-kecamatan tersebut, sehingga prioritas perencanaan sebaiknya diarahkan ke penataan permukiman dan konektivitas wilayah yang menjadi tujuan utama migrasi.

Tabel. 4.4 Jumlah Migrasi Penduduk Kabupaten Sleman (Yogyakarta.bps.go.id)

Kabupaten/ Kota	Jumlah Penduduk (Ribu)	Laju Pertumbuhan Penduduk per Tahun	Persentase Penduduk	Kepadatan Penduduk per km persegi (Km ²)	Rasio Jenis Kelamin Penduduk
Kulon Progo	445,3	0,54	11,85	760	98,1
Bantul	1.017,8	0,86	27,07	2.008	99,0
Gunung Kidul	752,2	0,18	20,01	506	97,7
Sleman	1.168,5	1,00	31,08	2.033	98,2
Kota Yogyakarta	375,8	0,16	10,00	11.562	94,7
DI Yogyakarta	3.759,5	0,65	100,00	1.180	97,9

Dari tabel kependudukan DIY, terlihat bahwa Sleman memiliki jumlah penduduk terbesar ($\pm 1,16$ juta jiwa), laju pertumbuhan penduduk tertinggi (1,00% per tahun), dan kepadatan cukup tinggi (2.033 jiwa/km²). Kondisi ini sangat erat hubungannya dengan meningkatnya timbunan sampah di wilayah tersebut. Secara umum, semakin besar jumlah penduduk dan semakin cepat pertumbuhan penduduk, maka semakin tinggi pula volume sampah yang dihasilkan, karena konsumsi rumah tangga, aktivitas ekonomi, dan pembangunan perumahan meningkat seiring pertambahan populasi.

Jika dibandingkan dengan daerah lain, Kota Yogyakarta memang memiliki kepadatan ekstrem (11.562 jiwa/km²), sehingga sampah per satuan luas kemungkinan jauh lebih tinggi meskipun laju pertumbuhan rendah (0,16%). Sementara itu, wilayah seperti Gunung Kidul dengan pertumbuhan rendah (0,18%) dan kepadatan rendah (506 jiwa/km²) relatif menghasilkan volume sampah lebih sedikit. Dengan demikian, terdapat korelasi kuat: wilayah dengan jumlah penduduk besar dan pertumbuhan tinggi (Sleman, Bantul) serta kepadatan sangat tinggi (Kota Yogyakarta) adalah kontributor utama timbunan sampah. Hal ini menegaskan bahwa pengelolaan sampah harus diprioritaskan di wilayah padat dan cepat tumbuh, terutama Sleman yang menjadi pusat migrasi dan urbanisasi.

4.2 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman

Dalam mengelola sampah, masyarakat Kabupaten Sleman sudah menerapkan sistem Desentralisasi “kurangi dari sumber, pilah, dan olah” yang sebelumnya menggunakan sistem kumpul, angkut, buang sampah dari sumber ke TPA. Sumber sampah berasal dari aktivitas masyarakat mulai dari pemukiman, sekolah, rumah sakit, pasar dan lain-lain. Sebagian sampah dari sumber dikelola masyarakat secara mandiri dan sebagian lainnya ditangani oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH) dan Unit Pelaksana Teknis Daerah (UPTD) Kabupaten Sleman untuk diangkut menuju ke Tempat Pengolahan Sampah 3R (TP3R). Sebagian sampah diangkut menuju Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST), selanjutnya secara berkala sampah akan diangkut ke Tempat Pembuangan Sampah Akhir (TPA) Piyungan atau TPA Banyuroto. Sampah yang masuk ke TPA akan ditangani secara *open dumping* atau sistem pembuangan terbuka dan pembakaran (*incineration*). Namun baru-baru ini TPA Piyungan melakukan *improvement* dengan mengubah TPA menjadi TPST, sehingga sampah akan lebih banyak diolah, masa transisi ini merupakan masa yang penting dalam siklus *improvement* agar berjalan dengan lancar dan sesuai rencana. Informasi terkait pengelolaan sampah Kabupaten Sleman dapat dilihat pada Tabel dibawah.

Tabel 4.5 Data TPS3R Kabupaten Sleman (sipsn.kemenlh.go.id)

Nama Fasilitas	Jenis	Sampah masuk (ton/thn)	Sampah terkelola (ton/thn)	Bahan baku Pakan Ternak	Bahan baku Kompos	Bahan baku Daur Ulang	Bahan baku Up-cycle	Bahan baku Sumber Energi	Pengelola
TPS 3R Giat	TPS 3R / UPS	2.173,28	1.869,02	869,31	325,99	673,72	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Kompak Maju	TPS 3R / UPS	1.086,64	29,71	18,25	0,00	11,46	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Mexicana	TPS 3R / UPS	474,50	341,64	0,00	86,88	254,76	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Randu Alas	TPS 3R / UPS	1.014,20	406,38	0,70	202,84	202,84	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Wukirbersih	TPS 3R / UPS	434,66	86,93	0,00	0,00	86,93	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Asri Murakabi	TPS 3R / UPS	651,98	651,99	0,00	144,89	434,66	72,44	0,00	LSM
TPS 3R Bening	TPS 3R / UPS	54,96	13,18	0,00	0,00	13,18	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Bumdes Armata	TPS 3R / UPS	1.114,50	236,31	91,25	116,99	28,08	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Gambir Asri	TPS 3R / UPS	975,19	384,37	35,10	7,02	342,26	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Kenanga Pondok	TPS 3R / UPS	1.014,20	210,97	18,25	0,00	192,72	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Boko Sejahtera	TPS 3R / UPS	22,46	12,92	0,00	11,23	1,68	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Cendra Keswara	TPS 3R / UPS	434,66	108,66	0,00	21,73	86,93	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Kenanga Merdiko	TPS 3R / UPS	211,75	100,31	27,86	16,72	55,73	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Luhur Berseri I	TPS 3R / UPS	2.190,00	1.898,00	36,50	36,50	1.825,00	0,00	0,00	PEMDA
TPS 3R Nirmala Tanjung	TPS 3R / UPS	108,66	31,57	0,00	23,40	8,17	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Resik	TPS 3R / UPS	869,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	LSM

TPS Terintegrasi Sinduadi Gumregah Gayeng Regeng	TPS 3R / UPS	1.277,50	255,25	182,50	14,04	56,16	2,56	0,00	LSM
TPS 3R Atras 1	TPS 3R / UPS	624,12	17,42	0,35	0,00	16,85	0,22	0,00	LSM
TPS 3R Bisma	TPS 3R / UPS	144,89	32,71	18,25	1,40	13,06	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Cambahan Maju	TPS 3R / UPS	28,08	5,62	0,00	0,00	5,62	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Grhakara Grafika	TPS 3R / UPS	171,55	153,30	0,00	149,65	3,65	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Limbah Makmur	TPS 3R / UPS	22,46	21,15	8,42	0,00	12,73	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Ngundi Rejeki	TPS 3R / UPS	84,23	1,86	0,63	0,00	1,23	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Atras 2	TPS 3R / UPS	1.014,20	406,38	0,70	202,84	202,84	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Luhur Berseri 2	TPS 3R / UPS	434,66	86,93	0,00	0,00	86,93	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Asri Resik	TPS 3R / UPS	651,98	651,99	0,00	144,89	434,66	72,44	0,00	LSM
TPS 3R Sembada	TPS 3R / UPS	54,96	13,18	0,00	0,00	13,18	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Mataram	TPS 3R / UPS	1.114,50	236,31	91,25	116,99	28,08	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Ringin	TPS 3R / UPS	2.173,28	1.869,02	869,31	325,99	673,72	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Sejahtera	TPS 3R / UPS	1.086,64	29,71	18,25	0,00	11,46	0,00	0,00	LSM
TPS 3R Tirto	TPS 3R / UPS	108,66	31,57	0,00	23,40	8,17	0,00	0,00	LSM

Berdasarkan data fasilitas TPS3R/UPS (Tempat Pengolahan Sampah *Reduce-Reuse-Recycle*/Unit Pengolahan Sampah) di Kabupaten Sleman, terlihat bahwa kontribusi masing-masing TPSR dalam menangani timbunan sampah cukup beragam. Beberapa fasilitas memiliki kapasitas pengolahan tinggi, seperti TPS3R Gama Amarta, TPS3R Menggala, dan TPS3R Anggulangi yang mampu mengelola ratusan hingga ribuan kilogram per hari, dengan pemanfaatan sampah menjadi kompos, bahan daur ulang, hingga bahan *upcycle*. Sementara itu, TPS dengan kapasitas lebih kecil seperti TPS3R Bening atau TPS3R Resik berperan lebih terbatas, namun tetap penting dalam mengurangi beban sampah ke TPA.

Pola pengolahan sampah di Sleman didominasi oleh pemanfaatan untuk kerajinan dan daur ulang, sedangkan pemanfaatan untuk energi maupun *upcycle* masih minim. Hal ini menunjukkan adanya potensi pengembangan teknologi dan inovasi agar sampah tidak hanya dikelola untuk kebutuhan dasar (kerajinan/daur ulang), tetapi juga bisa bernilai tambah sebagai sumber energi alternatif. Selain itu, banyak TPS3R di Sleman dikelola oleh LSM dan komunitas lokal, sehingga partisipasi masyarakat menjadi kunci keberhasilan. Namun, adanya perbedaan kapasitas pengelolaan antar fasilitas mengindikasikan perlunya pemerataan dukungan pemerintah, baik berupa infrastruktur, pendanaan, maupun peningkatan kapasitas SDM.

Secara keseluruhan, keberadaan TPS3R di Sleman mampu menekan volume sampah yang masuk ke TPA, tetapi efektivitasnya masih bergantung pada sinergi antara pemerintah, LSM, dan masyarakat. Untuk ke depan, penguatan jaringan TPSR dengan sistem transportasi sampah yang lebih efisien, diversifikasi teknologi pengolahan, serta insentif ekonomi bagi hasil daur ulang dapat meningkatkan kinerja pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman. Oleh karena, masalah sampah dapat lebih terkendali, sejalan dengan tingginya pertumbuhan penduduk dan urbanisasi di wilayah ini.

Tabel 4.6 Data TPST Kabupaten Sleman (sipsn.kemenvh.go.id)

Tahun	Provinsi	Kabupaten /Kota	Nama Fasilitas	Jenis	Sampah masuk (ton/thn)	Sampah terkelola (ton/thn)
2021	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (LSM)	TPST Rumah Inovasi Daur Ulang Pusat Inovasi Agroteknologi Universitas Gadjah Mada (Rindu PIAT UGM)	TPST (diluar TPA)	474.47	474.47

2023	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (LSM)	TPST Rumah Inovasi Daur Ulang Pusat Inovasi Agroteknologi Universitas Gadjah Mada (Rindu PIAT UGM)	TPST (diluar TPA)	1,385.18	1,385.18
2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (LSM)	TPST Rumah Inovasi Daur Ulang Pusat Inovasi Agroteknologi Universitas Gadjah Mada (Rindu PIAT UGM)	TPST (diluar TPA)	2,555.00	581.50

Berdasarkan tabel, TPST Rumah Inovasi Daur Ulang Pusat Inovasi Agroteknologi Universitas Gadjah Mada (Rindu PIAT UGM) di Kabupaten Sleman menunjukkan peningkatan signifikan dalam jumlah sampah yang masuk dari tahun ke tahun. Pada 2021, sampah masuk tercatat 474,47 ton/tahun dan seluruhnya berhasil dikelola (100%). Tahun 2023, jumlah sampah masuk meningkat menjadi 1.385,18 ton/tahun dengan tingkat pengelolaan masih penuh (100%). Namun, pada 2024 meskipun sampah masuk melonjak drastis menjadi 2.555 ton/tahun, hanya 581,5 ton yang berhasil dikelola, sehingga tingkat keberhasilan pengolahan turun menjadi sekitar 22,8%.

Fenomena ini menunjukkan bahwa kapasitas pengelolaan fasilitas belum mampu mengimbangi pertumbuhan timbulan sampah yang semakin tinggi. Rata-rata capaian pengelolaan selama periode pengamatan adalah 813,72 ton/tahun, jauh di bawah rata-rata sampah masuk sebesar 1.973,5 ton/tahun. Secara ilmiah, kondisi ini menandakan adanya kesenjangan kapasitas fasilitas dengan jumlah timbulan sampah, yang dapat berdampak pada peningkatan volume sampah tidak terkelola. Hal ini mengindikasikan perlunya peningkatan infrastruktur, teknologi, maupun strategi manajemen pengelolaan sampah agar target pengurangan sampah di Sleman lebih optimal.

Tabel 4.7 Data RDF (*REFUSE-DERIVED FUEL*) (sipsn.kemenlh.go.id)

Tahun	Provinsi	Kabupaten/Kota	Nama Fasilitas	Jenis	Skala	Sampah masuk (ton/thn)	Sampah terkelola (ton/thn)
-------	----------	----------------	----------------	-------	-------	------------------------	----------------------------

2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	TPST Sendangsari	RDF	Besar	2,861.60	2,113.35
2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	Transfer Depo Kragilan	RDF	Kecil	781.10	770.15
2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda & Swast a)	TPS 3R Bakti Bumi Turi	RDF	Besar	2,190.00	2,190.00
2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	TPST Tamanmartani	RDF	Besar	4,190.20	3,558.75
2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	Transfer Depo Panasan	RDF	Kecil	781.10	740.95

Fasilitas RDF bertujuan mengubah sampah menjadi bahan bakar alternatif. Berdasarkan tabel pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman tahun 2024, terlihat adanya perbedaan kapasitas dan efektivitas tiap fasilitas RDF (*Refuse Derived Fuel*). Fasilitas berskala besar seperti TPST SendangSari dan TPST Tamantirto menerima sampah dalam jumlah tinggi, masing-masing sekitar 2.861,60 ton/tahun dan 4.190,20 ton/tahun. Namun, tingkat sampah terkelola berbeda, di mana TPST SendangSari hanya mampu mengolah sekitar 73,8%, sedangkan TPST Tamantirto lebih optimal dengan pengolahan 84,9%. Hal ini menunjukkan bahwa meski kapasitas besar dapat menampung volume tinggi, efektivitas pengelolaan masih menjadi tantangan di beberapa lokasi.

Sementara itu, fasilitas berskala kecil seperti Transfer Depo Kragilan dan Transfer Depo Panasan memiliki input jauh lebih rendah (sekitar 781 ton/tahun), namun tingkat keberhasilan pengelolaan relatif tinggi (lebih dari 94%). Adapun TPS 3R Bakti Bumi Turi menjadi contoh baik karena seluruh sampah yang masuk (2.190 ton/tahun) dapat dikelola sepenuhnya. Secara umum, data ini mengindikasikan bahwa kombinasi fasilitas skala besar dan kecil diperlukan: skala besar untuk menampung volume besar, sementara skala kecil dan 3R berperan menjaga efektivitas dan kesinambungan pengelolaan sampah di Sleman.

Tabel 4.8 Data Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sleman (sipsn.kemenlh.go.id)

Tahun	Provinsi	Kabupaten /Kota	Nama Fasilitas	Jenis	Sampah masuk (ton/thn)	Sampah masuk <i>Landfill</i> (ton/thn)
2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	TPA Piyungan (Regional)	TPA Regional	9,198.00	9,198.00
2023	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	TPA Piyungan (Regional)	TPA Regional	71,536.35	71,536.35
2022	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	TPA Piyungan (Regional)	TPA Regional	121,176.35	121,176.35
2021	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	TPA Piyungan (Regional)	TPA Regional	98,436.85	93,414.45

Berdasarkan data TPA Piyungan Kabupaten Sleman, terlihat adanya fluktuasi signifikan dalam jumlah sampah yang masuk ke *landfill* dari tahun 2021 hingga 2024. Pada 2021 tercatat 98.436,85 ton/tahun dengan yang terolah sebesar 93.414,45 ton/tahun, kemudian meningkat tajam pada 2022 menjadi 121.176,35 ton/tahun dan seluruhnya masuk ke *landfill*. Namun pada 2023, jumlahnya justru menurun drastis menjadi 71.536,35 ton/tahun, dan kembali turun lebih jauh pada 2024 menjadi hanya 9.198 ton/tahun.

Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun TPA Piyungan sempat menerima volume sampah yang sangat besar, terutama di tahun 2022, kapasitas pengelolaan dan operasionalnya mengalami ketidakstabilan. Penurunan ekstrem pada 2023 ke 2024 dapat diinterpretasikan sebagai keberhasilan Penerapan kebijakan Desentralisasi (memilah sampah dari sumber/hulu) di kabupaten Sleman cukup berdampak pada pengurangan sampah yang signifikan berdasarkan data histori SIPSN, sampah masuk ke TPA dari tahun 2021 sebanyak 98,436.85 ton/tahun, tahun 2022 sebanyak 121,176.35 ton/tahun, tahun 2023 sebanyak 71,536.35 ton/tahun, tahun 2024 sebanyak 9,198.00 ton/tahun (menurun drastis akibat kebijakan desentralisasi sampah dari hulu). Secara ilmiah, data ini menggambarkan dinamika beban *landfill* yang tidak konsisten, yang berpotensi menimbulkan masalah keberlanjutan pengelolaan sampah di Sleman jika tidak diimbangi dengan strategi alternatif pengolahan di luar TPA.

Tabel 4.9 Data Timbunan Sampah Sleman (sipsn.kemenlh.go.id)

Tahun	Provinsi	Kabupaten/ Kota	Nama Fasilitas	Jenis	Status	Sampah masuk (ton/thn)	Sampah terkelola (ton/thn)
2024	Daerah Istimewa Yogyakarta	Kab. Sleman (Pemda)	Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Sleman	POO (Pusat Olah Organik)	A	1,862.23	1,862.23

Berdasarkan data tahun 2024, Kabupaten Sleman melalui Dinas Perindustrian dan Perdagangan mengoperasikan Pusat Olah Organik (POO) dengan capaian pengelolaan sampah yang optimal. Tercatat sebanyak 1.862,23 ton/tahun sampah organik masuk ke fasilitas ini dan seluruhnya berhasil dikelola, sehingga tingkat keberhasilan pengolahan mencapai 100%. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas POO sejalan dengan jumlah timbunan sampah organik yang diterima. Sebagai fasilitas khusus pengolahan sampah organik melalui proses seperti biogas atau biokonversi, POO tidak hanya menekan timbunan sampah ke TPA tetapi juga menghasilkan produk bermanfaat seperti biogas, sehingga mendukung efisiensi sistem persampahan dan penerapan konsep ekonomi sirkular di Sleman.

Tabel 4.10 Data Timbunan Sampah Sleman (sipsn.kemenlh.go.id)

Tahun	Timbunan Sampah Harian (ton)	Timbunan Sampah Tahunan (ton)
2019	699,12	255.180,17
2020	701,95	256.210,07
2021	735,57	268.481,59
2022	596,73	217.807,27
2023	601,79	219.653,64
2024	601,79	219.653,64

Tabel ini menunjukkan tren timbunan sampah tahunan dan harian dari tahun 2019 hingga 2024, dengan rata-rata mencapai lebih dari 219.000 ton per tahun. Meski sempat mengalami lonjakan pada 2021, tren timbunan cukup stabil di tahun-tahun berikutnya. Ini mencerminkan tingkat konsumsi dan aktivitas masyarakat yang tinggi serta perlunya penguatan sistem pengelolaan. Timbunan sampah adalah akumulasi atau jumlah sampah yang dihasilkan oleh individu, rumah tangga, komunitas, atau suatu wilayah dalam kurun waktu tertentu,

biasanya diukur dalam satuan kilogram per orang per hari atau ton per hari. Timbunan sampah mencerminkan pola konsumsi dan perilaku masyarakat serta dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti tingkat ekonomi, gaya hidup, aktivitas industri, dan kepadatan penduduk. Data timbunan sampah penting untuk merencanakan sistem pengelolaan sampah yang efektif, termasuk kebutuhan armada pengangkut, kapasitas fasilitas pengolahan, dan strategi pengurangan sampah di sumbernya.

Tabel 4.11 Data Jenis Timbunan Sampah Sleman (sipsn.kemenlh.go.id)

Jenis	2021	2022	2023	2024
Sisa Makanan (%)	50,21	46,45	46,45	46.49
Kayu-Ranting (%)	10,91	0,25	0,25	17.08
Kertas-Karton (%)	6,18	17,40	17,40	32.77
Plastik(%)	10,79	31,05	31,05	0.99
Logam(%)	2,12	0,55	0,55	0.16
Kain(%)	0,68	1,05	1,05	0.03
Karet- Kulit (%)	0,13	0,60	0,60	0.57
Kaca(%)	10,66	1,05	1,05	1,05
Lainnya(%)	8,32	1,60	1,60	1.90

Berdasarkan data jenis timbunan sampah Kabupaten Sleman tahun 2021–2024, terlihat bahwa sisa makanan konsisten menjadi komponen terbesar dengan proporsi sekitar 46–50% dari total timbunan. Namun, terdapat dinamika signifikan pada kategori lain, khususnya kertas-karton yang meningkat tajam dari 6,18% pada 2021 menjadi 32,77% pada 2024. Hal serupa terjadi pada kayu-ranting yang melonjak dari hanya 0,25% pada 2022–2023 menjadi 17,08% di 2024. Sebaliknya, proporsi plastik yang semula cukup tinggi (31,05% pada 2022–2023) justru menurun drastis menjadi hanya 0,99% pada 2024, yang kemungkinan dipengaruhi oleh kebijakan pengurangan plastik sekali pakai. Sementara itu, kategori logam, kain, karet-kulit, kaca, dan lainnya menunjukkan persentase relatif kecil dan cenderung stabil. Secara keseluruhan, pola ini menggambarkan adanya pergeseran komposisi sampah di Sleman, di mana dominasi sampah organik dan anorganik masih tinggi, namun tren peningkatan kertas-karton dan kayu-ranting menuntut strategi pengelolaan yang adaptif, terutama pada sektor daur ulang plastik dan pengomposan.

Tabel 4.12 Data Sumber Timbunan Sampah Sleman (sipsn.kemenlh.go.id)

Sumber	2023	2024
Rumah Tangga (ton)	413,23	413,23
Perkantoran (ton)	2,53	2,53

Pasar (ton)	56,20	56,20
Perniagaan (ton)	1,00	1,00
Fasilitas Publik (ton)	115,28	115,28
Lain-lain (ton)	13,55	13,55

Sumber utama timbunan sampah di Sleman berasal dari rumah tangga (sekitar 413 ton/hari), diikuti oleh fasilitas publik dan pasar. Hal ini menegaskan pentingnya pengelolaan sampah berbasis sumber, terutama edukasi dan penguatan pengelolaan di tingkat rumah tangga sebagai penyumbang terbesar. Data Sumber Timbunan Sampah menggambarkan asal-usul sampah yang dihasilkan, seperti dari rumah tangga, pasar, perkantoran, industri, fasilitas umum, dan lain-lain. Informasi ini sangat penting untuk memahami kontribusi masing-masing sektor terhadap total timbunan sampah dan untuk merancang strategi pengelolaan yang lebih spesifik dan efektif. Misalnya, sampah rumah tangga cenderung didominasi oleh sampah organik, sementara sampah industri bisa mengandung bahan berbahaya atau non-organik dalam jumlah besar. Dengan mengetahui sumber utama timbunan sampah, pihak pengelola dapat menentukan prioritas penanganan dan upaya pengurangan sampah dari sektor yang paling dominan.

Tabel 4.13 Data Pencapaian Timbunan Sampah Sleman (sipsn.kemenvh.go.id)

Pencapaian	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Timbunan Sampah Tahunan (ton/tahun)	255.180,17	256.210,07	268.481,59	217.807,27	219.653,64	219.653,66
Pengurangan Sampah Tahunan (ton/tahun)	1.610,82	27.447,82	44.417,98	17.970,32	21.236,96	30.492,54
Pengurangan Sampah%	0,63	10,71	16,54	8,25	9,67	13,88
Penanganan Sampah Tahunan (ton/tahun)	66.645,35	85.534,10	98.436,85	121.176,3	71.536,35	22.331,43

Penanganan Sampah%	26,12	33,38	36,66	55,63	32,57	10,17
Sampah Terkelola Tahunan (ton/tahun)	68.256,17	112.981,9	142.854,8	139.146,6	92.773,32	52.823,97
%Sampah Terkelola	26,75	44,10	53,21	63,89	42,24	24,05
Daur ulang Sampah Tahunan (ton/tahun)	1.610,82	21.087,24	5.938,89	17.970,32	21.236,96	27.546,99
Bahan baku Sampah Tahunan (ton/tahun)						3.760,23
<i>Recycling Rate</i>	0,63	8,23	2,21	8,25	9,67	14,25

Tabel ini merinci capaian pengelolaan dan pengurangan sampah. Pada tahun 2023 dan 2024, pengelolaan sampah mencapai sekitar 42% dan 24%, sedangkan daur ulang (*recycling rate*) masih berada di bawah 15%. Meski terdapat peningkatan dibanding tahun-tahun sebelumnya, persentase ini masih menunjukkan bahwa lebih dari separuh sampah belum tertangani secara optimal dan perlu upaya strategis untuk peningkatan kapasitas dan efisiensi. Data Pencapaian Timbunan Sampah menunjukkan jumlah total sampah yang berhasil dikumpulkan atau ditimbun dalam kurun waktu tertentu, baik yang berasal dari sumber rumah tangga, industri, maupun komersial. Data ini penting untuk mengevaluasi efektivitas sistem pengelolaan sampah suatu wilayah, termasuk kinerja pengurangan, pemilahan, dan daur ulang. Selain itu, pencapaian timbunan sampah juga mencerminkan tingkat partisipasi masyarakat dan ketersediaan infrastruktur pengelolaan limbah. Dengan memantau tren timbunan sampah, pemerintah atau pengelola lingkungan dapat merumuskan kebijakan yang lebih tepat guna mengurangi dampak lingkungan dari akumulasi sampah yang tidak terkelola.

4.2.1 Model Existing Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman

Model *existing* merupakan representasi kondisi aktual sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman yang dibangun berdasarkan data empiris. Model ini berfungsi untuk menggambarkan keadaan nyata sebelum dilakukan intervensi atau simulasi perbaikan, sekaligus menjadi dasar dalam penyusunan model usulan. *Causal loop* diagram menunjukkan bahwa jumlah penduduk dipengaruhi oleh imigrasi dan kelahiran (positif), serta emigrasi dan kematian (negatif). Peningkatan penduduk berbanding lurus dengan timbunan sampah, sehingga semakin banyak penduduk, semakin besar pula volume sampah di Sleman.

Sampah yang dihasilkan masyarakat kemudian masuk ke jalur pengelolaan melalui kendaraan pengkut sampah selanjutnya diolah oleh TPS3R dan TPST. Sampah yang berhasil diolah akan mengurangi sampah yang tidak terolah, sementara residu akhirnya menuju TPA. Dengan demikian, kapasitas TPS3R dan TPST sangat menentukan besarnya volume sampah yang masuk *landfill*. Secara keseluruhan, pengelolaan sampah di Sleman sangat bergantung pada dinamika penduduk dan efektivitas fasilitas pengolahan. Upaya optimalisasi 3R, peningkatan kapasitas TPS3R dan TPST, serta pengendalian timbunan sejak sumber menjadi kunci untuk mengurangi beban TPA dan menjaga keberlanjutan sistem persampahan daerah.

Dalam membangun model pengelolaan sampah Kabupaten Sleman, digunakan asumsi yang diperoleh berdasarkan hasil pengamatan dan penelitian terdahulu yang disesuaikan dengan kondisi terkini pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman. Asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Jumlah Sampah di Kabupaten Sleman memiliki sebanyak 601,79 Ton pada skala harian sedangkan untuk skala tahunan sebesar 219,653.64 pada tahun 2024.
2. Laju pertumbuhan penduduk Kabupaten Sleman dipengaruhi oleh faktor imigrasi (karena Kabupaten Sleman memiliki banyak universitas dan destinasi wisata sehingga banyak pendatang dari berbagai daerah lain), emigrasi, kelahiran dan kematian.
3. Jumlah Sampah yang masuk ke TPS3R kabupaten Sleman sebanyak 21.822,67 Ton/Tahun sedangkan sampah yang dikelola oleh TPS3R sebanyak 10.194,36 Ton/Tahun, sehingga selisih atau sampah yang tidak terolah oleh TPS3R ada sebanyak 11.628,31 Ton/Tahun.
4. Pada TPS3R Lurah Berseri 1 yang dikelola oleh Pemerintah daerah dan Dinas Lingkungan Hidup Yogyakarta terdapat sampah masuk sebanyak 2.190,00 Ton/Tahun dan dapat dikelola sebanyak 1.898,00 Ton/Tahun, sehingga sampah yang tidak terolah sebesar 292,00 Ton/Tahun. Hanya ada 1 TPS3R yang

dikelola oleh DLH dan 30 TPSR lainnya dikelola oleh LSM (Lembaga Swadaya Masyarakat).

5. Jumlah Sampah yang masuk ke TPST kabupaten Sleman sebanyak 2.555 Ton/Tahun pada tahun 2024 dan dapat dikelola sebanyak 581,50 Ton/Tahun sehingga sampah tidak terkelola adalah sebesar 1.973,50 Ton/Tahun oleh TPST Rumah Inovasi Daur Ulang Pusat Inovasi Agroteknologi yang di kelola oleh Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM), sedangkan 3 TPST yang dikelola oleh PEMDA (Pemerintah Daerah) dan DLH (Dinas lingkungan Hidup) khususnya mengelola RDF (*Refuse Derived Fuel*) pada tahun 2024 mendapatkan input sampah sebanyak 10.804 Ton/Tahun Dan dapat dikelola sebanyak 9.373,20 Ton/Tahun, sehingga sampah yang tidak terolah sebanyak 1.430,80 Ton/Tahun.
6. Jumlah Sampah masuk ke Tempat Pembuangan Akhir oleh kabupaten Sleman di TPA Piyungan pada tahun 2024 sebanyak 9,198 Ton/Tahun dan Sampah masuk ke *Landfill*.
7. Jumlah Penduduk Kabupaten Sleman 2024 sebanyak 1.318.086 Jiwa dengan tingkat kelahiran sebesar 1,03%(+), tingkat kematian sebesar 0,32%(-), tingkat imigrasi sebesar 2,2%(+) dan tingkat emigrasi sebesar 0,96%(-).

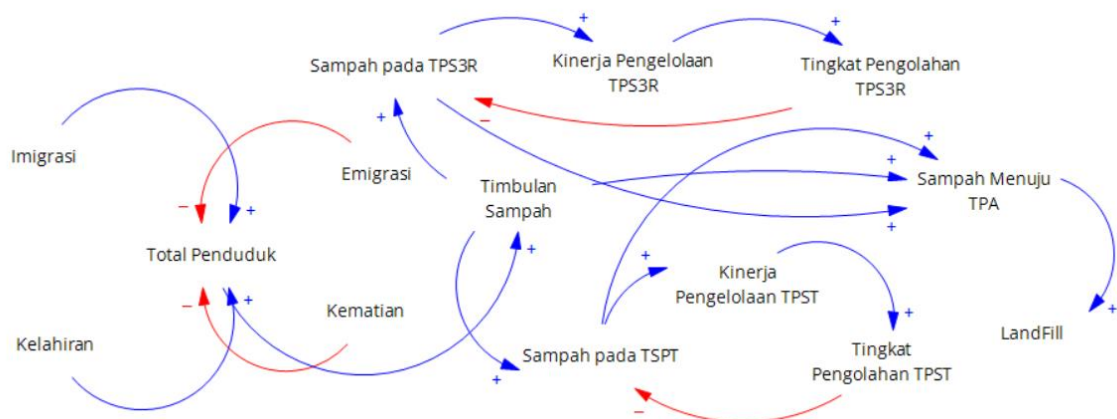
Terdapat batasan-batasan yang digunakan dalam pembangunan model *existing* pengelolaan sampah Kabupaten Sleman. Batasan digunakan agar pembangunan model dapat terkendali dan relevan dengan kondisi nyata. Batasan tersebut yaitu:

1. Model yang dibangun tidak mempertimbangkan dan memperhitungkan aliran sampah yang dari daerah luar Kabupaten Sleman seperti aliran sampah dari Kabupaten Bantul, Kolonprogo, Gunung Kidul maupun Kota Yogyakarta.
2. Model yang dibangun tidak memperhitungkan pendapatan karena pengelolaan sampah merupakan amanat undang-undang dasar yang memberikan konsekuensi bahwa pemerintah wajib memberikan pelayanan publik dalam pengelolaan sampah, yang artinya pemerintah bertanggung jawab terhadap terselenggaranya pengelolaan sampah termasuk dalam hal pembiayaan.
3. Volume sampah yang diangkut pemulung atau Pengepul tidak dipertimbangkan.
4. Pembangunan model tidak mengintegrasikan peraturan dan kelembagaan.
5. Model yang dibangun tidak mempertimbangkan perhitungan curah hujan, laju evaporasi, dan laju dekomposisi.

6. Model skenario dibuat berfokus pada pengembangan pengelolaan sampah khususnya TPS3R dan TPST di proses tengah dan proses penanganan sampah di hilir oleh TPA (pembaruan ke TPST). Tanpa melibatkan komposting skala kecil RT/RW maupun bank sampah unit atau bank sampah induk. Tidak menggunakan laju angkut sampah (Kecepatan pengiriman sampah yang bergantung pada jumlah truck dan kapasitas truck sampah). Sehingga skenario berfokus pada penambahan unit maupun efisiensi efektifitas pengelolaan sampah di tengah dan hilir, tanpa mengubah kebijakan di hulu dan kecepatan laju sampah dari penambahan jumlah maupun kapasitas pengangkut sampah, ketetapan laju pengangkut sampah dibuat sama dengan data histori SIPSN.

Asumsi dan batasan tersebut kemudian dijadikan dasar pembentukan variabel pada pemodelan sistem dinamis pengelolaan sampah Kabupaten Sleman . Permasalahan pada sistem digambarkan ke dalam struktur model konseptual menggunakan *Causal Loop Diagram* (CLD). Kemudian struktur CLD dikembangkan dan diformulasikan kedalam model *Stock Flow Diagram* (SFD). Besaran atau variabel sistem akan berubah dalam kurun waktu tertentu.

- A. *Causal Loop Diagram* (CLD) Model *Existing* Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman
- Gambar 4.1 menggambarkan interaksi sebab-akibat pada model *existing* pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman.



Gambar 4.2 Casual Loop Diagram (CLD) Model Existing Penglolaan Sampah Kabupaten Sleman.

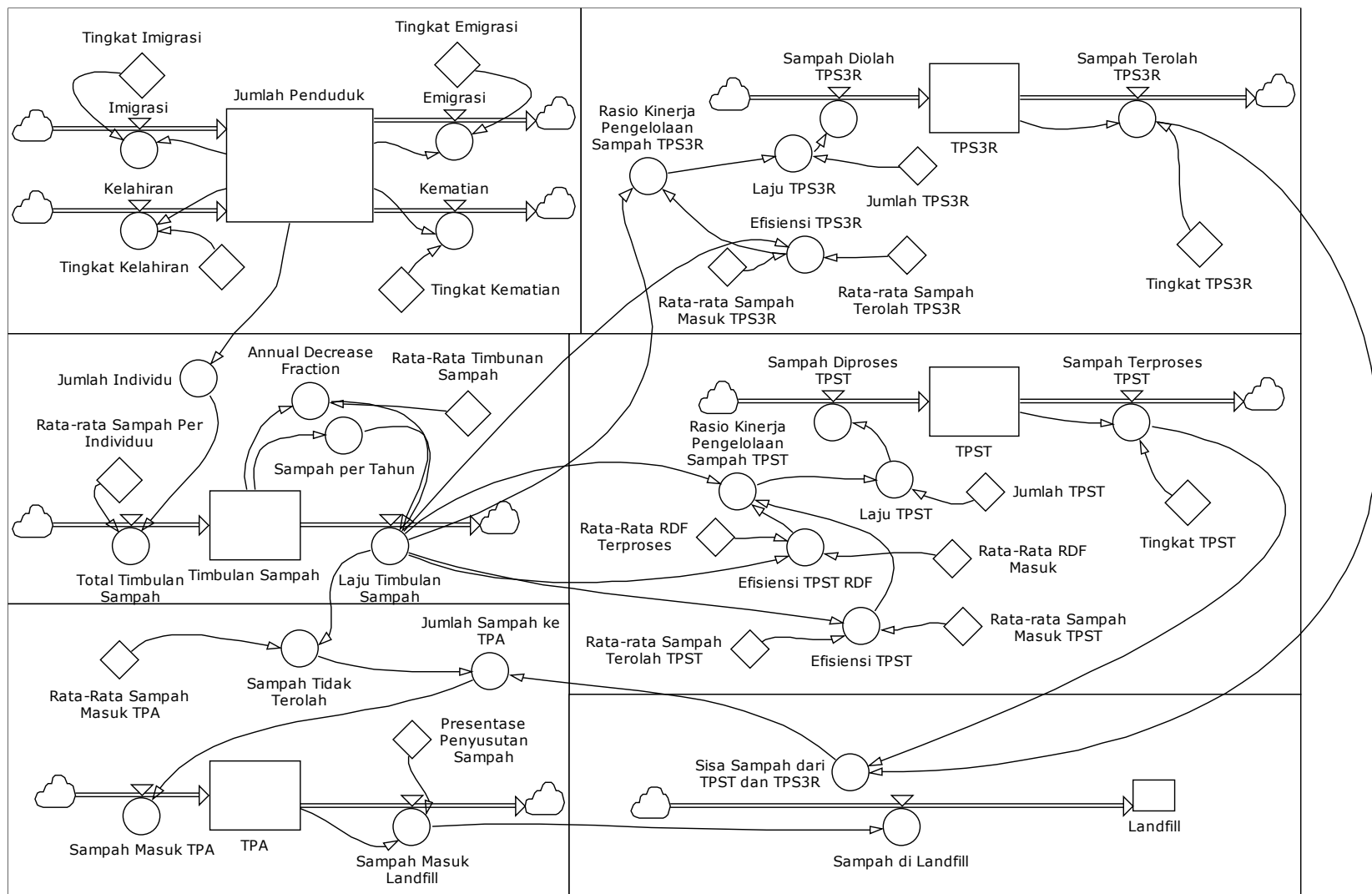
Gambar tersebut menunjukkan diagram kausal yang menggambarkan hubungan antar variabel dalam sistem kependudukan dan pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman. Jumlah penduduk dipengaruhi oleh faktor kelahiran, kematian, imigrasi, dan emigrasi. Kelahiran dan imigrasi memberikan pengaruh positif terhadap jumlah penduduk, sedangkan kematian dan emigrasi memberikan pengaruh negatif terhadap jumlah penduduk.

emigrasi memberikan pengaruh negatif. Peningkatan jumlah penduduk akan mendorong bertambahnya jumlah sampah yang dihasilkan. Dari sini dapat terlihat adanya *reinforcing loop* (penguatan) karena semakin tinggi jumlah penduduk, maka semakin tinggi pula jumlah sampah yang timbul.

Selanjutnya, sistem pengelolaan sampah terbagi ke dalam dua jalur, yaitu melalui TPS3R (Tempat Pengolahan Sampah *Reduce-Reuse-Recycle*) dan TPST (Tempat Pengolahan Sampah Terpadu). Sampah yang tidak berhasil diolah di TPS3R akan menuju ke TPA/Tempat Pembuangan Akhir (Pengembangan ke TPST di TPA), sementara sampah yang tidak terproses di TPST juga berkontribusi pada penumpukan di *landfill* hilir. Terdapat *balancing loop* di mana semakin banyak sampah yang diolah baik di TPS3R maupun TPST, maka volume sampah yang tidak terolah akan berkurang, sehingga tekanan terhadap TPA dan *landfill* dapat ditekan.

Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan adanya kombinasi *reinforcing loop* (jumlah penduduk terhadap jumlah sampah) dan *balancing loop* (pengolahan sampah di TPS3R dan TPST terhadap jumlah sampah menuju TPA). Hal ini menegaskan bahwa jika kapasitas pengolahan sampah meningkat, maka dampak negatif dari penambahan jumlah penduduk terhadap volume sampah di TPA dapat ditekan. Sebaliknya, jika pengolahan tidak optimal, maka peningkatan jumlah penduduk akan memperparah permasalahan sampah di TPA dan *Landfill*.

B. *Stock Flow Diagram (SFD) Model Existing* Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman. Setelah merancang model konseptual menggunakan CLD, model sistem *existing* diformulasikan menggunakan SFD. Pengembangan model digambarkan pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.3 Stock Flow Diagram (SFD) Model Existing Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.

Secara detail, sistem pengelolaan sampah *existing* di Kabupaten Sleman digambarkan pada Gambar 4.3. Sistem pengelolaan sampah bermula dari hulu, dengan jabaran sebagai berikut:

1. Pertumbuhan jumlah penduduk di Kabupaten Sleman dipengaruhi oleh faktor kelahiran 1,03%(+) dan imigrasi 2,2%(+) sebagai aliran masuk, serta kematian 0,32%(-) dan emigrasi 0,96%(-) sebagai aliran keluar. Berdasarkan data historis BPSI Sleman mengenai pertumbuhan jumlah penduduk didapat rata-rata 1,95%(+), seiring meningkatnya jumlah penduduk, timbunan sampah juga akan meningkat karena adanya rata-rata produksi sampah per individu sebesar 0,01666 Ton/orang/Tahun (Rata-rata sampah per individu didapat dari Jumlah Timbunan Sampah pertahun dari data SIPSAN dibagi dengan Jumlah penduduk di kabupaten sleman didapatkan dari data BPSI). Kondisi ini menyebabkan akumulasi jumlah sampah terus bertambah dari waktu ke waktu.
2. Sampah yang dihasilkan masyarakat sebagian masuk ke jalur pengelolaan melalui TPS3R. Laju sampah yang masuk ke TPS3R akan mempengaruhi jumlah sampah yang terolah, meskipun kapasitas pengolahan TPS3R di Kabupaten Sleman berjumlah 31 unit TPS3R namun proses pengolahan sampah kurang efektif (diketahui tetap ada penumpukan sampah di TPA dan *Landfill* berdasarkan data historis SIPSAN), sehingga volume sampah yang berhasil diproses hanya didapat 46,71% dari 21.822,67 Ton/Tahun sampah masuk ke TPS3R berhasil diolah sebanyak 10.194,36 Ton/Tahun dan menyisakan sampah 11.628,31 Ton/Tahun yang akan masuk ke TPA atau *Landfill*.
3. Selain TPS3R, sampah juga ditangani oleh TPST. Laju sampah yang masuk ke TPST berbanding lurus dengan jumlah sampah yang dapat diproses. Namun, kapasitas dan jumlah TPST yang tersedia saat ini masih belum optimal dalam mengurangi volume residu, sehingga sebagian besar sampah tetap harus diarahkan menuju TPA dan *Landfill*. Kabupaten Sleman memiliki 2 TPST yang ditangani oleh PEMDA dan 1 TPST ditangani oleh LSM dengan sampah masuk TPST sebanyak 10.804,00 Ton/Tahun dan berhasil diolah 86,76% atau sebanyak 9.373,20 Ton/Tahun, sehingga sampah yang tidak terolah sebanyak 1.430,80 Ton/Tahun. Pada pengolahan sampah di TPST lebih efektif dibandingkan dengan TPS3R, dengan perbandingan sampah yang dapat diolah 86,76% (TPST) > 46,71% (TPS3R) meski jumlah unit TPS3R lebih banyak terdapat beberapa faktor yang menyebabkan sampah TPS3R tidak terolah dengan efektif dibandingkan dengan pengolahan TPST.

4. Sampah yang tidak dapat ditangani baik oleh TPS3R maupun TPST akan masuk ke TPA atau *Landfill* (sedang dalam proses *improvement* menjadi TPA berbasis TPST). Jumlah sampah masuk ke TPA menjadi akumulasi dari residu TPS3R, residu TPST, serta sampah lain yang tidak terolah. Kondisi ini menyebabkan kapasitas TPA semakin tertekan karena tidak ada pengolahan lanjutan yang signifikan sebelum sampah ditimbun. Jumlah sampah hasil dari simulasi *existing* di TPA terdapat sebanyak 9.198 ton/tahun pada tahun 2024 (99% sama dengan data SIPSN) sedangkan pada tahun 2034 didapat sampah menumpuk bertambah sebanyak 17.400,99 ton/tahun di TPA (berbanding lurus dengan penambahan jumlah penduduk) dan pada *landfill* didapat sebanyak 9.198 ton/tahun pada tahun 2024 (99% sama dengan data SIPSN) sedangkan pada tahun 2034 didapat sampah menumpuk bertambah sebanyak 16.832,97 ton/tahun di *Landfill* (berbanding lurus dengan penambahan jumlah penduduk).
5. Secara keseluruhan, dinamika pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman masih sangat bergantung pada pertumbuhan penduduk dan kapasitas fasilitas pengolahan sampah. Optimalisasi pengolahan di TPS3R dan TPST menjadi faktor kunci dalam menekan laju peningkatan sampah masuk ke TPA, sekaligus menjaga keberlanjutan sistem pengelolaan persampahan di daerah tersebut.

C. Hasil Simulasi Model *Existing*

Berdasarkan hasil *running* model, didapatkan hasil dari simulasi model *existing*, yang dapat dilihat pada Gambar di bawah ini:

Time	Jumlah Penduduk (Individu)	Timbulan Sampah (Ton)	TPS3R (Ton)	TPST (Ton)	TPA (Ton)	Landfill (Ton)
01 Jan 2024	1.345.872,00	230.764,00	20.791,00	14.232,00	8.738,00	8.345,00
01 Jan 2025	1.374.673,00	231.091,72	22.140,37	15.114,08	13.931,45	8.781,90
01 Jan 2026	1.404.091,00	235.900,96	22.875,42	15.249,74	14.372,34	9.478,47
01 Jan 2027	1.434.138,00	240.945,23	23.497,70	15.543,40	14.904,32	10.197,09
01 Jan 2028	1.464.829,00	246.101,25	24.071,13	15.871,47	15.324,13	10.942,31
01 Jan 2029	1.496.177,00	251.367,88	24.623,87	16.210,50	15.652,12	11.708,51
01 Jan 2030	1.528.195,00	256.747,26	25.170,87	16.557,33	15.930,96	12.491,12
01 Jan 2031	1.560.898,00	262.241,63	25.720,23	16.911,65	16.187,94	13.287,67
01 Jan 2032	1.594.302,00	267.853,54	26.276,34	17.273,56	16.438,13	14.097,06
01 Jan 2033	1.628.419,00	273.585,73	26.841,69	17.643,21	16.689,68	14.918,97
01 Jan 2034	1.663.267,00	279.440,29	27.417,73	18.020,78	16.947,01	15.753,45

Gambar 4.4 Hasil Simulasi Model *Existing* Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman.

Hasil simulasi pada Gambar menunjukkan kapasitas TPA dan *landfill* pada tahun 2034 adalah >10.000 ton. Daya tampung sampah maksimal yang dapat ditampung TPA Piyungan adalah 10.000 ton dari kabupaten Sleman (Setelah ditetapkan kebijakan Desentralisasi sampah daerah). Jumlah Penduduk bertambah sesuai dengan data pertumbuhan penduduk beserta kenaikan sampah setiap tahun berdasarkan hasil simulasi *existing*. TPS3R hanya mampu menangani sampah sebanyak 26.851 ton pada tahun 2034, sedangkan TPST dapat mengolah sampah sebanyak 17.648 ton pada tahun 2034, sisa sampah yang lain di proses oleh bank sampah unit yang berjumlah 1.144 unit tersebar diseluruh Sleman dan komposting skala RT/RW yang berjumlah 13.210 di seluruh Sleman, tidak digunakan dalam proses penelitian ini, karena berdasarkan data historis di SIPSN kebijakan Desentralisasi mampu menangani sampah di hulu. Antisipasi perlu dilakukan untuk mencegah penuhnya kapasitas TPA Piyungan pada tahun 2034. Model *existing* pengelolaan sampah kemudian dikembangkan dengan menambah upaya-upaya pengolahan sampah di sisi tengah dan hilir untuk mencegah sampah masuk dan tertimbun di *landfill* tanpa ada pengolahan lebih lanjut. Selain itu bentuk upaya pengelolaan sampah dilakukan pada sisi tengah berguna untuk memaksimalkan upaya pemrosesan dan pengolahan sampah sebelum masuk ke TPA, sedangkan upaya di hilir dilakukan sebagai upaya mengurangi laju *open dumping* pada *landfill* atau TPA Piyungan.

D. Verifikasi dan Validasi Model *Eksisting*

Verifikasi model dilakukan dengan mengidentifikasi apakah saat melakukan *running* model ada ketidaksesuaian yang menyebabkan *error* pada *coding* maupun formula model. Setelah dilakukan pengecekan, model *existing* pengelolaan sampah yang dibuat dianggap *verified* karena tidak ditemukan *error* baik pada *coding* maupun formula yang dijalankan. Kemudian dilakukan validasi model dengan membandingkan hasil perhitungan manual dengan hasil simulasi. Validasi terdiri dari evaluasi model peramalan untuk menentukan bagaimana kemungkinan kinerja model dalam penerapan yang diinginkan (Montgomery, Jennings, & Kulahci, 2008).

Tabel 4.14 Verifikasi dan Validasi Model *Eksisting*

Validasi	Jumlah Penduduk	Jumlah Sampah	TPS3R	TPST	TPA	Jumlah Tahun 2024
Manual (Xm)	1.318.086,0	219.653,6	21.822,57	13.359,0	9.198,00	1.582.119,2 1
Simulasi <i>Existing</i> (Xs)	1.345.872,0	230.764,0	20.791,00	14.232,0	8.738,00	1.620.397,2 5

Error (Xm-Xs)	-27.786,00	-11.110,40	1.031,57	-873,21	460,00	-38.278,04
Absolute error (Xm – Xs)	27.786,00	11.110,40	1.031,57	873,21	460,00	41.261,18
Square of Error (Xm – Xs)²	771.061.796,00	123.441.043,00	1.064.138,67	762.495,00	211.600,00	897.541.071,00
Relative error (Xm – Xs / Xm)	0,0211 (2,11%)	0,0506 (5,06%)	0,0473 (4,73%)	0,0654 (6,54%)	0,0500 (5,00%)	0,2343 → 23,43%
Total (Xm) = 1.582.119,21				Total Error (Xm-Xs) = -38.278,04		
Total (Xs) = 1.620.397,25				Total Square Error (Xm – Xs) ² = 897.541.071,00		
Total (Xm – Xs) /absolute error = 41.261,18				Total Rl Er (Xm – Xs /Xm)= 0,2343		

Nilai MAD, MSE, dan MAPE dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$\text{MAD (Mean Absolute Deviation)} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |X_m - X_s|$$

$$\begin{aligned} \text{MAD menghitung rata-rata dari selisih absolut,} &= \frac{1}{5} (41.261,18) \\ \text{antara nilai prediksi dan nilai aktual.} &= 8.252,24 \text{ (MAD)} \end{aligned}$$

$$\text{MSE (Mean Squared Error)} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_m - X_s)^2$$

$$\begin{aligned} \text{MSE menghitung rata-rata dari selisih kuadrat} &= \frac{1}{5} (896.541.071) \\ \text{antara nilai prediksi dan nilai aktual.} &= 179.308.214 \text{ (MSE)} \end{aligned}$$

$$\text{MAPE (Mean Absolute Percentage Error)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{t=1}^n \frac{|X_m - X_s|}{X_m} \right) \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{MAPE menghitung rata-rata dari selisih persentase} &= \frac{1}{5} (0,2344) \times 100 \\ \text{antara nilai prediksi dan nilai aktual.} &= 0,04688(4,69\%) \text{ (MAPE)} \end{aligned}$$

Tabel 4.14 merupakan hasil uji validasi sistem *existing* dimana X_m merupakan data perhitungan manual rata-rata Jumlah Penduduk, Jumlah Sampah, TPS3R, TPST dan Jumlah Sampah pada tahun 2024 sebanyak 1.582.119,21, X_s merupakan data kapasitas hasil simulasi rata-rata Jumlah Penduduk, Jumlah Sampah, TPS3R, TPST dan Jumlah Sampah pada tahun 2024 sebanyak 1.620.397,25. MAD (*Mean Absolute Deviation*) merupakan Deviasi Absolut

Rata-rata, berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai MAD adalah 8.252,24 dan nilai MSE (*Mean Square Error*) merupakan Kesalahan Kuadrat rata-rata hasil perhitungannya diperoleh hasil adalah 179.308.214. Sedangkan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) merupakan Kesalahan Persentase Absolut Rata-rata, berdasarkan perhitungan didapatkan nilai adalah 4,69%, nilai tersebut berada di bawah batas ketentuan validitas perhitungan MAPE. Dimana nilai $MAPE < 10\%$ menunjukkan kemampuan model peramalan sangat baik (Maricar, 2019).

4.2.2 Skenario Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman

Terdapat empat skenario alternatif penanganan sampah di proses sisi tengah dan hilir sebagai upayaantisipasi penuhnya kapasitas di TPA Piyungan dari Sampah Kabupaten Sleman. Berikut ini merupakan skenario alternatif penanganan sampah Kabupaten Sleman:

A. Skenario 1 Penambahan Pengolahan Sampah Pusat Olah Organik (POO)

Skenario 1 atau Pusat Olah Organik (POO) merupakan strategi pengelolaan sampah yang dikembangkan untuk mengurangi sampah organik di hilir selain itu juga untuk memperbaiki aliran sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman dengan menekankan keterkaitan antara jumlah timbulan sampah. skenario ini berfokus pada pengurangan penumpukan sampah yang tidak terproses di TPS3R maupun TPST dengan cara menambahkan unit POO di hilir yang adaptif sesuai kebutuhan. Artinya, ketika jumlah penduduk meningkat, maka timbulan sampah juga meningkat. Sampah tersebut masuk ke jalur pengolahan melalui TPS3R dan TPST, di mana sebagian diproses menjadi sampah terolah. Namun, pada sistem *existing*, selalu ada sisa sampah yang tidak terproses dan akhirnya menuju TPA hingga *landfill*. Pada skenario POO, model SFD menunjukkan adanya pusat olah organik tambahan yang membantu memproses sebagian sampah organik sebelum masuk ke TPA dan *landfill*. Unit POO merupakan penambahan *improvement* di TPA berbasis TPST. Aliran sampah dari TPS3R dan TPST yang sebelumnya langsung ke TPA dan *landfill* kini dipilah lagi sehingga volume yang benar-benar masuk TPA maupun *landfill* dapat ditekan. Pembentukan model skenario 1 membutuhkan asumsi pada variabel-variabel penyusun sistem. Asumsi tersebut antara lain:

1. Jumlah penduduk diasumsikan sebagai faktor utama timbulan sampah. Semakin tinggi angka kelahiran dan imigrasi, jumlah penduduk meningkat, sehingga volume sampah juga bertambah. Sebaliknya, emigrasi dan kematian menurunkan jumlah sampah.

2. Rata-rata timbunan sampah per individu dianggap konstan. Artinya, setiap orang menghasilkan jumlah sampah yang sama per hari, sehingga kenaikan populasi langsung meningkatkan jumlah total sampah.
3. Kapasitas TPS3R dibatasi oleh efisiensi efektifitas pengolahan pada skenario *existing*. Namun pada skenario 1 dilakukan perbaikan mengenai target pengolahan dan efektifitas efisiensi TPS3R berdasarkan prinsip Kaizen (perbaikan berkelanjutan meskipun sedikit demi sedikit) dengan *baseline* efektifitas TPS3R dengan rata-rata sebesar 46,71%.
4. TPST dibatasi oleh efisiensi efektifitas pengolahan pada skenario *existing*. Namun pada skenario 1 dilakukan perbaikan mengenai target pengolahan dan efektifitas efisiensi TPST berdasarkan prinsip Kaizen (peningkatan target berkelanjutan meskipun sedikit demi sedikit) dengan *baseline* efektifitas TPST dengan rata-rata sebesar 86,67%.
5. Pusat Olah Organik (POO) hanya berperan dalam mengolah sampah organik, misalnya untuk dijadikan Biogas / Biodigester. POO sendiri berfokus mengurangi sampah di hilir TPA dan *landfill* serta membantu TPA berbasis TPST. Efisiensi Residu POO sendiri didapat dari data historis pengolahan sampah oleh POO yang telah ada, sehingga skenario ini hanya menambahkan unit POO yang berada di hilir dengan konsep *zero/no waste* maximal selama 10 tahun kedepan TPA dan *landfill* 0.
6. *Landfill* dan TPA menjadi tempat akhir pembuangan sampah. Semua sampah yang tidak berhasil diolah di TPS3R dan TPST akan masuk ke *landfill* dengan proses lanjutan yang dilakukan oleh POO.
7. Hubungan antar variabel dianggap linier dan sederhana. Misalnya, kenaikan penduduk langsung menambah jumlah sampah secara proporsional, dan efisiensi fasilitas pengolahan sampah tidak berubah dari tahun ke tahun, sesuai dengan perhitungan data historis SIPSN.
8. Tidak ada faktor eksternal besar yang memengaruhi sistem. Artinya, asumsi dibuat tanpa memperhitungkan perubahan teknologi, kebijakan baru, atau perubahan perilaku masyarakat dalam periode simulasi.
9. Dari asumsi ini, skenario 1 menampilkan alur sederhana: pertumbuhan penduduk menambah timbunan sampah, sebagian bisa diolah TPS3R dan TPST, sebagian sampah organik masuk ke POO, dan sisanya tetap berakhir di TPA dan *landfill*.

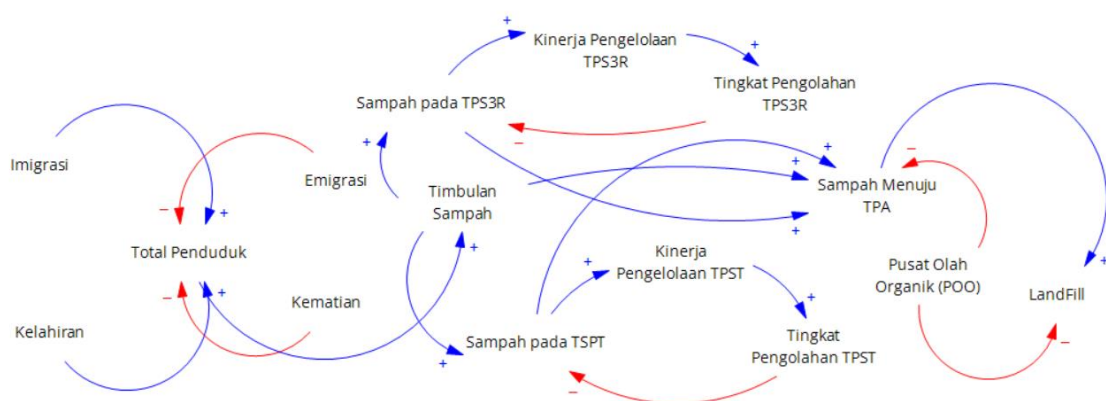
Skenario 1 memiliki batasan-batasan yang diterapkan dalam membangun model. Batasan dilakukan agar model yang dibangun dapat terkendali dan relevan dengan kondisi nyata. Batasan-batasan tersebut antara lain, sebagai berikut:

1. Selama berjalannya simulasi, model hanya memperhitungkan jumlah sampah yang dihasilkan di kabupaten Sleman (transfer sampah dari kabupaten/kota lain tidak diperhitungkan).
2. Fasilitas pengolahan hanya melibatkan TPS3R, TPST, Pusat Olah Organik (POO), TPA dan *landfill*. Tanpa melibatkan Bank sampah dan Komposting RT.
3. Skenario 1 hanya melibatkan usaha pengelolaan sampah pada sisi hilir dan tengah (seperti penyediaan TPS3R, TPST, POO dan lain-lain) tanpa di hulu.
4. Timbulan sampah per individu, Dianggap konstan, sehingga total sampah hanya dipengaruhi oleh jumlah penduduk.

Asumsi dan batasan tersebut merupakan landasan pembangunan sistem pada skenario 1. Kebijakan pada skenario 1 dikembangkan bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengelolaan POO terhadap kapasitas *landfill* pada TPA Piyungan berbasis TPST. Berikut merupakan pengembangan model skenario 1.

i. *Causal Loop Diagram* (CLD) Skenario 1 Pengelolaan POO

Interaksi sebab akibat pada skenario 1 digambarkan pada Gambar dibawah ini



Gambar 4.5 *Causal Loop Diagram* (CLD) Model Skenario 1 Penglolaan Sampah Kab. Sleman.

Terdapat beberapa *loop* yang menggambarkan interaksi antara jumlah penduduk, timbulan sampah, dan kapasitas pengolahan.

Causal Loop Diagram (CLD) pada skenario 1 menggambarkan dinamika sistem pengelolaan sampah yang dipengaruhi oleh pertumbuhan penduduk, timbulan sampah, serta kapasitas pengolahan pada TPS3R, TPST, dan Pusat Olah Organik (POO), hingga berakhir

pada *landfill* (TPA). Hubungan antarvariabel membentuk beberapa *loop* umpan balik yang menunjukkan pola penguatan (*reinforcing*) dan penyeimbangan (*balancing*) dalam sistem.

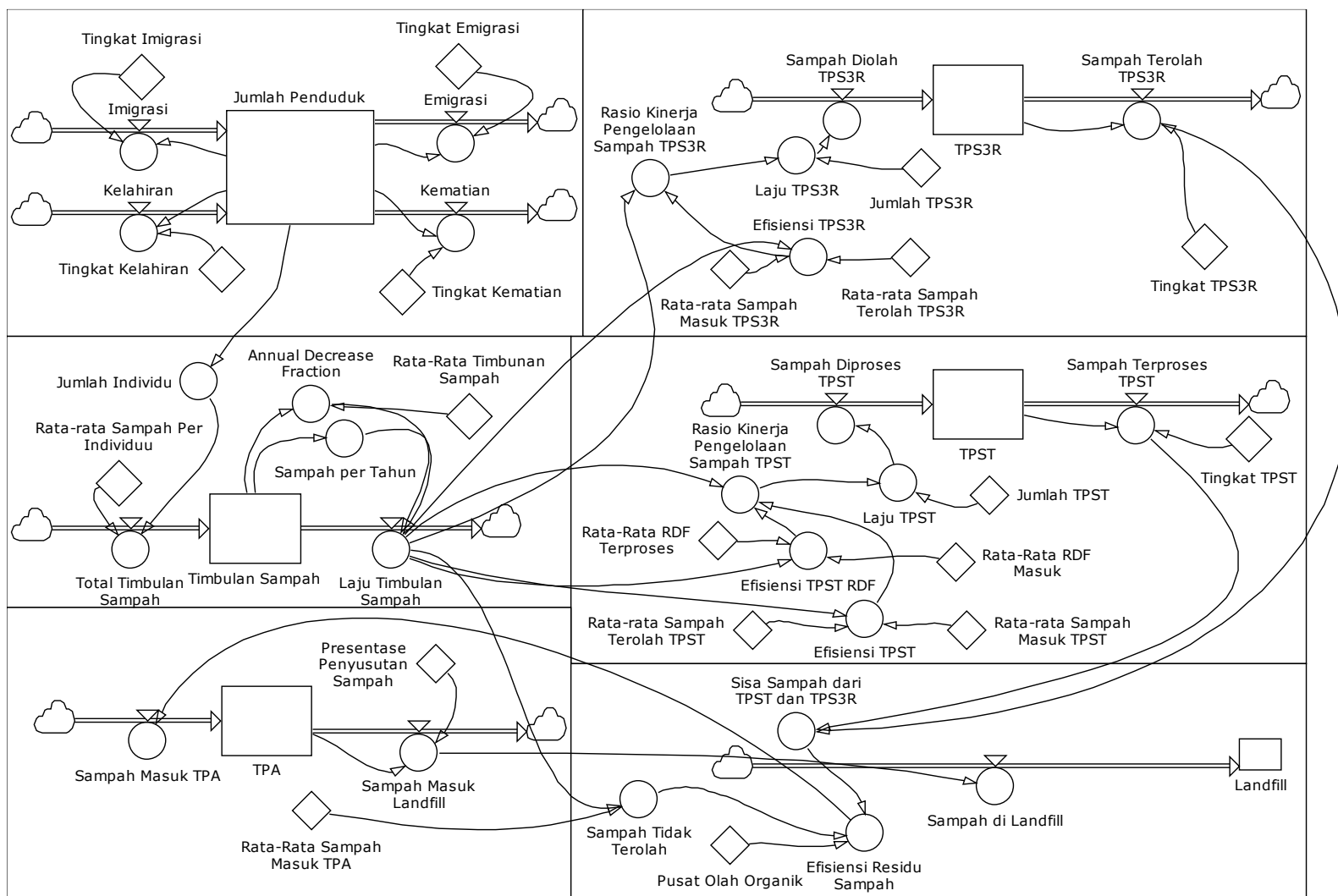
Pertumbuhan jumlah penduduk menjadi pendorong utama peningkatan timbulan sampah. Imigrasi dan kelahiran memberikan pengaruh positif terhadap jumlah penduduk, sedangkan emigrasi dan kematian menurunkannya. Peningkatan jumlah penduduk secara langsung meningkatkan jumlah sampah yang dihasilkan. Hubungan yang bersifat searah ini membentuk *loop* penguat, yang menunjukkan bahwa tanpa intervensi, pertumbuhan penduduk akan terus memperbesar timbulan sampah.

Peningkatan jumlah sampah mendorong aliran sampah menuju TPS3R dan meningkatkan volume sampah yang diolah. Namun, keterbatasan kapasitas dan efisiensi pengolahan menyebabkan tidak seluruh sampah dapat tertangani. Kondisi ini menciptakan mekanisme penyeimbang, karena kemampuan TPS3R dalam mengurangi timbulan sampah dibatasi oleh kapasitas sistem yang tersedia.

Dinamika serupa juga terjadi pada TPST. Meningkatnya jumlah sampah yang masuk ke TPST meningkatkan jumlah sampah yang diproses, tetapi keterbatasan fasilitas dan unit pengolahan menyebabkan sebagian sampah tetap tidak terproses. Keterbatasan ini membentuk *loop* penyeimbang yang menahan efektivitas pengolahan meskipun input sampah terus meningkat.

Sampah yang tidak terolah di TPS3R dan TPST meningkatkan aliran sampah menuju Pusat Olah Organik (POO) dan TPA. Dalam kondisi kapasitas POO yang terbatas, peningkatan beban pengolahan berpotensi menghasilkan residu yang tetap harus dibuang ke *landfill*. Hubungan ini bersifat saling memperkuat dan membentuk *loop* penguat yang berkontribusi pada peningkatan beban sistem pembuangan akhir.

Secara keseluruhan, CLD skenario 1 menunjukkan bahwa sistem pengelolaan sampah didominasi oleh *loop* penguat yang mendorong peningkatan timbulan sampah dan beban *landfill*, sementara *loop* penyeimbang dari TPS3R, TPST dan POO belum cukup kuat untuk mengendalikan sistem. Tanpa peningkatan kapasitas dan efisiensi pengolahan, tekanan terhadap TPA dan *landfill* akan terus meningkat seiring waktu.



Gambar 4.6 Stock Flow Diagram (SFD) Model Skenario 1 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman

Model SFD dikembangkan dari hubungan spesifik antar komponen dalam CLD. Model SFD dibangun berdasarkan asumsi, batasan serta data dan kondisi terkini dari pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman. Komponen *stock*, *auxiliary*, dan konstanta pada SFD memiliki nilai yang berjalan dengan aliran (*flow*) masuk atau keluar dan nilai tersebut akan berubah seiring dengan berubahnya waktu. Sistem yang tergambar pada Gambar 4.6 merupakan rancangan sistem pengelolaan sampah yang menerapkan alternatif strategi POO (Pusat Olah Organik). Penjabaran mengenai sistem pengelolaan sampah dengan menerapkan alternatif POO pada skenario 1 adalah sebagai berikut:

1. Persentase pertumbuhan penduduk setiap tahun nya meningkat pada tahun 2024 1.345.872 jiwa menghasilkan sampah 230.764 ton yang otomatis akan berdampak pada meningkatkan timbulan sampah. Timbulan sampah pada tahun 2034 meningkat menjadi 279.440 ton. Sistem pengelolaan sampah saat ini bergantung pada TPS3R, TPST, dan akhirnya TPA Piyungan (sedang dalam proses *improvement* TPA berbasis TPST). Namun, kapasitas TPA terbatas (10.000 ton), sementara jumlah sampah terus meningkat hingga ribuan ton per tahun. Jika tidak ada perubahan pola pengelolaan, sampah yang masuk ke TPA akan terus meningkat, mempercepat *overload*.
2. Pada tahun 2024 sebanyak 20.791 ton sampah ditangani TPS3R, dan pada tahun 2034 naik menjadi 41.107 ton. Peningkatan ini menunjukkan adanya kontribusi signifikan TPS3R dalam memilah dan mengolah sampah, meskipun persentasenya masih kecil dibanding total timbulan (karena jumlah TPS3R tidak bertambah, peningkatan efisiensi hanya tertumpu pada prinsip Kaizen dengan efektifitas *baseline* TPS3R sebesar 46,71%. Berdasarkan data historis SIPSN) Konsep Pusat Olah Organik (POO) Skenario ini menekankan pada pengolahan sampah organik di hilir (mengolah dan meminimalkan dampak sampah yang tersisa dari proses tengah dan hulu), sehingga sisa sampah tengah seperti TPS3R dan TPST diproses oleh POO kembali. Dengan adanya POO, sebagian besar sampah organik langsung diolah menjadi Biogas / Biodigester dan produk lain, mengurangi volume sampah yang masuk ke rantai pengolahan berikutnya. Artinya, POO bertindak sebagai filter akhir yang signifikan untuk menekan jumlah sampah ke TPA dan *landfill*.
3. Jumlah Penduduk menghasilkan peningkatan Jumlah Sampah per Tahun. Sampah ini kemudian terbagi ke TPS3R, TPST, dan sebagian masuk ke TPA. Dengan adanya POO, alur sisa-sisa sampah organik diproses kembali, sehingga:
 - Input sampah dari TPS3R dan TPST ke TPA berkurang.

- Sampah masuk ke *Landfill* lebih kecil karena sebagian sudah terselesaikan di POO.

Pada tahun 2034 model *existing*, jumlah sampah TPA didapat total 16.947 ton, dengan *landfill* sebesar 15.753 ton. Tahun 2034 model skenario 1, jumlah sampah berkurang menjadi 0,01 ton, *landfill* berkurang menjadi 0,01 ton. Sehingga dengan penambahan pengelolaan sampah di hilir oleh POO efektif dalam menyaring sampah sebelum masuk TPA dan *landfill*. Namun perlu ditambahkan setidaknya 4 unit POO agar sampah di TPA dan *landfill* menjadi 0. Tanpa adanya POO atau mekanisme pengolahan sampah organik, *landfill* akan jauh lebih besar dari angka tersebut.

TPST (Tempat Pengolahan Sampah Terpadu) pada tahun 2024 memproses 14.232 ton. Pada tahun 2034 meningkat menjadi 41.107 ton sesuai dengan korelasi pertambahan jumlah penduduk dan efektifitas TPST berdasarkan prinsip Kaizen dengan *baseline* sebesar 86,76% tanpa menambah unit TPST, sehingga semakin lama semakin besar jumlah yang diproses. TPA (Tempat Pembuangan Akhir) 2024 sampah masuk TPA 9.198 ton. Sehingga pada tahun 2034 meningkat menjadi 24.027 ton. Walaupun naik, angka ini tetap kecil dibanding total timbulan sampah (273 ribu ton). Ini menunjukkan peran besar pengolahan di hulu (Desentralisasi) dan hilir, termasuk POO, dalam menahan laju pertambahan sampah ke TPA.

POO menurunkan beban TPA dan *landfill* secara signifikan dengan menangani sampah organik yang lebih mudah diolah dan menjadi mayoritas timbulan. Sistem lebih seimbang, karena TPS3R dan TPST tidak *overload* sehingga TPA tidak cepat penuh. Skenario ini juga memberi peluang ekonomi (Biogas / Biodigester energi dari sampah organik) serta manfaat lingkungan (mengurangi gas metana dari sampah organik di TPA dan *landfill*).

Setelah menyusun dan menformulasikan model, dilakukan *running* model untuk diteliti apakah ada ketidaksesuaian yang menyebabkan *error* pada *coding* maupun formula model. Setelah dipastikan tidak ada *error*, model dijalankan. Berikut merupakan hasil dari *running* model simulasi skenario 1 yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

[Non-Commercial Use]

Time	Penduduk (Ind)	Timbulan Sampah (T)	TPS3R (Ton)	TPST (Ton)	TPA (Ton)	Landfill (Ton)
01 Jan 2024	1.345.872,00	230.764,00	20.791,00	14.232,00	8.738,00	8.345,00
01 Jan 2025	1.374.673,00	231.091,72	27.668,71	19.523,53	8.369,33	6.994,86
01 Jan 2026	1.404.091,00	235.900,96	31.358,78	20.249,70	7.698,92	5.701,69
01 Jan 2027	1.434.138,00	240.945,23	33.671,59	20.713,50	6.933,17	4.512,11
01 Jan 2028	1.464.829,00	246.101,25	35.267,08	21.160,50	6.101,41	3.440,84
01 Jan 2029	1.496.177,00	251.367,88	36.488,20	21.613,81	5.213,99	2.498,09
01 Jan 2030	1.528.195,00	256.747,26	37.517,70	22.076,41	4.274,91	1.692,46
01 Jan 2031	1.560.898,00	262.241,63	38.453,13	22.548,87	3.285,11	1.031,93
01 Jan 2032	1.594.302,00	267.853,54	39.346,70	23.031,41	2.243,86	524,34
01 Jan 2033	1.628.419,00	273.585,73	40.226,38	23.524,28	1.149,55	177,63
01 Jan 2034	1.663.267,00	279.440,29	41.107,32	24.027,71	0,01	0,01

Gambar 4.7 Hasil Simulasi Skenario 1

Gambar 4.7 menunjukkan hasil simulasi skenario 1. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa antara tahun 2024–2034 jumlah penduduk Sleman naik dari 1,3 juta menjadi 1,6 juta jiwa, sehingga timbunan sampah meningkat dari 230 ribu ton menjadi 273 ribu ton. Dalam skenario Pusat Olah Organik (POO), sebagian besar sampah organik diolah di akhir setelah pengolahan TPS3R dan TPST sehingga beban sampah di TPA dan *landfill* berkurang. Meskipun begitu, jumlah sampah yang masuk TPA dan *landfill* terus mengalami kenaikan sehingga perlu menambahkan 4 unit POO di hilir kemudian meningkatkan efisiensi dan efektifitas guna membantu POO dengan TPS3R menjadi 96,64% dari *baseline* 46,71% dan TPST menjadi 100% dari *baseline* 86,76% dengan prinsip Kaizen agar sampah di TPA dan *landfill* 0.

Pembentukan POO sendiri didasarkan pada data historis SIPSN didapat dengan POO (Pusat Olah Organik) oleh Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Sleman adalah Sampah Masuk = 1,862.23 ton (tahun 2024) dan Sampah Diolah = 1,862.23 ton (tahun 2024), sehingga 1 unit POO dapat menangani sampah sebanyak >1.862,23 ton/tahun, dengan perbaikan alur sisa sampah dari hulu dan tengah tidak langsung menuju TPA melainkan di proses oleh POO sehingga menekan jumlah sampah menuju TPA dan *Landfill*. Dengan kata lain, semakin banyak unit POO semakin optimal penanganan sampah di hilir dan semakin sedikit sampah TPA maupun *landfill*.

B. Skenario 2 Pencacahan Sampah Plastik TPS3R dan pengelolaan POO

Skenario 2 dikembangkan dengan upaya pembangunan pengelolaan sampah plastik. TPS3R pada skenario 2 dibuat untuk menangani jenis sampah anorganik yaitu pencacahan plastik. Latar belakang dibangunnya TPS3R dengan produksi cacahan plastik dikarenakan sampah plastik bukan jenis sampah yang dapat terurai dalam waktu singkat dan sampah plastik berkontribusi menyumbang sampah sebanyak 71.770,84 ton/tahun (didapat dari hasil rata-rata data historis SIPSN sampah plastik tahun 2021 hingga 2024) sehingga total sampah anorganik plastik sendiri menyumbang sampah sebesar 32.77% dari total komposisi sampah. Sehingga sangat penting dilakukan perbaikan pengolahan sampah anorganik yang dilakukan TPS3R agar dapat mengurangi sampah plastik. Selain TPS3R, skenario 2 juga melakukan upaya pengelolaan sampah di hilir oleh POO yang bertujuan untuk mengurangi laju *open dumping* pada TPA Piyungan. Asumsi penyusun sistem pada skenario 2 antara lain sebagai berikut:

1. Jumlah Penduduk dan Jumlah Sampah Diasumsikan peningkatan jumlah penduduk berasal dari faktor imigrasi dan kelahiran, sementara pengurangannya karena

emigrasi dan kematian. Pertumbuhan penduduk ini menjadi pendorong utama peningkatan jumlah sampah.

2. Jumlah Sampah dan Sampah diolah TPS3R dari total sampah yang dihasilkan, sebagian dapat ditangani TPS3R. Pada skenario ini, asumsi yang digunakan adalah setiap tahun terdapat dilakukan penambahan unit TPS3R anorganik berdasar simulasi sehingga kapasitas pengolahan plastik meningkat secara bertahap.
3. Sampah diolah TPS3R dan pencacahan sampah plastik setiap unit TPS3R diasumsikan dapat mengolah sampah anorganik menjadi cacahan plastik. Hasil pencacahan ini memiliki nilai ekonomi karena 90% cacahan plastik memiliki *value* yang cukup tinggi. Efisiensi TPS3R Pencacah Plastik didapat dari jumlah jenis sampah plastik (data SIPSN) dibagi dengan rata-rata rasio kinerja (sampah terolah oleh TPS3R) di seluruh TPS3R (data SIPSN).
4. *Input* sampah TPS3R tetap memiliki rata-rata yang sama berdasarkan dari data historis SIPSN, tetapi ditambah dengan unit TPS3R pencacah plastik yang memiliki daya tampung dan pemrosesan berasal dari perhitungan output sampah dari sumber (100%) dikurangi jumlah sampah plastik (32.77%) kemudian dibagi dengan rasio kinerja TPS3R berdasarkan data historis SIPSN sehingga dibutuhkan penambahan unit pencacah plastik minimal 2 unit pada tahun 2024 hingga 2034 agar sampah plastik bisa terolah dan mengurangi output sisa sampah TPS3R khususnya sampah plastik atau sampah anorganik yang sulit terurai.
5. Sampah plastik atau anorganik diproses oleh TPS3R pencacah plastik dan tidak diproses oleh TPST. Oleh karena itu sampah yang ditangani oleh TPST akan lebih sedikit dan efisiensi efektifitas TPST akan meningkat. Namun sebagian sampah TPS3R pencacah plastik dapat diproses, sebagian tetap tidak terproses, karena beberapa macam faktor seperti sampah anorganik yang sudah rusak dan mendekati masa terurai sehingga tidak dapat diproses karena akan menghasilkan produk *recycle* yang tidak berkualitas. Sehingga tetap ada *output* dari TPS3R namun berkurang.
6. TPS3R dan TPST dan Pusat Olah Organik (POO) menerapkan prinsip Kaizen (peningkatan target berkelanjutan meskipun sedikit demi sedikit) dengan *baseline* yang sama seperti skenario 1 agar TPA dan landfill pada tahun 2034 menjadi 0.
7. *Landfill* dan TPA mengalami Penyusutan Kapasitas Diasumsikan *landfill* mengalami penyusutan alami (sampah organik dan anorganik terurai kemudian sebagian sampah anorganik di ambil pemulung maupun pengepul di daerah TPA). Penyusutannya

sebesar 3% per tahun, sehingga walaupun TPA tetap menampung sampah, daya tampungnya semakin berkurang setiap tahun.

Dengan demikian, asumsi skenario 2 menekankan bahwa peningkatan jumlah TPS3R anorganik dan pencacahan plastik dapat membantu mengurangi beban sampah dari TPST ke *Landfill* dan TPA. Namun karena keterbatasan kapasitas masih ada pada setiap tahap (TPS3R, TPST, maupun *landfill*), sistem tetap menunjukkan kombinasi antara *loop balancing* dan *reinforcing*.

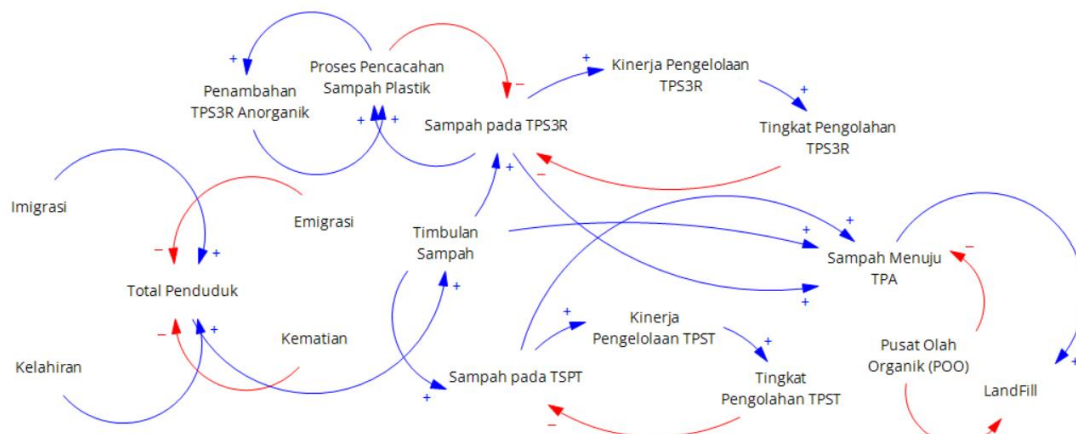
Skenario 2 memiliki batasan-batasan yang diterapkan dalam membangun model. Batasan dilakukan agar model yang dibangun dapat terkendali dan relevan dengan kondisi nyata. Batasan-batasan tersebut antara lain, sebagai berikut:

1. Selama berjalannya simulasi, model hanya memperhitungkan jumlah sampah yang dihasilkan di kabupaten Sleman (transfer sampah dari kabupaten/kota lain tidak diperhitungkan).
2. TPS3R pencacah plastik pada skenario 2 hanya menangani sampah anorganik berupa plastik (timbunan jenis sampah tertinggi ke 2, setelah limbah sisa makanan). Jenis sampah anorganik lainnya seperti kaca, logam, kaleng, dan lainnya tidak ditangani.

Setelah asumsi dan batasan terbentuk, hubungan sebab-akibat pada sistem dapat digambarkan menggunakan *Causal Loop Diagram* (CLD). Kemudian model diformulasikan menggunakan *Stock Flow Diagram* (SFD). Setelah formulasi model dijalankan, dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

ii. *Causal Loop Diagram* (CLD) Skenario 2 pencacahan sampah plastik

Interaksi sebab akibat pada skenario 2 digambarkan pada Gambar dibawah ini, sebagai berikut.



Gambar 4.8 Casual Loop Diagram (CLD) Model Skenario 2 Pengelolaan Sampah Kab. Sleman

Pada skenario 2, struktur dasar sistem pengelolaan sampah masih mengacu pada skenario 1, namun ditambahkan intervensi berupa proses pencacahan sampah plastik pada TPS3R anorganik. Penambahan ini dimaksudkan untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam mereduksi sampah anorganik sejak tahap awal pengelolaan, sehingga pengurangan beban TPA tidak hanya bergantung pada Pusat Olah Organik (POO), tetapi juga pada pengolahan sampah plastik yang lebih spesifik dan terarah.

Pertumbuhan jumlah penduduk tetap menjadi faktor dominan dalam peningkatan timbulan sampah. Imigrasi dan kelahiran meningkatkan jumlah penduduk, sedangkan emigrasi dan kematian menurunkannya. Peningkatan jumlah penduduk secara langsung meningkatkan jumlah sampah yang dihasilkan, baik organik maupun anorganik. Hubungan ini membentuk *loop* penguat yang terus mendorong peningkatan tekanan terhadap sistem pengelolaan sampah apabila tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas pengolahan.

Peningkatan jumlah sampah anorganik mendorong penambahan aktivitas TPS3R anorganik serta intensifikasi proses pencacahan sampah plastik. Proses pencacahan Plastik meningkatkan nilai guna dan volume sampah plastik yang dapat diolah, sehingga memperbesar proporsi sampah yang tertangani di TPS3R. Hubungan ini membentuk *loop* penguat yang memperkuat kapasitas reduksi sampah anorganik di tingkat TPS3R dan berkontribusi pada penurunan aliran sampah plastik ke TPA.

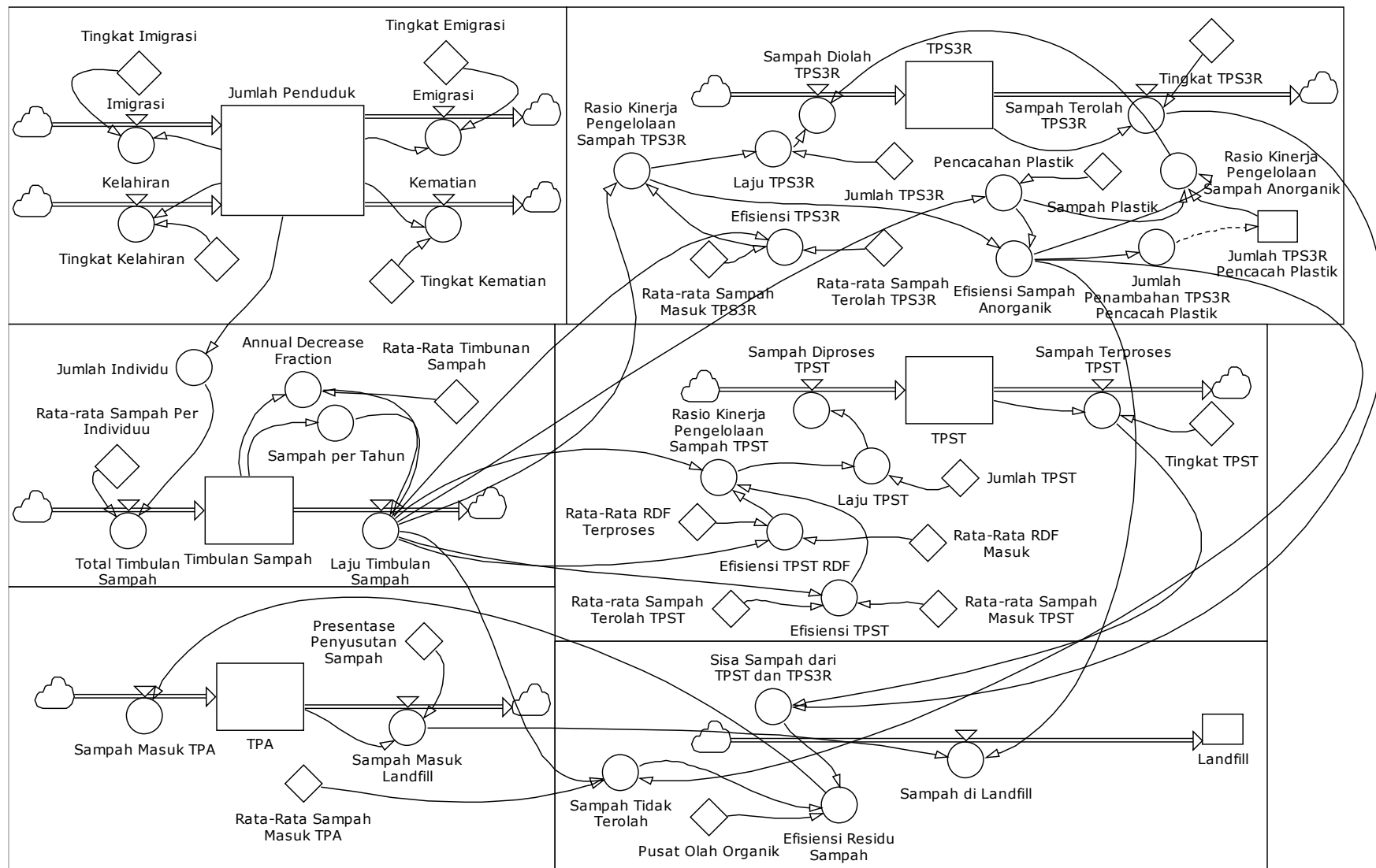
Namun demikian, efektivitas proses pencacahan tetap dipengaruhi oleh keterbatasan kapasitas, teknologi, dan sumber daya yang tersedia di TPS3R. Ketika jumlah sampah yang masuk melebihi kapasitas pencacahan, sebagian sampah plastik tetap tidak tertangani dan menjadi residu. Kondisi ini menciptakan mekanisme penyeimbang yang menahan laju peningkatan efektivitas pencacahan meskipun timbulan sampah terus meningkat.

Selain TPS3R, TPST tetap berperan sebagai fasilitas pengolahan lanjutan. Peningkatan jumlah sampah yang masuk ke TPST meningkatkan volume sampah yang diproses, namun keterbatasan kapasitas dan unit pengolahan menyebabkan sebagian sampah tetap tidak terproses. Dinamika ini membentuk *loop* penyeimbang yang membatasi kemampuan TPST dalam mengurangi timbulan sampah secara keseluruhan, serupa dengan yang terjadi pada skenario 1.

Keberadaan Pusat Olah Organik (POO) dalam skenario 2 tetap berfungsi untuk mengolah sampah organik. Namun, dengan adanya pencacahan plastik, peran POO menjadi lebih terfokus pada fraksi organik, sementara sebagian sampah anorganik telah direduksi di hulu. Meskipun demikian, residu dari TPS3R, TPST, dan POO tetap berkontribusi terhadap aliran sampah menuju TPA, terutama ketika kapasitas pengolahan tidak mencukupi.

Aliran sampah menuju *landfill* dalam skenario 2 menunjukkan bahwa penambahan Pencacah Plastik sampah anorganik dapat meringankan pekerjaan POO, TPS3R serta TPST yang menggunakan prinsip Kaizen, sehingga Pengolahan sampah lebih *balance* tidak memaksakan prinsip Kaizen yang ketat guna mencapai target *zero waste* pada tahun 2034.

Secara keseluruhan, skenario 2 menunjukkan bahwa penambahan proses pencacahan sampah plastik memperkuat mekanisme pengelolaan sampah di tengah dan meningkatkan kinerja sistem dibandingkan skenario 1. Meskipun *loop* penguat akibat pertumbuhan penduduk masih mendominasi dinamika sistem, keberadaan pencacahan plastik, bersama TPS3R, TPST, dan POO, menciptakan struktur sistem yang lebih seimbang. Namun, untuk mencapai pengurangan beban TPA yang berkelanjutan, peningkatan kapasitas, efisiensi, dan integrasi antar fasilitas pengolahan tetap menjadi faktor kunci.



Gambar 4.9 Stock Flow Diagram (SFD) Model Skenario 2 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman

Model SFD dikembangkan dari hubungan spesifik antar komponen dalam CLD. Model SFD dibangun berdasarkan asumsi, Batasan serta data dan kondisi terkini dari pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman. Komponen *stock*, *auxiliary*, dan konstanta pada SFD memiliki nilai yang berjalan dengan aliran (*flow*) masuk atau keluar dan nilai tersebut akan berubah seiring dengan berubahnya waktu. Sistem yang tergambar pada Gambar 4.9 merupakan rancangan sistem pengelolaan sampah yang menerapkan alternatif strategi Pencacahan plastik dan POO penjelasannya mengenai sistem pengelolaan sampah dengan menerapkan alternatif pencacahan plastik dan POO pada skenario 2 adalah sebagai berikut :

1. Jumlah penduduk Kabupaten Sleman terus meningkat dari 1.345.872 jiwa pada tahun 2024 menjadi 1.663.267 jiwa pada tahun 2034. Pertumbuhan penduduk ini sejalan dengan kenaikan timbulan sampah tahunan dari 230.764 ton pada tahun 2024 menjadi 279.440 ton pada tahun 2034. Data ini menegaskan perlunya strategi tambahan agar beban pengelolaan sampah tidak sepenuhnya ditanggung oleh TPA Piyungan (masih dalam pengembangan TPST) yang sudah terbatas kapasitasnya oleh 3 kabupaten lain.
2. TPS3R hanya mampu mengelola sekitar 41.107 ton sampah pada skenario 1. Namun, dengan adanya intervensi pencacahan plastik, kapasitas ini meningkat secara bertahap hingga mencapai 55.979 ton pada tahun 2034. Lonjakan ini mencerminkan peningkatan efisiensi dan kemampuan TPS3R dalam mengelola sampah anorganik, khususnya plastik yang volumenya besar namun sulit terurai.
3. Pada tahun 2024, TPST mengolah sekitar 14.232 ton sampah, dan pada tahun 2034 tetap sama menjadi 24.027 ton jumlahnya masih sama seperti pada skenario 1. Hal ini relatif moderat jika dibandingkan dengan peningkatan di TPS3R, yang menandakan bahwa sebagian besar plastik telah berhasil diproses lebih awal, sehingga pemrosesan sampah TPST berkurang pada pengolahan sampah anorganik namun efektifitas TPST tetap sama. Dengan demikian, TPST dapat lebih fokus pada pengelolaan sisa sampah anorganik (kaca, logam, dll) dan sampah organik, terutama produksi RDF.
4. Kontribusi pencacahan plastik terlihat dari peran TPA dan *Landfill*. Sampah yang langsung masuk ke TPA pada tahun 2024 tercatat 8.738 ton, sementara pada tahun 2034 menjadi 0,01 ton sesuai dengan prinsip CSCM dengan konsep *zero waste* . Meskipun tetap menerapkan prinsip Kaizen, jumlah peningkatan efektifitas efisinsi dapat dilakukan dengan lebih peralahan dengan adanya penampahan TPS3R Pencacah Plastik.
5. Pencacahan plastik juga memperkuat implementasi prinsip *circular supply chain management* dan *circular economy*. Plastik yang dicacah bukan hanya mengurangi volume melalui *reverse logistic*, tetapi juga memiliki nilai ekonomi sebagai bahan baku

industri daur ulang. Oleh karena itu, mengalihkan sekitar 55 ribu ton plastik ke TPS3R pada tahun 2034, sistem ini membuka peluang pengembangan rantai nilai daur ulang sekaligus mengurangi ketergantungan pada *landfill* sebagai solusi akhir.

6. Secara keseluruhan, skenario 2 pencacahan plastik dan POO menghasilkan keseimbangan sistem pengelolaan sampah, antara sampah anorganik yang diolah TPS3R dan sampah organik yang diolah POO. Data proyeksi menunjukkan bahwa TPS3R mampu menanggung sekitar 20% sampah total pada 2034 (55.979 ton dari 279.440 ton) dari seluruh 31 TPS3R dan tambahan dengan TPS3R pencacah plastik berkontribusi sebanyak >6.894,79 ton per 1 TPS3R pencacah plastik, pada *running* simulasi skenario 2 didapat tambahan 2 unit tambahan pencacah plastik sehingga total pengurangan sampah pencacahan plastik meningkat sebesar 55.158,32 ton atau 76,86% dari 71.770,84 ton total rata-rata timbunan sampah plastik selama 4 tahun terakhir berdasar data historis SIPSN). Kondisi ini menggambarkan pergeseran beban signifikan dari TPA menuju TPS3R, TPST dan POO, yang membuat pengelolaan sampah lebih berkelanjutan dan seimbang dalam mengurangi timbunan sampah di TPA dan *landfill* hingga menjadi *zero waste* pada tahun 2034 serta memperpanjang umur layanan TPA Piyungan.

Setelah Menyusun dan menformulasikan model, dilakukan *running* model untuk diteliti apakah ada ketidaksesuaian yang menyebabkan *error* pada *coding* maupun formula model. Setelah dipastikan tidak ada *error*, model dijalankan. Berikut merupakan hasil dari *running* model simulasi skenario 2 yang dapat di lihat pada gambar dibawah ini.

Non-commercial use only

Time	Penduduk (Induk)	Timbunan Sampah (T)	TPS3R (Ton)	TPST (Ton)	TPA (Ton)	Landfill (Ton)
01 Jan 2024	1.345.872,00	230.764,00	20.791,00	14.232,00	8.738,00	8.345,00
01 Jan 2025	1.374.673,00	231.091,72	33.674,51	19.523,53	8.301,98	6.911,72
01 Jan 2026	1.404.091,00	235.900,96	40.574,78	20.249,70	7.555,26	5.550,86
01 Jan 2027	1.434.138,00	240.945,23	44.724,13	20.713,50	6.713,07	4.324,18
01 Jan 2028	1.464.829,00	246.101,25	47.429,96	21.160,50	5.819,92	3.244,56
01 Jan 2029	1.496.177,00	251.367,88	49.377,18	21.613,81	4.895,19	2.317,18
01 Jan 2030	1.528.195,00	256.747,26	50.930,83	22.076,41	3.948,34	1.544,11
01 Jan 2031	1.560.898,00	262.241,63	52.285,70	22.548,87	2.983,92	925,97
01 Jan 2032	1.594.302,00	267.853,54	53.545,86	23.031,41	2.003,99	462,75
01 Jan 2033	1.628.419,00	273.585,73	54.767,03	23.524,28	1.009,32	154,19
01 Jan 2034	1.663.267,00	279.440,29	55.979,19	24.027,71	0,01	0,01

Non-commercial use only

Gambar 4.10 Hasil Simulasi Skenario 2

Gambar 4.10 menunjukkan hasil simulasi skenario 2. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa Jumlah penduduk sama dengan simulasi *existing* dan skenario 1 yakni penduduk Sleman naik dari 1,3 juta jiwa (2024) menjadi 1,6 juta jiwa (2034), dan juga timbunan sampah meningkat dari 230 ribu ton menjadi 279 ribu ton per tahun. Tanpa intervensi, TPA Piyungan akan semakin terbebani. Skenario 2 menekankan pencacahan plastik di TPS3R, sehingga sampah anorganik dapat diproses lebih awal kemudian sampah organik diproses oleh POO. Data menunjukkan TPS3R meningkat dari 20 ribu ton (2024) menjadi 55 ribu ton (2034), atau naik lebih dari 175% dibandingkan dengan skenario 1 didapat pemrosesan sampah TPS3R (2024) sebanyak 20.791 ton dan (2034) 55.979 ton. Dengan plastik lebih banyak diproses di TPS3R, TPST dapat fokus mengelola sampah organik dan sisa sampah anorganik selain plastik. Sementara itu, TPA dan *landfill* mengalami penurunan yang lebih signifikan dan lebih cepat dibandingkan dengan skenario 1, *landfill* menyentuh dibawah 1000 ton pada skenario 1 berada pada tahun 2032 sedangkan pada skenario 2 pada tahun 2031 telah menyentuh dibawah 1000 ton dan 0,1 ton pada tahun 2034. Hal ini terjadi karena ada keseimbangan antara pemrosesan sampah anorganik plastik oleh TPS3R dan sampah organik oleh POO di hilir. Secara proporsi, perbandingan selisih antara skenario 1 dan skenario 2 cukup signifikan pada tahun 2034 TPS3R dapat mengolah $55.979 \text{ ton} - 41.107 \text{ ton} = 14.872 \text{ ton}$ atau (36,18%) sampah meningkatkan pada pemrosesan TPS3R. Artinya, pencacahan plastik berhasil menggeser sebagian besar beban dari TPA ke pengolahan tengah, meringankan efektifitas prinsip Kaizen TPS3R, TPST, 2 unit POO dan memperpanjang umur TPA sekaligus membuka peluang ekonomi dari daur ulang plastik.

C. Skenario 3 Pengelolaan TPST Kompos dan Pengelolaan POO

Skenario 3 merupakan skenario yang dikembangkan sebagai upaya mengurangi kuantitas sampah organik yang masuk ke TPA dan *landfill* untuk memaksimalkan pengelolaan sampah organik khususnya pengolahan kompos dengan menambahkan TPST kompos. Tujuan dibangunnya TPST kompos adalah sebagai fasilitas pengolahan sampah organik sisa makanan menjadi pupuk kompos yang bernilai bagi pertanian dan dapat mereduksi total sampah masuk ke TPA dan *landfill*. Pembentukan model skenario 3 membutuhkan asumsi pada variabel-variabel penyusun sistem. Asumsi tersebut antara lain:

1. Proporsi Sampah Organik, diasumsikan bahwa komposisi sampah organik terhadap total timbunan sampah kota tetap konstan, Nilai ini merujuk pada pola konsumsi masyarakat yang tidak banyak berubah dalam jangka pendek.
2. Setiap TPST memiliki kapasitas olah terbatas, dikarenakan sistem TPST lebih terpadu dan kompleks dibandingkan TPS3R sehingga pembuatan TPST memerlukan biaya

yang lebih mahal dan hanya memiliki 3 unit di Kabupaten Sleman, sehingga diperlukan penambahan unit baru untuk mengikuti pertumbuhan timbulan sampah.

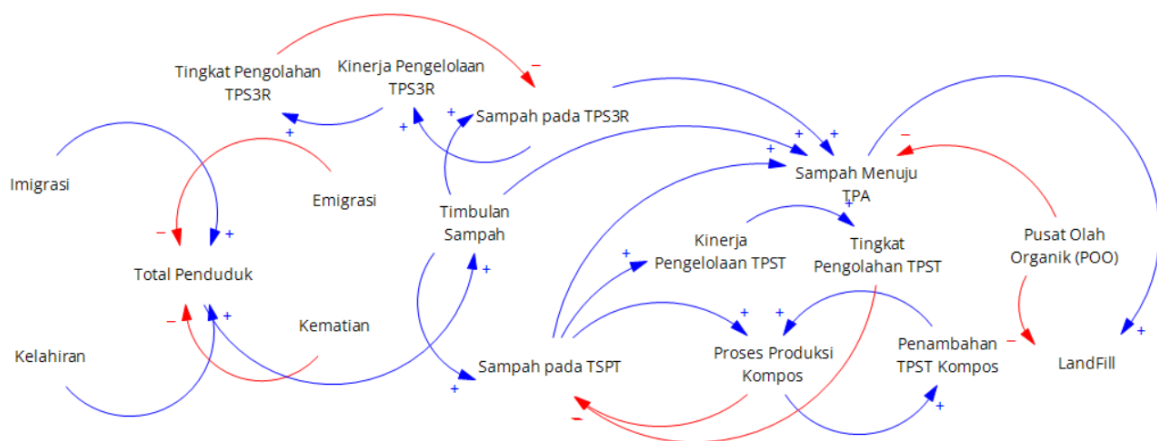
3. Efisiensi TPST, berdasarkan data historis SIPSN bahwa proses pengolahan sampah di TPST memiliki presentase keberhasilan sampah yang cukup tinggi yakni sebesar 86,76% , sehingga diasumsikan bahwa pembuatan TPST komposting diyakini akan berhasil mengubah hampir seluruh sampah organik menjadi kompos. Dengan tingkat keberhasilan yang tinggi, karena sebagian besar sampah organik memiliki bau yang lebih tajam dibandingkan dengan sampah anorganik, dan tekstur yang lebih sulit di simpan, sehingga skenario 3 ini dilakukan di TPST yang dapat mengolah sampah organik dengan tingkat keberhasilan tinggi dan dengan proses pengolahan yang lebih mutakhir dibandingkan dengan TPS3R, serta menerapkan *circular economy* yang akan terus berjalan terutama pada produksi kompos yang membantu pertanian daerah.
4. Sampah sisa makanan atau sampah organik berdasarkan data SIPSN selama 4 tahun terakhir di kabupaten Sleman menempati urutan pertama dengan rata-rata sampah yang dihasilkan sebesar 38,7% (84.907 ton dari 219.654 ton total sampah) sehingga perlu ditangani oleh TPST. Pemanfaatan kompos, di asumsikan seluruh kompos yang dihasilkan terserap oleh pasar lokal, baik untuk pertanian, perkebunan, maupun penghijauan kota. Variasi permintaan pasar dan fluktuasi harga tidak diperhitungkan.
5. Efisiensi TPST Kompos didapat dari jumlah jenis sampah organik atau sisa makanan (data SIPSN) dibagi dengan rata-rata rasio kinerja (sampah terolah oleh TPST) di seluruh TPST (data SIPSN). Penerapan Prinsip Kaizen pada TPS3R,TPST dan POO tetap sama seperti skenario sebelumnya dengan target *zero waste* pada tahun 2034.
6. Peran POO pada skenario 3, adalah sebagai penuntas pengolahan sampah organik yang menghasilkan sumber biogas, agar hasil pemrosesan sampah bervariasi. Diasumsikan distribusi sampah organik menuju POO mengikuti efektifitasnya, sehingga semua sampah organik biogas dapat tertangani.
7. Diasumsikan tidak ada perubahan signifikan dalam pola konsumsi, kebijakan impor pupuk, atau perilaku masyarakat yang dapat mengubah jumlah sampah organik secara drastis. Model tetap fokus pada mekanisme internal sistem pengelolaan. Dengan asumsi-asumsi tersebut, variabel pengelolaan sampah organik dalam CLD Skenario 3 dapat menggambarkan kondisi nyata dengan lebih realistis, serta memperlihatkan bagaimana penambahan TPST Kompos organik dan produksi biogas POO berperan dalam mengurangi beban sampah yang menuju TPA dan *landfill*.

Skenario 3 memiliki batasan-batasan yang diterapkan dalam membangun model. Batasan dilakukan agar model yang dibangun dapat terkendali dan relevan dengan kondisi nyata. Batasan-batasan tersebut antara lain, sebagai berikut:

1. Selama berjalannya simulasi, model hanya memperhitungkan jumlah sampah yang dihasilkan di kabupaten Sleman (transfer sampah dari kabupaten/kota lain tidak diperhitungkan).
2. Jenis sampah yang dianalisis difokuskan pada dua kategori utama: organik dan anorganik. Pada skenario ini, penekanan diberikan pada sampah organik karena adanya integrasi TPST Kompos organik dan produksi biogas Pusat olah organik (POO). Pemilihan penanganan sampah organik dipilih karena sampah sisa makanan menempati peringkat pertama pada jenis timbunan sampah terbanyak di Sleman.

Setelah asumsi dan batasan terbentuk, hubungan sebab-akibat pada sistem dapat digambarkan menggunakan *Causal Loop Diagram* (CLD). Kemudian model diformulasikan menggunakan *Stock Flow Diagram* (SFD). Setelah formulasi model dijalankan, dapat dilihat bagaimana pengaruh adanya TPST (kompos) dan POO terhadap kapasitas *landfill*.

iii. *Causal Loop Diagram* (CLD) Skenario 3 pengelolaan POO dan Pengelolaan Sampah Kompos Organik.



Gambar 4.11 Casual Loop Diagram (CLD) Model Skenario 3 Penglolaan Sampah Kabupaten Sleman

Pada *Causal Loop Diagram* (CLD) Skenario 3, terdapat beberapa *loop* umpan balik yang saling berinteraksi dalam sistem pengelolaan sampah organik. *Loop* tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada skenario 3, struktur sistem pengelolaan sampah mengalami penyesuaian dengan menghilangkan proses pencacahan sampah plastik dan menggantikannya dengan penguatan

produksi kompos melalui TPST Kompos dan Pusat Olah Organik (POO). Dengan demikian, skenario ini menitikberatkan pengelolaan pada pengolahan sampah anorganik melalui jalur POO dan TPST, serta optimalisasi pengolahan organik untuk mengurangi beban *landfill* secara tidak langsung.

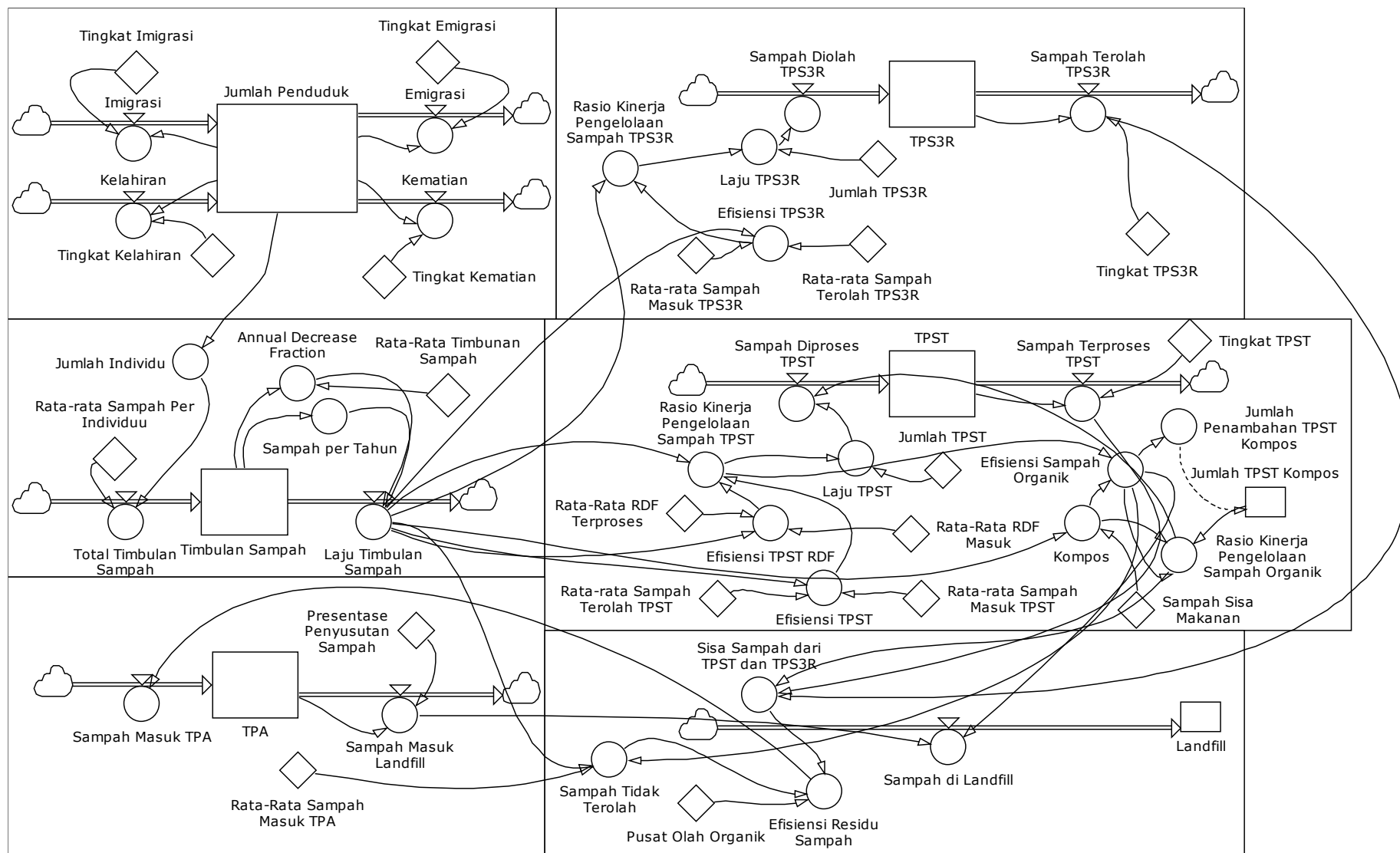
Tanpa adanya proses pencacahan plastik, peningkatan jumlah sampah anorganik langsung meningkatkan aliran sampah menuju TPS3R. Sampah yang masuk ke TPS3R sebagian dapat diolah, namun keterbatasan kapasitas dan efisiensi pengolahan menyebabkan sebagian sampah tetap tidak tertangani. Kondisi ini membentuk *loop* penyeimbang yang membatasi kemampuan TPS3R dalam mengurangi timbulan sampah anorganik secara signifikan.

Berbeda dengan skenario 2, pada skenario 3 peran TPST diperkuat melalui penambahan produksi kompos. Peningkatan proses produksi kompos meningkatkan kemampuan TPST dalam mengolah sampah organik, sehingga volume sampah yang dapat direduksi sebelum menuju TPA menjadi lebih besar. Hubungan ini membentuk *loop* penguat yang memperkuat peran TPST dalam pengurangan beban sistem pembuangan akhir.

Selain TPST, Pusat Olah Organik (POO) juga diperkuat dalam skenario ini. Peningkatan kapasitas dan aktivitas POO meningkatkan volume sampah organik yang diolah menjadi biogas. Dengan semakin banyaknya sampah organik yang tertangani, aliran sampah menuju *landfill* dapat ditekan. Namun, keterbatasan kapasitas POO tetap berpotensi menghasilkan residu yang harus dibuang ke TPA.

Meskipun penguatan produksi kompos dan POO mampu menurunkan beban sampah organik, aliran sampah anorganik menuju TPA masih relatif tinggi karena tidak adanya intervensi pencacahan plastik. Hal ini menyebabkan hubungan penguat antara sampah tidak terproses dan peningkatan beban *landfill* tetap terjadi, meskipun dengan laju yang lebih terkendali dibandingkan skenario tanpa optimalisasi pengolahan organik.

Secara keseluruhan, skenario 3 menunjukkan pergeseran fokus pengelolaan sampah dari pengolahan plastik ke optimalisasi pengolahan organik melalui produksi kompos TPST dan biogas POO. Pendekatan ini efektif dalam menurunkan beban sampah organik menuju TPA, namun belum sepenuhnya mampu mengendalikan peningkatan sampah anorganik. Oleh karena itu, meskipun struktur sistem menjadi lebih seimbang dibandingkan skenario awal, peningkatan kapasitas dan diversifikasi teknologi pengolahan tetap diperlukan untuk mencapai pengurangan beban *landfill* yang berkelanjutan.



Gambar 4.12 Stock Flow Diagram (SFD) Model Skenario 3 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman

Model SFD dikembangkan dari hubungan spesifik antar komponen dalam CLD. Model SFD dibangun berdasarkan asumsi, batasan serta data dan kondisi terkini dari pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman. Komponen *stock*, *auxiliary*, dan konstanta pada SFD memiliki nilai yang berjalan dengan aliran (*flow*) masuk atau keluar dan nilai tersebut akan berubah seiring dengan berubahnya waktu. Sistem yang tergambar pada Gambar 4.12 merupakan rancangan sistem pengelolaan sampah yang menerapkan alternatif strategi pengelolaan sampah organik. Penjelasan mengenai sistem pengelolaan sampah dengan menerapkan alternatif pengelolaan sampah kompos organik pada skenario 3 adalah sebagai berikut :

1. Berdasarkan gambar *Stock Flow Diagram* (SFD) dan tabel data simulasi (2024–2034) berjumlah sama dengan skenario 1 dan skenario 2. Jumlah penduduk meningkat dari 1,345 juta jiwa (2024) menjadi 1,663 juta jiwa (2034). Akibatnya, timbulan sampah juga naik dari 230.764 ton (2024) menjadi 279.440 ton (2034). Artinya, tanpa pengelolaan, beban sampah akan terus bertambah setiap tahun.
2. Sampah yang diolah TPS3R tetap sama dengan hasil simulasi skenario 1 karena pada skenario 3 ini tidak mengubah atau menambah sistem TPS3R yakni dari 20.791 ton (2024) menjadi 41.107 ton (2034). Hal ini menunjukkan ada peningkatan kapasitas pengelolaan di tingkat masyarakat dan petugas TPS3R (*reduce, reuse, recycle*). Namun kontribusinya relatif kecil dibanding total timbulan sampah.
3. TPS3R tetap mengolah sampah lebih banyak dibanding TPST, TPST mengalami kenaikan pengolahan sampah dari 14.232 ton (2024) menjadi 31.778 ton (2034) dibandingkan dengan skenario 1 dan skenario 2 yang mana TPST hanya dapat mengolah sampah sebanyak 24.027 ton (2034) dan skenario 3 sebanyak 31.778 ton (2034), peningkatan terjadi sebanyak 7.751 ton (32,26%) dengan ditambahkan 1 TPST kompos organik. TPST memiliki fungsi utama dalam memproses sampah organik dan anorganik, termasuk menjadi bahan daur ulang plastik, logam, kaca, kompos atau RDF (*Refuse Derived Fuel*). Dengan penambahan TPST khusus kompos, efisiensi TPST menjadi faktor kunci agar sampah organik dapat terolah secara maksimal di tengah proses pengolahan sampah.
4. TPA (Tempat Pembuangan Akhir), Sampah yang masuk TPA menurun lebih cepat dibandingkan dengan skenario 1 maupun skenario 2, pada skenario 2 pada tahun 2033 di TPA tetap ada timbulan sampah sebanyak 1.009 Ton sedangkan pada Skenario 3 pada tahun 2033 Timbulan sampah di TPA menjadi 991 Ton. hal ini terjadi karena pemrosesan sampah organik dilakukan secara maksimal dan dilakukan dua kali oleh TPST Kompos yang memiliki rasio kinerja tinggi berdasarkan data historis SIPSN dan

POO yang menangani sisa sampah organik TPST, selain itu juga sampah sisa makanan (organik) merupakan jenis sampah terbanyak di Kabupaten Sleman, sehingga penurunan timbunan sampah di *landfill* cukup signifikan.

5. Fokus skenario 3 adalah memaksimalkan pemrosesan sampah organik melalui: Komposting (mengurangi beban sampah organik mentah). RDF (*Refuse Derived Fuel*), yaitu pemanfaatan sampah organik sebagai energi alternatif. Biogas energi yang dihasilkan dari penguraian sampah organik secara anaerob menggunakan biodigester. Hasilnya, sampah organik yang seharusnya membusuk di *landfill* dan pada *supply chain* berhasil dikurangi secara signifikan.
6. Skenario ini lebih berkelanjutan dibandingkan dengan Skenario 1 maupun 2 karena dapat menekan sampah di TPA dan *landfill* lebih cepat.
7. Dengan berkurangnya sampah organik yang masuk ke TPA dan *landfill*, potensi pencemaran lingkungan dapat ditekan, seperti bau, air lindi, dan emisi gas metana yang selama ini menjadi masalah utama TPA dan *landfill*. Masyarakat juga dapat memperoleh manfaat langsung dari hasil kompos untuk pertanian dan Biogas serta RDF sebagai sumber energi alternatif, sehingga ada nilai ekonomi tambah bagi masyarakat.
8. Data menunjukkan bahwa Skenario 3 lebih berkelanjutan dibanding skenario lain, karena berhasil menurunkan beban *landfill* lebih cepat meskipun timbunan sampah terus meningkat. Pemerintah daerah perlu memperkuat kebijakan pengelolaan sampah organik melalui edukasi masyarakat, investasi infrastruktur TPST, serta dukungan regulasi agar strategi ini konsisten dijalankan hingga jangka panjang.

Setelah simulasi terbentuk, dilakukan pemeriksaan ulang pada model untuk memastikan sistem sudah berjalan dengan sesuai atau tidak ada *error* pada formula model, setelah dipastikan tidak ada *error*, model dapat dijalankan. Hasil simulasi yang di jalankan pada skenario 3 dapat dilihat pada Gambar 4.13.

Time	Penduduk (Ind)	Timbunan Sampah (T)	TPS3R (Ton)	TPST (Ton)	TPA (Ton)	Landfill (Ton)
01 Jan 2024	1.345.872,00	230.764,00	20.791,00	14.232,00	8.738,00	8.345,00
01 Jan 2025	1.374.673,00	231.091,72	27.668,71	25.212,79	8.352,40	6.896,34
01 Jan 2026	1.404.091,00	235.900,96	31.358,78	26.700,87	7.552,47	5.512,80
01 Jan 2027	1.434.138,00	240.945,23	33.671,59	27.384,19	6.676,04	4.277,12
01 Jan 2028	1.464.829,00	246.101,25	35.267,08	27.984,63	5.767,01	3.198,15
01 Jan 2029	1.496.177,00	251.367,88	36.488,20	28.585,39	4.838,10	2.277,09
01 Jan 2030	1.528.195,00	256.747,26	37.517,70	29.197,38	3.894,49	1.513,22
01 Jan 2031	1.560.898,00	262.241,63	38.453,13	29.822,25	2.938,40	905,14
01 Jan 2032	1.594.302,00	267.853,54	39.346,70	30.460,45	1.970,63	451,25
01 Jan 2033	1.628.419,00	273.585,73	40.226,38	31.112,29	991,26	150,01
01 Jan 2034	1.663.267,00	279.440,29	41.107,32	31.778,11	0,01	0,01

Gambar 4.13 Hasil Simulasi Skenario 3

Berdasarkan gambar 4.13 hasil simulasi, pada skenario 3 diperkirakan jumlah timbunan sampah Kabupaten Sleman akan terus meningkat dari 230.764 ton pada tahun 2024 hingga mencapai 279.440 ton pada tahun 2034 hasil simulasi ini sama dengan skenario 1 dan 2. Peningkatan ini sejalan dengan pertumbuhan jumlah penduduk yang naik dari 1,3 juta jiwa menjadi 1,63 juta jiwa dalam periode yang sama.

Namun, melalui pengelolaan sampah organik dengan penguatan fasilitas TPST dan POO, laju sampah yang benar-benar masuk ke TPA dan *landfill* dapat ditekan lebih awal. Prinsip Kaizen yang diterapkan dalam peningkatan efektifitas efisiensi TPS3R, TPST dan POO lebih seimbang dengan adanya penambahan 1 unit TPST Kompos, dengan efektifitas TPS3R menjadi 96,64%, TPST 100% dan Penambahan 3 unit POO dengan Efektifitas 100%. Peningkatan kapasitas pengolahan organik secara dua *step* oleh TPST Kompos dan POO menjadikan sebagian besar sampah termanfaatkan sebagai kompos, biogas atau RDF, sehingga volume akhir yang dibuang ke *landfill* semakin kecil. Hal ini berdampak pada pemanfaatan ruang *landfill* lebih efisien dan berpotensi memperpanjang umur layanan TPA Piyungan.

D. Skenario 4 Pengelolaan POO, Pengelolaan Pencacahan Plastik TPS3R, dan Pengelolaan Sampah Kompos Organik TPST

Skenario 4 merupakan skenario yang dikembangkan dengan menggabungkan skenario 1 pengelolaan POO (Pusat Olah Organik), skenario 2 pengelolaan POO dan Pencacahan plastik, dan skenario 3 pengelolaan POO dan Kompos sampah organik. Tujuan pembangunan TPS3R dan TPST adalah untuk mereduksi jumlah sampah yang diangkut ke TPA, karena sampah pada TPA tidak diolah dan langsung diangkut ke *landfill*. Tujuan nya untuk mengetahui proses pegelolaan sampah secara maksimal dengan gabungan skenario 1, skenario 2 dan skenario 3, hal ini berpengaruh dengan *ouput* yang dihasilkan akan berdampak besar pada proses pengelolaan sampah sehingga pengurangan sampah TPA dan *Landfill* akan signifikan namun skenario 4 ini memerlukan banyak penambahan unit pengolahan sampah oleh PEMDA Sleman dan memerlukan banyak pengeluaran biaya. Pembentukan model skenario 4 membutuhkan asumsi pada variabel-variabel penyusun sistem. Asumsi tersebut antara lain:

1. Pengelolaan Sampah Anorganik (TPS3R – Pencacahan Plastik), Setiap unit TPS3R Pencacah Plastik mengolah sampah anorganik menjadi cacahan plastik yang dapat diolah menjadi barang yang memiliki *value*. Penambahan jumlah TPS3R, dari cacahan plastik dapat dijual dan menghasilkan benefit berupa uang dan pengurangan sampah serta menerapkan *circular economy* yang berkelanjutan. Pemilihan cacah plastik pada TPS3R sendiri memiliki esensi atau pondasi dasar bahwa jumlah unit

TPS3R lebih banyak dibandingkan TPST meskipun TPS3R tidak secanggih atau lebih efektif dibandingkan TPST dalam mengolah sampah, namun dengan pola pengolahan yang lebih banyak dan tersebar di berbagai wilayah diharapkan akan mengurangi angka sampah anorganik dengan signifikan. Dikarenakan sampah anorganik sulit untuk terurai sehingga diperlukan unit yang banyak untuk mengolah jenis sampah terbanyak nomor dua di Kabupaten Sleman menjadi produk yang lebih bermanfaat.

2. Pengelolaan Sampah Organik (TPST Kompos Organik dan Pusat OlahOrganik/POO), Sampah organik yang masuk TPST Kompos dan POO diolah menjadi kompos dan biogas dengan tingkat pemanfaatan yang cukup baik. Penambahan kapasitas TPST Kompos organik dibuat guna mengurangi sampah dan menghasilkan produk nilai atau manfaat bagi pertanian dan perkebunan daerah. Pusat Olah Organik (POO) juga berperan aktif dalam mengurangi sampah menuju TPA dan *Landfill* dengan tujuan utama agar sampah-sampah yang berada di hilir atau *landfill* tidak menjadi sumber penyakit dan kerusakan lingkungan, dikarenakan sampah organik sangat banyak, meskipun mudah terurai namun sebagian besar memiliki bau yang menyengat, tekstur yang tidak padat dan solid sehingga menimbulkan sarang bakteri dan virus di hilir.
3. Meskipun sebagian besar sampah diolah melalui TPS3R dan TPST, tetap ada residu yang menuju TPA dan *landfill*. Hal ini menjadi *insight* bahwa pengolahan sampah dengan jangka panjang memerlukan waktu, dan juga dengan proses membangun unit TPS3R atau TPST secara bertahap dikarenakan memerlukan biaya yang tidak sedikit.
4. Sampah Anorganik Pencacahan Plastik, dan Sampah Organik Kompos Biogas, Diasumsikan hanya sebagian tertentu dari sampah yang dapat diolah di TPS3R,TPST atau POO menjadi produk yang bermanfaat dikarenakan keterbatasan unit dan kondisi sampah serta nilai ekonomi dari hasil sampah tersebut tidak berfluktuasi tajam sehingga dapat memberikan dorongan pembangunan TPS3R,TPST dan POO baru.
5. Peran Pusat Olah Organik (POO), POO diasumsikan sebagai unit tambahan yang dapat mengurangi volume sampah organik menuju TPA. Kapasitas POO ditetapkan konstan sesuai rancangan skenario dan tidak berubah signifikan dalam jangka pendek.
6. Residu dan *landfill* TPA, Sampah yang tidak terolah baik di TPS3R maupun TPST akan selalu berakhir di TPA dan *landfill* di hilir. Kapasitas *landfill* terbatas dan akumulasi residu tetap terjadi meskipun ada pengolahan di hulu.
7. Dengan asumsi-asumsi tersebut, CLD Skenario 4 mampu menjelaskan interaksi dinamis antara pertumbuhan penduduk, timbulan sampah, kapasitas pengolahan

(anorganik dan organik), peran POO, serta keterbatasan *landfill*, sehingga model tetap relevan dengan kondisi nyata di Kabupaten Sleman.

Skenario 4 memiliki batasan-batasan yang diterapkan dalam membangun model. Batasan dilakukan agar model yang dibangun dapat terkendali dan relevan dengan kondisi nyata.

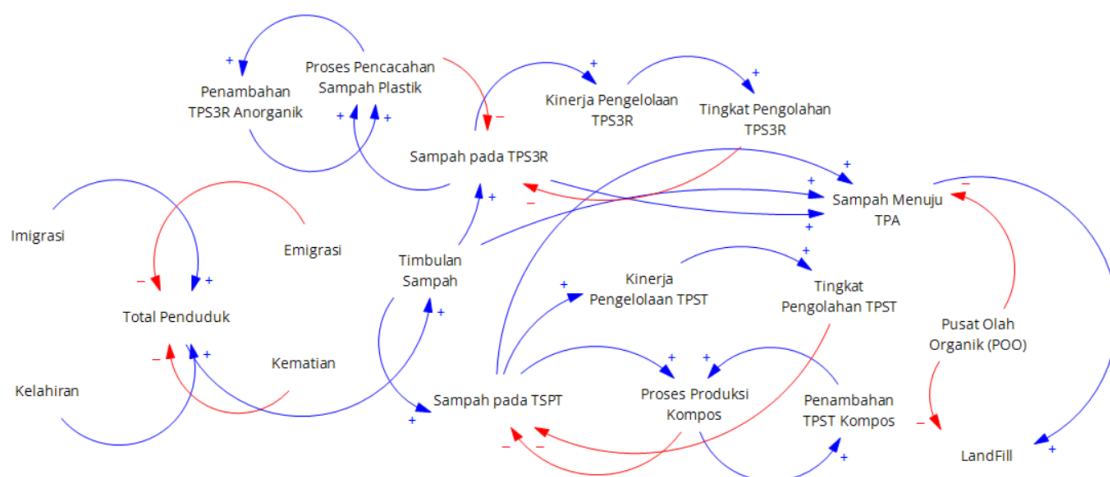
Batasan-batasan tersebut antara lain, sebagai berikut:

1. Selama berjalannya simulasi, model hanya memperhitungkan jumlah sampah yang dihasilkan di kabupaten Sleman (transfer sampah dari kabupaten/kota lain tidak diperhitungkan).
2. Skenario 4 tidak melibatkan usaha pengelolaan sampah dari sisi hulu.
3. Volume sampah yang diangkut pemulung atau pengepul tidak dipertimbangkan.

Asumsi dan batasan tersebut kemudian dijadikan dasar pembangunan model skenario pengelolaan sampah Kabupaten Sleman. Tahap selanjutnya adalah pengembangan model menggunakan *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock Flow Diagram* (SFD). Berikut merupakan pengembangan model skenario 4:

iv. *Causal Loop Diagram* (CLD) Skenario 4 pengelolaan POO, Pengelolaan Pencacahan Plastik TPS3R, dan Pengelolaan Kompos Organik TPST.

Interaksi sebab-akibat antar variabel penyusun sistem skenario 4 dapat dilihat pada diagram *causal loop* yang digambarkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Casual Loop Diagram (CLD) Model Skenario 4 Penglolaan Sampah Kabupaten Sleman

Pada skenario 4, sistem pengelolaan sampah dikembangkan sebagai skenario gabungan akhir dengan mengintegrasikan kembali proses pencacahan sampah plastik, produksi kompos, serta

penguatan Pusat Olah Organik (POO). Skenario ini dirancang untuk menangani seluruh fraksi sampah, baik organik maupun anorganik, sehingga membentuk pendekatan pengelolaan yang lebih komprehensif dibandingkan skenario-skenario sebelumnya.

Pertumbuhan jumlah penduduk tetap menjadi faktor utama yang mendorong peningkatan timbunan sampah. Imigrasi dan kelahiran meningkatkan jumlah penduduk, sementara emigrasi dan kematian menurunkannya. Peningkatan jumlah penduduk berimplikasi langsung pada peningkatan jumlah sampah yang dihasilkan. Hubungan ini tetap membentuk *loop* penguat yang memberikan tekanan berkelanjutan terhadap sistem pengelolaan sampah.

Pada fraksi anorganik, peningkatan jumlah sampah mendorong penambahan TPS3R anorganik dan intensifikasi proses pencacahan sampah plastik. Proses pencacahan meningkatkan kemampuan TPS3R dalam mengolah sampah plastik menjadi material bernilai guna, sehingga volume sampah anorganik yang dapat direduksi di tingkat hulu meningkat. Mekanisme ini membentuk *loop* penguat yang memperkuat kapasitas pengolahan sampah anorganik dan mengurangi aliran sampah plastik menuju TPA.

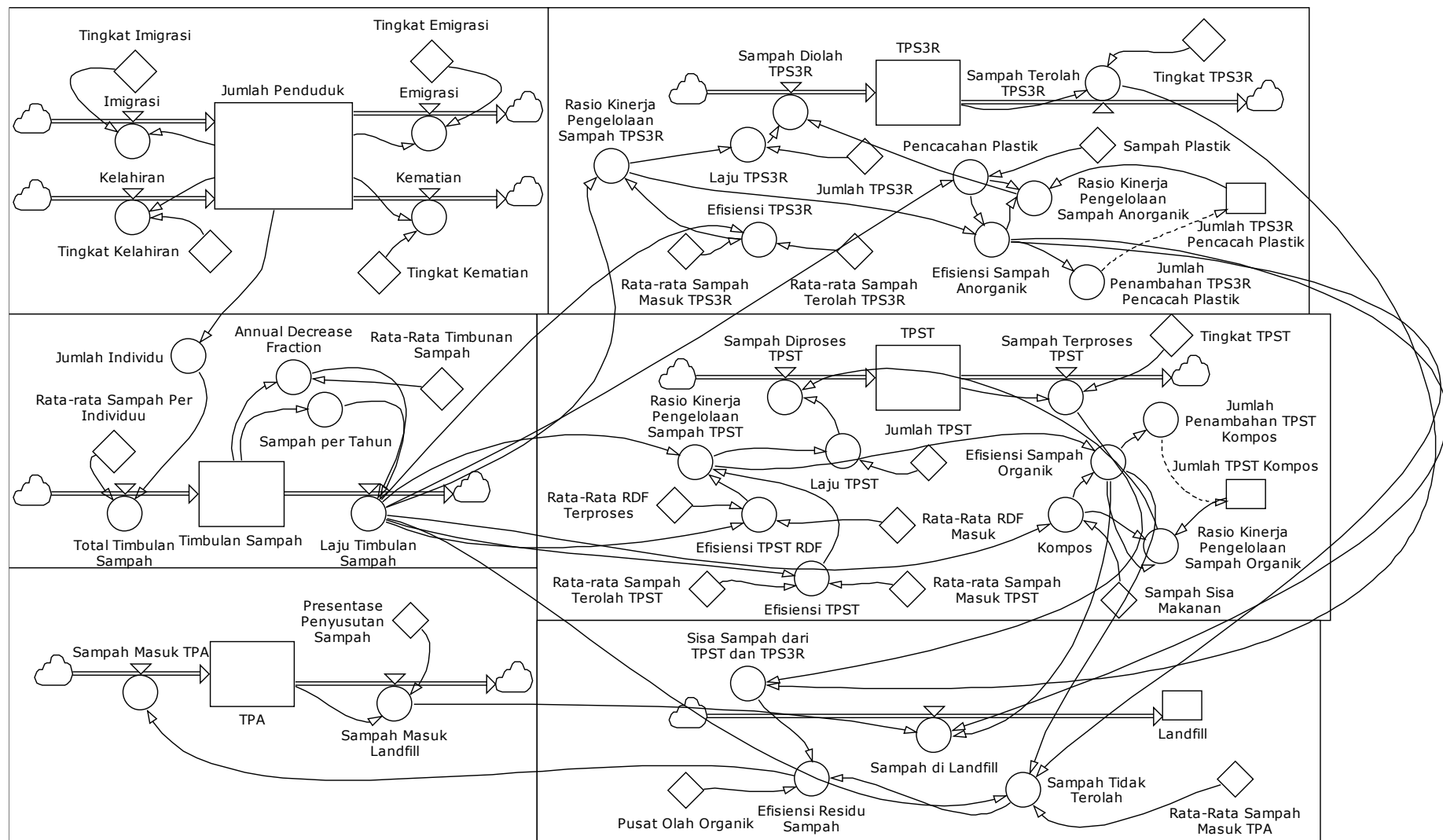
Pada fraksi organik, peran TPST diperkuat melalui produksi kompos. Peningkatan sampah organik yang masuk ke TPST meningkatkan volume kompos yang dihasilkan, sehingga jumlah sampah organik yang harus dibuang ke TPA dapat ditekan. Hubungan ini membentuk *loop* penguat yang memperbesar kontribusi TPST dalam mengurangi beban *landfill* melalui pengolahan organik yang lebih optimal.

Selain TPST, Pusat Olah Organik (POO) berperan sebagai fasilitas pengolahan lanjutan untuk sampah organik. Peningkatan kapasitas dan aktivitas POO meningkatkan volume sampah organik yang dapat diolah, sehingga aliran sampah menuju *landfill* semakin berkurang. Namun demikian, keterbatasan kapasitas POO tetap menciptakan mekanisme penyeimbang yang membatasi efektivitas pengolahan apabila timbunan sampah melebihi kapasitas sistem.

Meskipun mekanisme pengolahan organik dan anorganik diperkuat, keterbatasan kapasitas pada TPS3R, TPST, dan POO tetap membentuk *loop* penyeimbang. Ketika jumlah sampah yang masuk melampaui kapasitas pengolahan, sebagian sampah tetap menjadi residu dan mengalir menuju TPA. Kondisi ini menunjukkan bahwa efektivitas sistem tidak hanya ditentukan oleh keberadaan teknologi, tetapi juga oleh skala dan efisiensi fasilitas pengolahan.

Dengan adanya pencacahan plastik, produksi kompos, dan POO secara simultan, aliran sampah menuju TPA pada skenario 4 menjadi lebih terkendali dibandingkan seluruh skenario sebelumnya. Beban *landfill* meningkat dengan laju yang lebih lambat karena sebagian besar sampah telah direduksi di tengah dan hilir sistem. Meskipun hubungan penguat antara residu dan *landfill* masih ada, kekuatannya relatif melemah akibat intervensi yang lebih menyeluruh.

Secara keseluruhan, skenario 4 menunjukkan struktur sistem pengelolaan sampah yang paling seimbang dan komprehensif. Integrasi pengolahan sampah anorganik melalui pencacahan plastik dan pengolahan sampah organik melalui produksi kompos dan POO mampu menekan beban TPA secara signifikan. Dibandingkan skenario 1 hingga 3, skenario ini memberikan kinerja sistem terbaik, meskipun tetap membutuhkan peningkatan kapasitas, efisiensi, dan koordinasi antar fasilitas untuk mencapai pengelolaan sampah yang berkelanjutan dalam jangka panjang.



Gambar 4.15 Stock Flow Diagram (SFD) Model Skenario 4 Pengelolaan Sampah Kabupaten Sleman

Model SFD dikembangkan dari hubungan spesifik antar komponen dalam CLD. Model SFD dibangun berdasarkan asumsi, batasan serta data dan kondisi terkini dari pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman. Komponen *stock*, *auxiliary*, dan konstanta pada SFD memiliki nilai yang berjalan dengan aliran (*flow*) masuk atau keluar dan nilai tersebut akan berubah seiring dengan berubahnya waktu. Sistem yang tergambar pada Gambar 4.15 merupakan rancangan sistem pengelolaan sampah yang menerapkan alternatif strategi pengelolaan sampah. Penjelasan mengenai sistem pengelolaan sampah dengan menerapkan alternatif, pada skenario 4 adalah sebagai berikut :

1. Pertumbuhan Penduduk dan timbunan Sampah dapat dilihat dari data yang menunjukkan jumlah penduduk Sleman meningkat dari 1.345.872 jiwa (2024) menjadi 1.663.267 jiwa (2034). Peningkatan penduduk ini berdampak langsung pada kenaikan timbunan sampah, dari 230.764 ton (2024) menjadi 279.440 ton (2034).
2. Peran TPS3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) berfungsi mengolah sampah di tingkat tengah. Pada 2024, TPS3R mampu menangani 20.791 ton, dan kapasitas meningkat hingga 55.979 ton pada 2034. Ini menandakan adanya peningkatan efektivitas pengelolaan sampah dengan ditambahkannya 2 unit TPS3R Pencacah Plastik dengan prinsip Kaizen.
3. Kontribusi TPST (Tempat Pengolahan Sampah Terpadu) TPST mendukung pemrosesan skala lebih besar. Pada 2024, TPST mengolah 14.232 ton, dan pada 2034 meningkat menjadi 31.7783 ton dengan ditambahkannya 1 unit TPST Kompos. TPST menjadi titik penting untuk menyerap sampah yang tidak tertangani oleh TPS3R dan sampah-sampah yang sulit diproses oleh TPS3R.
4. Pusat Olah Organik (POO) di hilir sangat penting, sampah organik yang dominan ditangani melalui POO. Pada skenario 4 hanya memerlukan 1 POO karena terdapat 2 unit TPS3R Pencacah Plastik dan 1 Unit TPST Kompos yang membantu kinerja POO yang menggunakan prinsip Kaizen. Mekanisme ini berfokus pada biogas dan pemanfaatan sampah organik menjadi energi, sehingga dapat menggapai target *zero waste* pada tahun 2034 serta mengurangi tekanan terhadap TPA dan *landfill*.
5. Pengolahan Sampah Plastik Skenario 4 juga menambahkan unit pencacahan plastik di TPS3R. Sampah plastik yang sebelumnya berpotensi berakhir di TPA atau *landfill* kini bisa diproses dan dijadikan bahan baku industri daur ulang, meningkatkan nilai ekonomi dari sampah.
6. Efisiensi Pengelolaan Sampah Organik Sampah sisa makanan dan organik diproses lebih banyak di unit TPST Kompos. Hal ini membantu mengurangi beban di POO kemudian TPA dan *landfill* turun, karena sebagian besar timbunan sampah di Sleman adalah organik.

7. Pengurangan Sampah Masuk ke TPA Pada Skenario 4 lebih cepat dibandingkan dengan skenario 1 hingga 3, pada tahun 2033 Skenario 4 dapat mengurangi Timbulan Sampah menjadi 925 Ton, dibandingkan dengan Skenario 3 yang memiliki Timbulan sampah 991 Ton di TPA pada tahun 2033, terlebih pada Skenario 1 dan 2 yang masih memiliki Timbulan Sampah pada TPA diatas 1000 Ton pada tahun 2033.
8. Penurunan Sampah *Landfill*, pada Skenario 4 memiliki selisih kecil dengan Skenario 3 yang memiliki kesamaan pada Tahun 2031 Sampah di *Landfill* dibawah 1000 Ton, meski penurunan lebih signifikan pada Skenario 3, namun penambahan unit POO pada skenario 4 hanya memerlukan 1 unit dibandingkan dengan Skenario 3 yang membutuhkan 3 POO.
9. Keseimbangan Sistem, CSCM dan Ekonomi Sirkular, Dengan adanya integrasi TPS3R, TPST, POO, kompos dan pencacahan plastik, skenario ini menciptakan sistem sirkular: sampah organik menjadi kompos, plastik menjadi bahan daur ulang, dan residu sampah diminimalkan. Selain ramah lingkungan, sistem ini juga memberi nilai ekonomi tambahan.
10. Proyeksi keberlanjutan secara keseluruhan, Skenario 4 terbukti paling efektif dibandingkan skenario sebelumnya. Sehingga dapat memanfaatkan berbagai metode pengelolaan, beban *landfill* dapat ditekan drastis. Jika strategi ini dijalankan konsisten, TPA Piyungan tidak akan cepat penuh, meskipun timbulan sampah terus bertambah.
11. Skenario 4 (gabungan POO, TPS3R plastik, TPST Kompos) adalah strategi paling ideal untuk Kabupaten Sleman karena mengintegrasikan teknologi, peran masyarakat, dan pendekatan *circular* ekonomi dan *circular supply chain management*, sehingga mampu menjaga keseimbangan lingkungan sekaligus memberi manfaat ekonomi.

Setelah simulasi terbentuk, dilakukan pemeriksaan ulang pada model untuk memastikan sistem sudah berjalan dengan sesuai atau tidak ada *error* pada formula model, setelah dipastikan tidak ada *error*, model dapat dijalankan. Hasil simulasi yang di jalankan pada skenario 3 dapat dilihat pada Gambar 4.16.

Time	Penduduk (Ind)	Timbulan Sampah (T)	TPS3R (Ton)	TPST (Ton)	TPA (Ton)	Landfill (Ton)
01 Jan 2024	1.345.872,00	230.764,00	20.791,00	14.232,00	8.738,00	8.345,00
01 Jan 2025	1.374.673,00	231.091,72	27.668,71	25.212,79	8.352,40	6.896,34
01 Jan 2026	1.404.091,00	235.900,96	31.358,78	26.700,87	7.552,47	5.512,80
01 Jan 2027	1.434.138,00	240.945,23	33.671,59	27.384,19	6.676,04	4.277,12
01 Jan 2028	1.464.829,00	246.101,25	35.267,08	27.984,63	5.767,01	3.198,15
01 Jan 2029	1.496.177,00	251.367,88	36.488,20	28.585,39	4.838,10	2.277,09
01 Jan 2030	1.528.195,00	256.747,26	37.517,70	29.197,38	3.894,49	1.513,22
01 Jan 2031	1.560.898,00	262.241,63	38.453,13	29.822,25	2.938,40	905,14
01 Jan 2032	1.594.302,00	267.853,54	39.346,70	30.460,45	1.970,63	451,25
01 Jan 2033	1.628.419,00	273.585,73	40.226,38	31.112,29	991,26	150,01
01 Jan 2034	1.663.267,00	279.440,29	41.107,32	31.778,11	0,01	0,01

Gambar 4.16 Hasil Simulasi Skenario 4

Berdasarkan data simulasi Skenario 4 (gabungan POO + Pencacahan Plastik + pengolahan sampah Kompos), antara 01 Jan 2024 dan 01 Jan 2034 jumlah penduduk Sleman naik dari 1.345.872 menjadi 1.663.267 jiwa sama seperti hasil simulasi *existing*, skenario 1, skenario 2, dan skenario 3, sehingga timbunan sampah tahunan bertambah dari 230.764 ton menjadi 279.440 ton jumlah ini juga sama dengan simulasi *existing*, skenario 1, skenario 2, dan skenario 3. Namun karena ada pengolahan gabungan (POO, Pencacahan Plastik, dan Sampah Kompos), beban ke TPA terutama di *landfill* bisa ditekan. Artinya, walaupun sampah terus bertambah, skenario ini berhasil memperpanjang umur TPA dan *landfill* karena sebagian besar sampah bisa diolah menjadi kompos, biogas dan plastik daur ulang, bukan ditimbun.

Selisih antara skenario 4 dengan skenario lain cukup signifikan berdasarkan jumlah dari nilai hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa skenario 4 merupakan skenario yang paling efektif dalam menangani pengolahan sampah di Kabupaten Sleman. Pada Skenario 1 membutuhkan 4 unit POO dengan prinsip Kaizen ketat, Skenario 2 membutuhkan 2 unit TPS3R Pencacah Plastik dan 2 Unit POO, Skenario 3 membutuhkan 1 unit TPST Kompos dan 3 Unit POO sedangkan pada Skenario 4 membutuhkan 1 unit POO, 2 unit TPS3R dan 1 unit TPST agar target *zero waste* selama 1 dekade atau 10 tahun kedepan pada tahun 2034.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa skenario ke 4 merupakan skenario paling efektif dan efisien dalam mengurangi timbunan sampah di Kabupaten Sleman. Dengan catatan bahwa skenario 4 membutuhkan penambahan unit yang bervariasi tidak hanya berfokus pada satu titik dalam menangani *zero waste* dalam satu dekade.

4.3 Implementasi *Circular Supply Chain Management* pada pengolahan sampah di Kabupaten Sleman

A. Model *Existing* (Baseline)

Pada kondisi *eksisting*, sistem pengelolaan sampah masih bersifat semi-linear atau *open loop system*, di mana aliran material hanya bergerak satu arah dari sumber sampah menuju TPA tanpa adanya mekanisme pengembalian nilai. Sisa sampah pada proses pemilahan dan pengolahan di hulu, tengah maupun hilir yang dihasilkan oleh rumah tangga, pasar, dan kegiatan komersial dikirim ke TPA Piyungan tanpa pengolahan sampah di hilir. Struktur sistem seperti ini sudah belum mencerminkan prinsip *Circular Supply Chain Management* (CSCM) yang baik sehingga diperlukan *improvement* atau pengembangan agar mempertahankan nilai material melalui daur ulang, pemanfaatan kembali, dan konversi energi. Dengan demikian, rantai pasok masih semi linier hanya berfokus pada pengurangan sampah yang dilakukan oleh kebijakan Desentralisasi di hulu yang sangat berdampak pada pengurangan sampah

berdasarkan data historis SIPSN, sehingga diperlukan pengembangan TPS3R maupun TPST di proses pengolahan tengah yang tersedia serta di hilir sehingga akan berpotensi menimbulkan akumulasi residu jangka panjang.

Dari sisi manajemen rantai pasok, model *eksisting* belum membentuk hubungan antara tahap *input–process–output* yang berkelanjutan. Proses pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan hanya menekankan aspek *waste flow*, bukan *resource flow* di proses tengah dan hilir. Keterbatasan fasilitas pengolahan di tingkat tengah seperti TPS3R dan TPST membuat potensi CSCM & ekonomi sirkular belum dimanfaatkan. Oleh karena itu, model dasar ini menjadi titik awal penting untuk melihat bagaimana skenario-skenario berikutnya dapat menambahkan elemen *circularity* dalam sistem pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman.

B. Skenario 1 – Penambahan POO (Pusat Olah Organik)

Skenario 1 memperkenalkan komponen baru berupa Pusat Olah Organik (POO) yang berfungsi mengolah fraksi organik menjadi biogas. Secara sistem, POO menciptakan *feedback loop* baru dalam rantai pasok yang berfokus pada pengolahan sampah organik di hilir. Langkah ini sudah mengarah pada implementasi CSCM yang baik karena material organik tidak lagi berakhir di TPA atau *landfill*, melainkan diproses menjadi energi yang memiliki nilai guna baru serta mengurangi timbunan sampah di TPA dan *landfill*. Namun demikian, penerapan prinsip sirkular masih terbatas pada satu jenis aliran material (organik), sementara anorganik belum dilakukan pengembangan pada mekanisme pengelolaan sampah dan limbah.

Struktur sistem pada Skenario 1 menunjukkan pola semi-sirkular karena terjadi proses *closing the loop* sebagian di sisi hilir dan limbah organik. Hubungan sebab-akibat antara volume sampah organik, kapasitas POO, dan penurunan residu ke TPA menciptakan *reinforcing loop* positif yang memperkuat efisiensi pengelolaan. Walaupun demikian, belum ada integrasi antar subsistem seperti daur ulang plastik atau pemanfaatan residu non-organik. Artinya, sistem ini baru mencerminkan tahap awal penerapan *circular supply chain*, di mana hanya sebagian aliran material yang telah dikembalikan ke dalam siklus pemanfaatan.

C. Skenario 2 – Penambahan POO dan TPS3R Pencacah Plastik

Pada Skenario 2, sistem diperluas dengan menambahkan fasilitas TPS3R (*Reduce, Reuse, Recycle*) pencacah plastik bersamaan dengan POO. Secara struktural, hal ini memperkenalkan dua jalur sirkular: satu untuk pengolahan organik (melalui POO) dan satu lagi untuk anorganik (melalui TPS3R). Integrasi ini menciptakan *dual-loop system* yang lebih mendekati konsep *Circular Supply Chain Management*. Material logam, dan kertas khususnya plastik tidak lagi hanya dibuang, tetapi masuk dalam siklus pemilahan dan daur ulang yang mengembalikan nilai

ekonominya. Dengan demikian, skenario ini sudah menunjukkan bentuk awal dari *closed-loop supply chain* yang melibatkan dua jenis material utama.

Dari sisi implementasi CSCM, Skenario 2 sudah lebih seimbang karena memperhatikan dua aspek utama, pengolahan organik dan daur ulang anorganik. Adanya dua subsistem yang bekerja paralel menandakan upaya mengintegrasikan seluruh tahap siklus hidup material. Namun, sistem ini masih dapat ditingkatkan dengan menambah mekanisme pemanfaatan residu, agar aliran material benar-benar tertutup sempurna. Meskipun begitu, dibandingkan model sebelumnya, Skenario 2 sudah dapat dikategorikan sebagai bentuk penerapan *circular supply chain* tingkat menengah.

D. Skenario 3 – Penambahan POO dan TPST Kompos

Skenario 3 berfokus pada penguatan kapasitas pengolahan organik dalam skala lebih besar melalui integrasi POO dengan TPST (Tempat Pengolahan Sampah Terpadu). TPST berfungsi sebagai fasilitas regional yang dapat memproses volume organik lebih banyak dengan metode komposting terkontrol atau *mechanical biological treatment* dan pemanfaatan energi biogas melalui proses dekomposisi anaerob menggunakan digester. Dalam konteks CSCM, hal ini memperluas sirkulasi material organik dan meningkatkan efisiensi konversi sampah menjadi produk bernilai. Struktur sistem menunjukkan penguatan *reinforcing loop* antara kapasitas TPST dan penurunan timbulan sampah organik ke TPA dan *landfill*, sehingga nilai siklus di sisi tengah dan hilir menjadi lebih stabil.

Namun, meskipun efisiensi pengelolaan sampah organik meningkat, sistem ini belum maksimal dalam mencerminkan *Circular Supply Chain Management*. Fraksi anorganik hanya ditangani oleh unit TPS3R dan TPST yang tersedia pada model eksisting, sehingga masih terdapat aliran anorganik menuju TPA dan *landfill*. Tanpa mekanisme daur ulang dan pemanfaatan energi dari residu, siklus rantai pasok belum tertutup sepenuhnya. Dengan demikian, Skenario 3 sudah memperkuat bagian *reuse* dan *recycle* untuk organik, tetapi belum mencapai tahap *closed-loop system* secara total. Penerapannya masih memerlukan integrasi dengan pengelolaan anorganik agar sesuai dengan prinsip ekonomi sirkular.

E. Skenario 4 – Penambahan POO, TPS3R Pencacah Plastik, dan TPST Kompos

Skenario 4 merupakan bentuk paling komprehensif dari seluruh model, karena menggabungkan pengolahan organik melalui POO dan TPST dengan pemilahan anorganik melalui TPS3R. Dalam kerangka *Circular Supply Chain Management*, skenario ini telah memenuhi seluruh tahapan *reduce, reuse, recycle, and recover*. Material organik diolah menjadi kompos dan biogas, material anorganik dipilah untuk daur ulang, dan residu akhir dapat diarahkan ke fasilitas POO atau RDF guna pemrosesan energi. Secara struktur, sistem ini

membentuk *multi-loop circular chain* di mana setiap aliran material memiliki jalur pengembalian nilai tersendiri.

Secara konseptual, Skenario 4 dapat dikatakan telah mengimplementasikan *Circular Supply Chain Management* secara penuh. Setiap komponen sistem mulai dari sumber sampah, pengolahan, distribusi produk hasil olahan, hingga pengelolaan residu saling terhubung dalam satu siklus berkelanjutan. Tidak hanya mengurangi beban TPA, tetapi juga mengubah paradigma pengelolaan sampah dari *waste management* menjadi *resource management*. Dengan demikian, skenario ini merupakan bentuk ideal penerapan ekonomi sirkular dan *circular supply chain management* di sektor persampahan karena berhasil menciptakan sistem *closed-loop* yang menjaga nilai material dalam rantai pasok secara berkelanjutan.

Insight pada skenario yang telah dibuat dengan *Power Sim* adalah implementasi *Circular Supply Chain Management* merupakan pengembangan pengolahan sampah dari sisi hilir dengan penambahan unit POO (Pusat Olah Organik) dan sisi tengah penambahan unit TPS3R Pencacahan Plastik dan TPST Kompos yang menyempurnakan pengolahan sampah di sisi hulu-tengah-hilir dan membantu pengolahan sampah di hulu yang telah dilakukan oleh PEMDA & DLH dengan kebijakan akan Desentralisasi sampah (penangan sampah skala kecil dan mandiri yang dilakukan oleh RT/RW serta bank sampah).

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Uji Beda

Analisis uji beda yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian model serta mengidentifikasi pengaruh variasi skenario terhadap kinerja sistem pengelolaan sampah yang disimulasikan menggunakan *Powersim*. Uji *paired sample t-test* digunakan untuk membandingkan data aktual dengan hasil simulasi model *existing* guna memastikan bahwa model mampu merepresentasikan kondisi riil secara statistik. Selanjutnya, uji ANOVA satu arah diterapkan untuk menganalisis perbedaan rata-rata antara kondisi *existing* dan berbagai skenario intervensi pada variabel utama, yaitu TPS3R, TPST, TPA, dan *landfill*.

5.1.1 Uji Beda *Model Existing* dan *Real Data*

Berikut merupakan hasil Uji *paired sample t-test* yang telah dilakukan pada *excel*.

t-Test: Paired Two Sample for Means

	1318086	1345872
Mean	385630,5	56574
Variance	5,19E+11	9,51E+09
Observations	5	5
Pearson Correlation	-0,15587	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	4	
t Stat	0,99207	
P(T<=t) one-tail	0,18866	
t Critical one-tail	2,131847	
P(T<=t) two-tail	0,377319	
t Critical two-tail	2,776445	

Gambar 5.1 Hasil Uji *paired sample t-test* Model *Existing* dan *Real Data*

Uji *paired sample t-test* dilakukan untuk menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara data aktual dan hasil simulasi model *existing* pada periode yang sama. Penggunaan uji ini tepat karena data yang dibandingkan bersifat berpasangan, yaitu nilai *real* dan nilai simulasi pada tahun yang identik. Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata antara data aktual dan hasil simulasi, sedangkan hipotesis alternatif (H_1) menyatakan terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan.

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai *p-value* sebesar 0,377 ($> 0,05$) dan nilai *t* hitung lebih kecil dibandingkan *t* kritis. Dengan demikian, H_0 tidak dapat ditolak, yang berarti

tidak terdapat perbedaan signifikan antara data aktual dan hasil simulasi model *existing*. Secara statistik, model mampu merepresentasikan kondisi empiris sistem pengelolaan sampah dengan tingkat kesesuaian yang memadai.

Hasil ini menunjukkan bahwa struktur model, parameter, serta hubungan kausal antar variabel telah terkalibrasi dengan baik terhadap data riil. Dalam konteks sistem dinamik, validasi ini penting untuk memastikan bahwa model memiliki kemampuan prediktif dan layak digunakan untuk eksplorasi skenario kebijakan. Apabila hasil uji menunjukkan perbedaan signifikan, maka model perlu dikalibrasi ulang sebelum digunakan untuk simulasi lanjutan.

Dengan demikian, hasil *paired t-test* mengindikasikan bahwa model *existing* telah tervalidasi secara statistik dan dapat digunakan sebagai dasar dalam menjalankan simulasi skenario pengembangan sistem pengelolaan sampah.

5.1.2 Uji Beda Hasil Simulasi pada TPS3R

Berikut merupakan hasil Uji *Anova* TPS3R yang telah dilakukan pada *excel*.

Anova: Single Factor

SUMMARY						
Groups	Count	Sum	Average	Variance		
TPS3R						
Existing (Ton)	11	38189659	3471787,182	3,73848E+11		
TPS3R 1 (Ton)	11	38189659	3471787,182	3,73848E+11		
TPS3R 2 (Ton)	11	50408017	4582547	1,1288E+12		
TPS3R 3 (Ton)	11	38189659	3471787,182	3,73848E+11		
TPS3R 4(Ton)	11	50408017	4582547	1,1288E+12		

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1,6286E+13	4	4,0715E+12	6,024466881	0,000489	2,557179
Within Groups	3,37914E+13	50	6,75827E+11			
Total	5,00774E+13	54				

Gambar 5.2 Hasil Uji *Anova* Simulasi TPS3R

Uji ANOVA satu arah pada variabel TPS3R bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antara kondisi *existing* dan skenario 1 hingga 4. Hipotesis nol menyatakan bahwa seluruh kelompok memiliki rata-rata yang sama, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan bahwa minimal terdapat satu kelompok dengan rata-rata yang berbeda.

Hasil pengujian menunjukkan nilai *p-value* sebesar 0,00049 ($< 0,05$) serta nilai F hitung lebih besar dari F kritis. Oleh karena itu, H_0 ditolak. Hal ini berarti terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok TPS3R pada berbagai skenario yang disimulasikan. Secara substantif, hasil ini menunjukkan bahwa intervensi kebijakan yang dirancang dalam model memberikan dampak nyata terhadap peningkatan efektivitas, efisiensi dan kinerja TPS3R. Variasi pada skenario memengaruhi volume pengolahan di tingkat tengah, yang mencerminkan efektivitas strategi peningkatan pengelolaan sampah berbasis reduksi dan pemilahan di sumber.

Dengan demikian, kebijakan yang berfokus pada penguatan TPS3R terbukti secara statistik memberikan perubahan signifikan dalam sistem, sehingga dapat menjadi instrumen strategis dalam mendukung transisi menuju sistem pengelolaan sampah yang lebih sirkular.

5.1.3 Uji Beda Hasil Simulasi pada TPST

Berikut merupakan hasil Uji *Anova* TPST yang telah dilakukan pada *excel*.

Anova: Single Factor

SUMMARY						
Groups	Count	Sum	Average	Variance		
TPST Existing(Ton)	11	23270172	2115470	71993384505		
TPST 1(Ton)	11	23270172	2115470	71993384505		
TPST 2(Ton)	11	23270172	2115470	71993384505		
TPST 3(Ton)	11	30247035	2749730	2,31725E+11		
TPST 4 (Ton)	11	30247035	2749730	2,31725E+11		

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	5,31E+12	4	1,33E+12	9,769537706	6,43E-06	2,557179
Within Groups	6,79E+12	50	1,36E+11			
Total	1,21E+13	54				

Gambar 5.3 Hasil Uji *Anova* Simulasi TPST

Uji ANOVA pada variabel TPST dilakukan untuk menguji perbedaan rata-rata kapasitas atau volume pengolahan TPST antara kondisi *existing* dan skenario pengembangan. Sama seperti sebelumnya, H_0 menyatakan tidak terdapat perbedaan rata-rata antar kelompok.

Hasil pengujian menunjukkan nilai *p-value* sebesar $6,4 \times 10^{-6}$ ($< 0,05$) dengan nilai F hitung yang lebih besar dari F kritis. Dengan demikian, H_0 ditolak dan dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antara kondisi *existing* dan skenario 1–4 pada variabel TPST. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan intervensi pada TPST memberikan

pengaruh yang sangat kuat terhadap distribusi aliran sampah dalam sistem. Secara sistem dinamik, peningkatan kapasitas TPST berkontribusi dalam mengurangi beban aliran menuju TPA melalui mekanisme pengolahan antara (*intermediate treatment*).

Hasil ini memperkuat argumen bahwa optimalisasi fasilitas pengolahan di tingkat menengah merupakan faktor penting dalam transformasi sistem pengelolaan sampah menuju pendekatan *circular supply chain*.

5.1.4 Uji Beda Hasil Simulasi pada TPA

Berikut merupakan hasil Uji *Anova* TPA yang telah dilakukan pada *excel*.

Anova: Single
Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
TPA Exisitng(Ton)	11	5400826	490984,2	8,84E+10
TPA 1(Ton)	11	5400826	490984,2	8,84E+10
TPA 2 (Ton)	11	5196900	472445,5	8,93E+10
TPA 3(Ton)	11	5171881	470171	8,99E+10
TPA 4(Ton)	11	5066085	460553,2	9,01E+10

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	8,02E+09	4	2E+09	0,022472	0,998983	2,557179
Within Groups	4,46E+12	50	8,92E+10			
Total	4,47E+12	54				

Gambar 5.4 Hasil Uji *Anova* Simulasi TPA

Uji ANOVA pada variabel TPA bertujuan untuk mengidentifikasi apakah terdapat perbedaan rata-rata volume sampah yang masuk ke TPA antara kondisi *existing* dan berbagai skenario. Hipotesis nol menyatakan bahwa seluruh kelompok memiliki rata-rata yang sama.

Hasil pengujian menunjukkan nilai *p-value* sebesar 0,99898 ($> 0,05$) dan F hitung lebih kecil dari F kritis, sehingga H_0 tidak dapat ditolak. Artinya, secara statistik tidak terdapat perbedaan signifikan antara kelompok pada variabel TPA.

Namun demikian, ketidaksignifikanan ini bukan menunjukkan bahwa skenario tidak berdampak, melainkan karena seluruh skenario dirancang untuk mencapai target nol ton pada tahun 2034. Dengan target akhir yang sama, rata-rata antar kelompok menjadi relatif seragam sehingga perbedaan statistik tidak terdeteksi.

Perbedaan yang sebenarnya terletak pada laju dan dinamika penurunan volume menuju nol, bukan pada nilai akhir rata-rata. Oleh karena itu, analisis dinamika waktu (*time series behavior*) menjadi lebih relevan untuk menjelaskan perbedaan antar skenario pada variabel ini.

5.1.4 Uji Beda Hasil Simulasi pada TPA

Berikut merupakan hasil Uji *Anova landfill* yang telah dilakukan pada *excel*.

Anova: Single
Factor

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Landfill Existing (Ton)	11	3491896	317445,1	8,29E+10
Landfill 1 (Ton)	11	3491896	317445,1	8,29E+10
Landfill2 (Ton)	11	3378053	307095,7	8,26E+10
Landfill 3(Ton)	11	3352613	304783	8,24E+10
Landfill 4 (Ton)	11	3357585	305235	8,25E+10

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1,85E+09	4	4,63E+08	0,005603	0,999935	2,557179
Within Groups	4,13E+12	50	8,27E+10			
Total	4,13E+12	54				

Gambar 5.5 Hasil Uji *Anova Simulasi Landfill*

Uji ANOVA pada variabel *landfill* juga menunjukkan nilai *p-value* sebesar 0,99994 (> 0,05), sehingga H_0 tidak dapat ditolak. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antar skenario dalam hal rata-rata volume *landfill*.

Kondisi tersebut konsisten dengan desain model yang menargetkan *zero landfill* pada tahun 2034 untuk seluruh skenario. Karena seluruh skenario mengonvergensi sistem menuju kondisi akhir yang sama, maka secara statistik tidak terdeteksi perbedaan rata-rata yang signifikan.

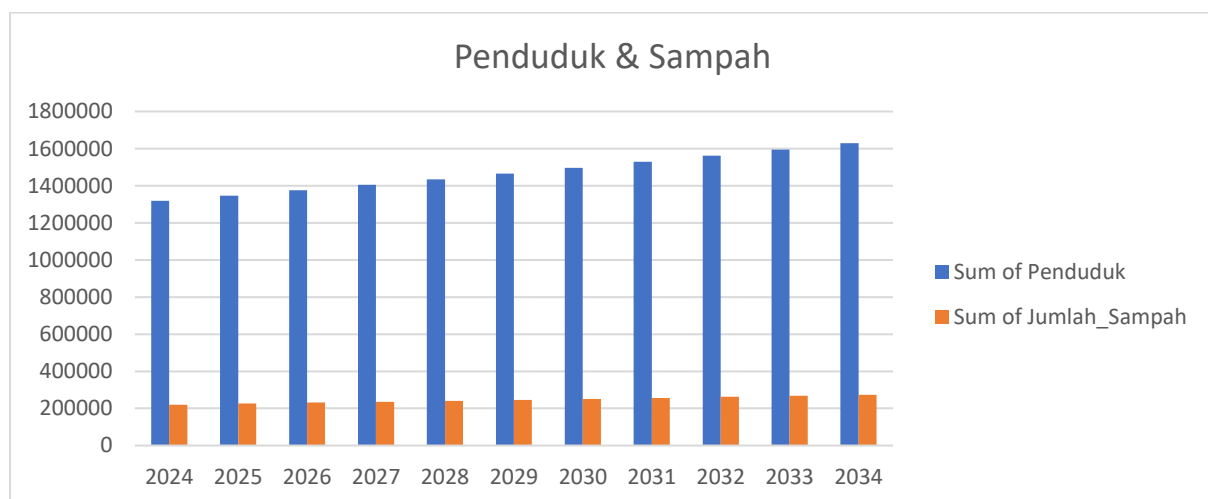
Walaupun demikian, variasi kebijakan tetap memengaruhi pola penurunan volume *landfill* sepanjang periode simulasi. Perbedaan terjadi pada kecepatan transisi sistem menuju target akhir, yang mencerminkan efektivitas masing-masing strategi kebijakan dalam mempercepat reduksi beban pembuangan akhir.

Secara keseluruhan, hasil ANOVA pada TPA dan *landfill* menunjukkan konsistensi model terhadap tujuan kebijakan jangka panjang, yaitu eliminasi pembuangan akhir, sementara

perbedaan signifikan pada TPS3R dan TPST menunjukkan bahwa transformasi sistem terjadi di tingkat hulu dan menengah.

5.2 Analisis Model Existing (Baseline)

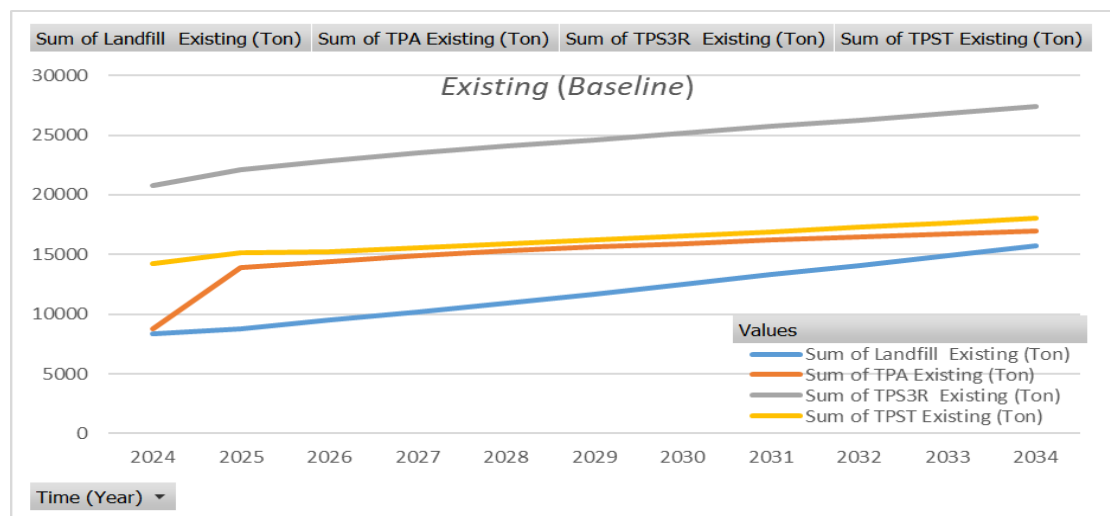
Berdasarkan hasil simulasi dengan *powersim* dan pengambilan data yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa model *existing* pengolahan sampah di Kabupaten Sleman telah mengimplementasikan *Circular Supply Chain Management* (CSCM) namun masih perlu banyak *improvement* yang perlu dilakukan agar pengolahan sampah lebih optimal dan mengurangi timbunan sampah di TPA dan *landfill* agar konsep CSCM (menghilangkan limbah dan memaksimalkan pemanfaatan sumber daya melalui prinsip ekonomi sirkular) dapat diimplementasikan lebih maksimal. Pada struktur dasar pengolahan sampah *supply chain management* di Kabupaten Sleman telah dilakukan usaha pengurangan sampah melalui kebijakan desentralisasi (sistem pengelolaan sampah yang dilakukan secara mandiri atau berbasis lokal RT/RW) di hulu, kemudian pengolahan sampah 3R (*reduce, reuse, recyle*) oleh TPS3R yang mengolah sampah organik maupun anorganik serta memiliki 31 unit tersebar di berbagai wilayah Kabupaten Sleman kemudian juga tersedia TPST yang memiliki fungsi yang sama dengan TPS3R namun jumlahnya hanya ada 3 unit di Kabupaten Sleman karena TPST memiliki proses yang lebih kompleks dan efektifitas yang lebih tinggi berada di sisi tengah, sedangkan di hilir masih proses pembentukan TPA berbasis TPST, sehingga hanya ada pengurangan sampah yang *relative* kecil oleh pengepul sampah anorganik di TPA atau *landfill*.



Gambar 5.6 Pivot Chart Hasil Running Simulasi Jumlah Penduduk dan Timbunan Sampah Kabupaten Sleman

Berdasarkan pivot *chart* diatas dapat diketahui bahwa perkembangan jumlah penduduk dan timbunan sampah pada simulasi *existing*, skenario 1, skenario 2, skenario 3 dan skenario 4

tidak akan berubah karena tidak ada model tambahan pada *stock* dan *auxillary* pada jumlah penduduk dan timbunan sampah, sehingga datanya tidak berubah. Dapat diketahui bahwa pengurangan sampah di kabupaten Sleman sangat signifikan dengan kebijakan Desentralisasi pada tahun 2024 terdapat penurunan yang signifikan, dalam 4 tahun terakhir berdasarkan data SIPSN pada tabel 4.8 tahun 2023 terdapat timbunan sampah sebanyak 71,536.35 ton kemudian tahun 2024 berkurang menjadi 9,198.00 ton. Kebijakan Desentralisasi di hulu menjadi ujung tombak bahwa pengurangan sampah dapat dilakukan dengan baik, meskipun pertumbuhan penduduk kabupaten Sleman selalu naik (+).



Gambar 5.7 Pivot Chart Hasil Running Simulasi Existing Kabupaten Sleman

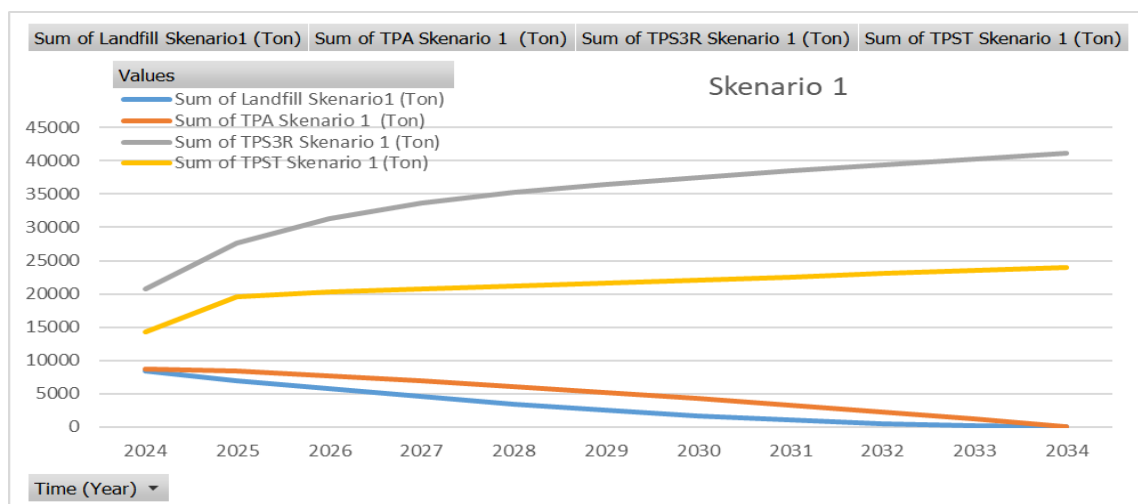
Pada Hasil *Running Pivot Chart* diatas dapat diketahui bahwa TPS3R berperan penting dalam mengolah sampah Kabupaten Sleman, dikarenakan TPS3R di Sleman berjumlah >30 unit, sehingga pemrosesan oleh TPS3R sangat efektif, kemudian TPST juga memiliki peran sebagai *support* TPS3R karena hanya berjumlah 3 unit. Pada grafik tersebut dapat diketahui juga bahwa TPS3R dan TPST setiap tahun bertambah artinya sampah yang diproses oleh TPS3R maupun TPST juga bertambah (efektifitas dan efisiensi TPS3R dan TPST tetap meningkat dengan adanya perumbuhan penduduk), hal ini linear dengan penambahan penduduk setiap tahun dan penambahan jumlah sampah setiap tahun. Namun keadaan model *existing* di TPA dan *landfill* pada model *existing* perlu ditekan, karena jumlah TPA dan *landfill* juga bertambah, sehingga diperlukan skenario penambahan POO, TPS3R pencacah Plastik dan TPST Kompos, yang diharapkan akan mengurangi timbunan sampah di TPA maupun *landfill*.

5.3 Analisis Skenario 1

Pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman membutuhkan upaya pengelolaan sampah yang lebih baik agar dapat mengurangi sampah yang berada pada *landfill* di TPA Piyungan.

Skenario 1 merupakan salah satu upaya penanganan di hilir yang akan membantu TPA berbasis TPST dengan melakukan pembuatan Biogas yang menghasilkan energi dari gas metana (CH_4) dan dapat digunakan untuk memasak, listrik skala kecil, atau dikonversi menjadi bahan bakar. Besarnya timbunan sampah dipengaruhi oleh laju pertumbuhan penduduk Kabupaten Sleman dari besarnya tingkat imigrasi dan tingkat kelahiran. Pada tahun 2024 ke 2025 didapat kenaikan penduduk sebesar 2,14%. Dalam satu tahun peningkatan timbunan sampah yang dihasilkan Kabupaten Sleman pada tahun 2024 ke 2025 mencapai 6.479,55 ton/tahun dengan presentase kenaikan sebesar 2,95%, hingga pada akhir periode simulasi memperkirakan jumlah timbunan sampah dalam satu tahun akan meningkat pada tahun 2034, mencapai 54.017,37 ton/tahun atau meningkat sebesar 24,59% selama 10 tahun.

Sampah yang masuk ke TPA, pada tahun 2024 hingga 2034 pada simulasi *existing*, meningkat 8.209,01 ton/tahun atau naik sebesar 93,95% seiring dengan pertumbuhan penduduk dan 7.408,45 ton/tahun atau naik sebesar 88,78% pada *landfill* (terdapat penurunan sampah di TPA ke *landfill* karena adanya faktor external seperti pemulung dan pengepul sampah di area TPA, biasanya mereka mencari sampah anorganik yang bisa dijual kembali) sedangkan pada Skenario 1 dengan penambahan pengelolaan Pusat Olah Organik (POO) mengalami penurunan rata-rata sebanyak 873,8 ton/tahun atau sebanyak 28,11% pada TPA dan rata-rata menurun 834,50 ton/tahun atau sebanyak 28,71% pada *landfill*. Sehingga Skenario 1 berhasil menjalankan prinsip *Circular Supply Chain Management* dengan konsep *Zero Waste* namun perlu dilakukan penambahan 4 unit POO dan perlu menerapkan strategi Kaizen ketat.

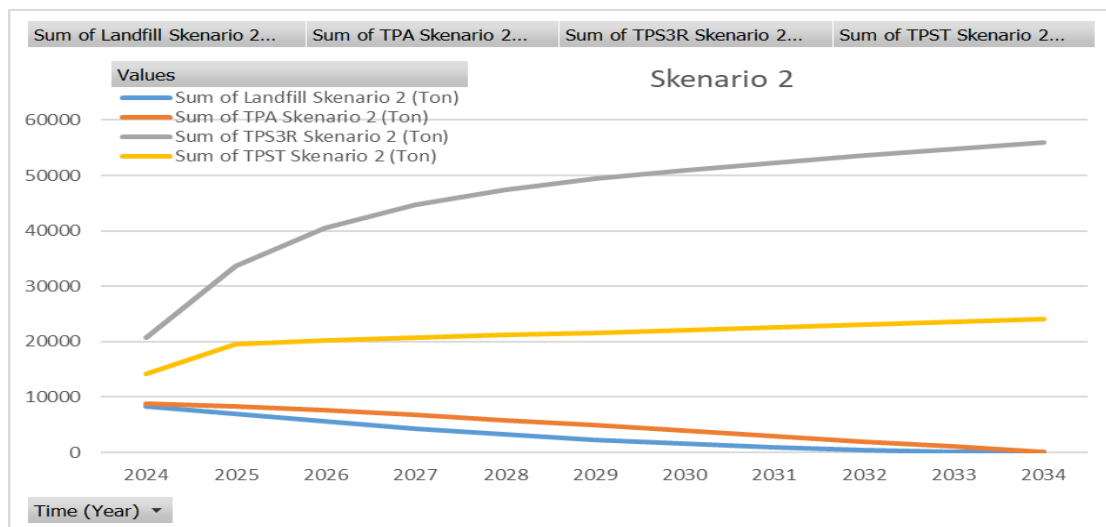


Gambar 5.8 Pivot Chart Hasil Running Simulasi Skenario 1 Kabupaten Sleman

5.4 Analisis Skenario 2

Pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman membutuhkan strategi yang lebih komprehensif agar volume sampah yang masuk ke TPA Piyungan dan *landfill* dapat ditekan lebih awal. Skenario 2 merupakan pengembangan dari skenario 1, yaitu selain adanya Pusat Olah Organik (POO) untuk pengolahan sampah organik, juga ditambahkan unit TPS3R (*Reduce-Reuse-Recycle*) Pencacah Plastik sampah anorganik yang berfungsi mengurangi beban sampah anorganik menuju TPA dan *landfill*.

Pada Skenario 2 dengan penambahan TPS3R Pencacah Plastik dan Pengelolaan Pusat Olah Organik (POO) mengalami penurunan rata-rata sebanyak 873,8 ton/tahun atau sebanyak 28.06% pada TPA dan rata-rata menurun 834,50 ton/tahun atau sebanyak 40,26% pada *landfill*. Sehingga Skenario 2 berhasil menjalankan *prinsip Circular Supply Chain Management* dengan konsep *Zero Waste* lebih baik dibandingkan dengan Skenario 1 dengan selisih penurunan pada *Landfill* sebesar 11,55% dibandingkan dengan Skenario 1, hasilnya *landfill* mengalami penyusutan lebih cepat dibandingkan Skenario 1, dengan dilakukannya penambahan 2 unit TPS3R Pencacah Plastik dan 2 Unit POO dan menerapkan strategi Kaizen normal.



Gambar 5.9 Pivot Chart Hasil *Running* Simulasi Skenario 2 Kabupaten Sleman

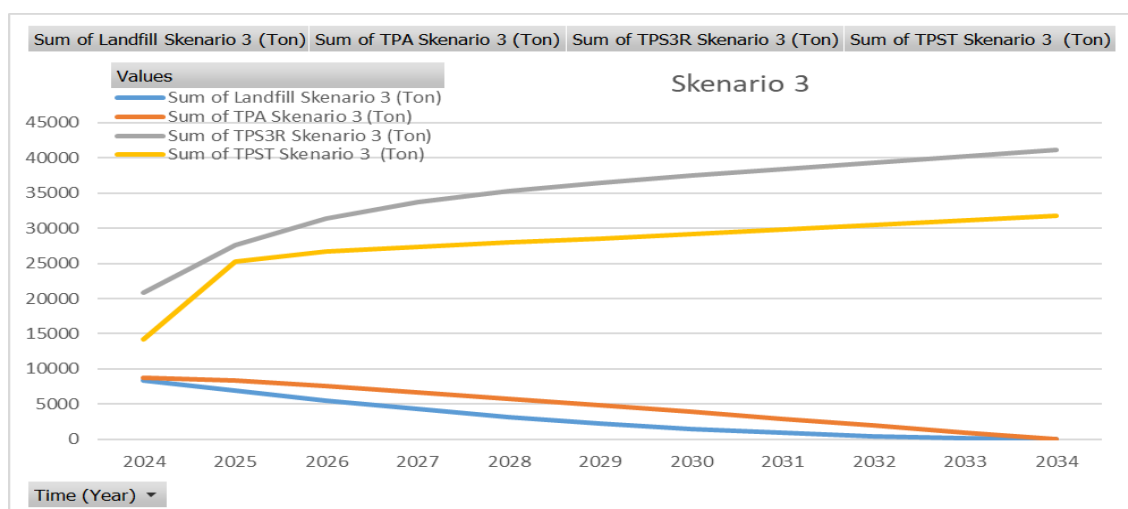
Berdasarkan Pivot Chart Hasil *Running* Simulasi Skenario 2 dapat diketahui bahwa TPS3R skenario 2 mengalami kenaikan artinya TPS3R pencacah plastik memproses sampah anorganik secara efisien dibandingkan dengan skenario 1 maupun *existing*, pada *landfill* skenario 2 juga terdapat penurunan yang lebih cepat dibandingkan Skenario 1, artinya semakin memaksimalkan implementasi CSCM. Dengan demikian, kelebihan Skenario 2 adalah lebih efektif mengurangi beban TPA dan *landfill* lebih cepat pada tahun 2031 *landfill* telah berkurang menjadi <1000 Ton, karena adanya pemisahan dan pemrosesan sampah anorganik yang konkrit

di tengah dan pemrosesan sampah organik POO di hilir, sehingga sistem pengelolaan menjadi lebih berkelanjutan. Kekurangannya, skenario ini membutuhkan biaya operasional yang lebih karena menambahkan unit lebih banyak dibandingkan Skenario 1, serta partisipasi masyarakat yang lebih besar karena harus ada keterlibatan aktif dalam memilah dan memproses sampah anorganik dan organik. Skenario 2 ini merupakan pilihan ideal bagi pengelola sampah di kabupaten Sleman karena sampah anorganik dan organik di proses dengan baik sehingga implementasi CSCM berjalan dengan jauh lebih baik.

5.5 Analisis Skenario 3

Skenario 3 merupakan strategi pengelolaan sampah dengan mengoptimalkan peran POO yang dipadukan dengan Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) untuk menangani sampah organik secara lebih maksimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa TPST mengalami peningkatan dalam pengolahan sampah sebesar 20.316,32 Ton, dibandingkan dengan Skenario 1 dan 2 dengan TPST yang hanya dapat mengolah sampah sebesar 4.289,75 Ton dan mempunyai selisih sebesar 16.026,57 Ton dengan penambahan 1 unit TPST Kompos.

Jika dibandingkan dengan skenario 1 yang hanya mengandalkan Pusat Olah Organik, skenario 3 memberikan hasil yang lebih optimal. Pada tahun 2031 jumlah sampah di *landfill* dapat ditekan dengan hanya menyisakan timbunan di *landfill* sebanyak 905 Ton, skenario 1 masih menghasilkan timbunan sampah di *landfill* sebesar 1000 ton, sedangkan skenario 2 dapat menekan sampah di *landfill* sebanyak 925 Ton. Dengan kata lain, terdapat selisih yang signifikan dibandingkan Skenario 1 dan selisih 20 Ton dibandingkan Skenario 2 pada Timbunan sampah di *landfill*. Hal ini membuktikan bahwa keterlibatan TPST Kompos mampu memperkuat kinerja POO dalam menekan sampah di tengah dan hilir, khususnya sampah organik yang menjadi kontributor terbesar.



Gambar 5.10 Pivot Chart Hasil Running Simulasi Skenario 3 Kabupaten Sleman

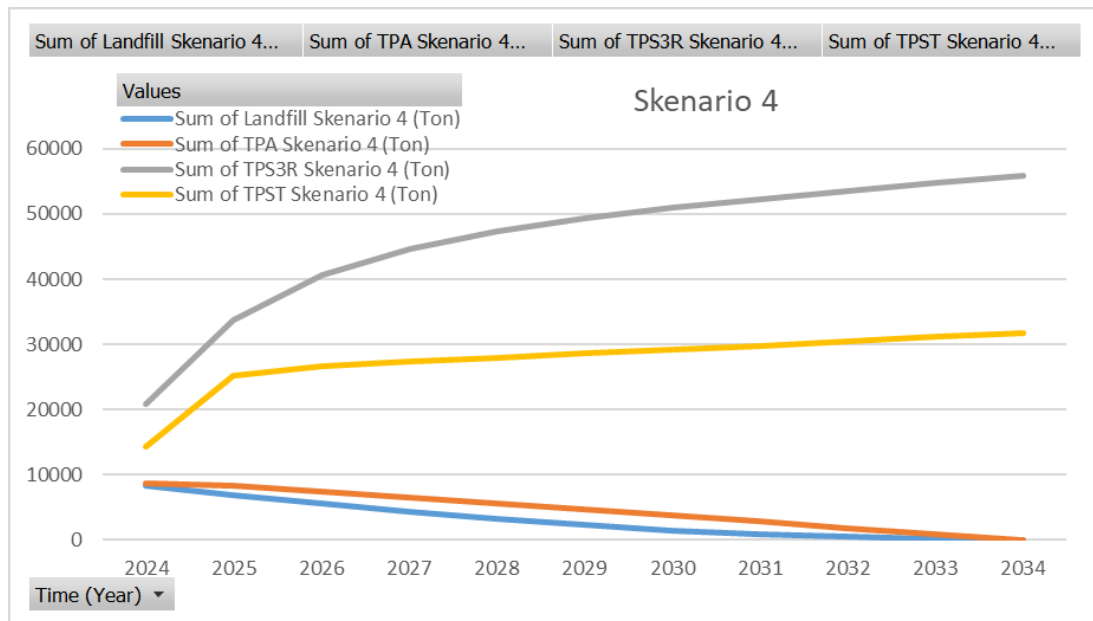
Berdasarkan Pivot *Chart* Hasil *Running* Simulasi Skenario 2 dapat diketahui bahwa kombinasi TPST Kompos dan POO memiliki peran penting dalam menekan sampah organik, yang menghasilkan *landfill* menurun lebih banyak dibandingkan dengan skenario 1 dan 2, karena pemrosesan sampah organik tertangani secara maksimal oleh TPST Kompos di tengah, dan sisa sampah organik dari TPS3R diselesaikan oleh POO. Secara keseluruhan, skenario 3 memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan model *existing* maupun skenario 1 dan 2, karena berhasil menekan sampah di TPA dan *landfill* dalam jumlah signifikan. Kelebihan skenario 3 adalah kemampuannya dalam menekan timbulan organik yang mendominasi sampah kota, sehingga mengurangi tekanan pada *landfill* dan TPA secara langsung. Namun, kekurangannya adalah masih terdapat keterbatasan dalam penanganan sampah anorganik jika dibandingkan dengan skenario 2. Oleh karena itu, skenario 3 dapat menjadi pilihan strategi pengelolaan sampah yang efektif, khususnya jika fokus utama pemerintah adalah menekan sampah lebih cepat di *landfill* dan TPA melalui pengurangan sampah organik di hilir dan tengah.

5.6 Analisis Skenario 4

Skenario 4 merupakan kombinasi strategi pengelolaan sampah yang paling komprehensif, yaitu menggabungkan Pusat Olah Organik (POO) organik, Tempat Pengolahan Sampah 3R (TPS3R) untuk anorganik Pencacah Plastik, dan Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Kompos untuk sampah organik. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pada akhir periode tahun 2034, jumlah sampah yang masuk ke TPA turun lebih cepat dibandingkan dengan Skenario 1,2 dan 3, dengan Skenario 1 TPA dapat menyentuh Timbulan dibawah 1000 Ton pada tahun 2034, Skenario 2 pada tahun 2034 dan Skenario 3 pada tahun 2033 sama dengan Skenario 4 namun memiliki selisih 65,76 Ton pada Skenario 4 memiliki Timbulan TPA paling sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi skenario ini mampu memberikan dampak paling signifikan dalam mengurangi beban sampah di hilir.

Jika dibandingkan dengan Skenario 1 pada *landfill* Skenario 4 dapat menekan Timbulan sampah lebih cepat, sama halnya dengan Skenario 2 pada Skenario 4 dapat menekan Timbulan Sampah di *landfill* lebih cepat, Namun terdapat selisih kurang dari 2 Ton dibandingkan dengan Skenario 3 dalam menekan sampah di *landfill*, Hal ini terjadi karena pada Skenario 4 hanya menambahkan 1 POO sedangkan Skenario 3 menambahkan 2 POO. Artinya, Skenario 4 lebih efisien dan merata dalam mengolah sampah yakni dengan penambahan 1 unit TPS3R pencacah plastik, 1 TPST kompos dan 1 unit POO. Penambahan TPS3R pada skenario 4 melengkapi kelemahan skenario 3 yang hanya fokus pada pengolahan organik. Dengan integrasi TPS3R

untuk anorganik, penurunan sampah menjadi lebih seimbang baik pada TPA dan *landfill*. Berikut merupakan Pivot *Chart* Hasil *Running* Simulasi Skenario 4.

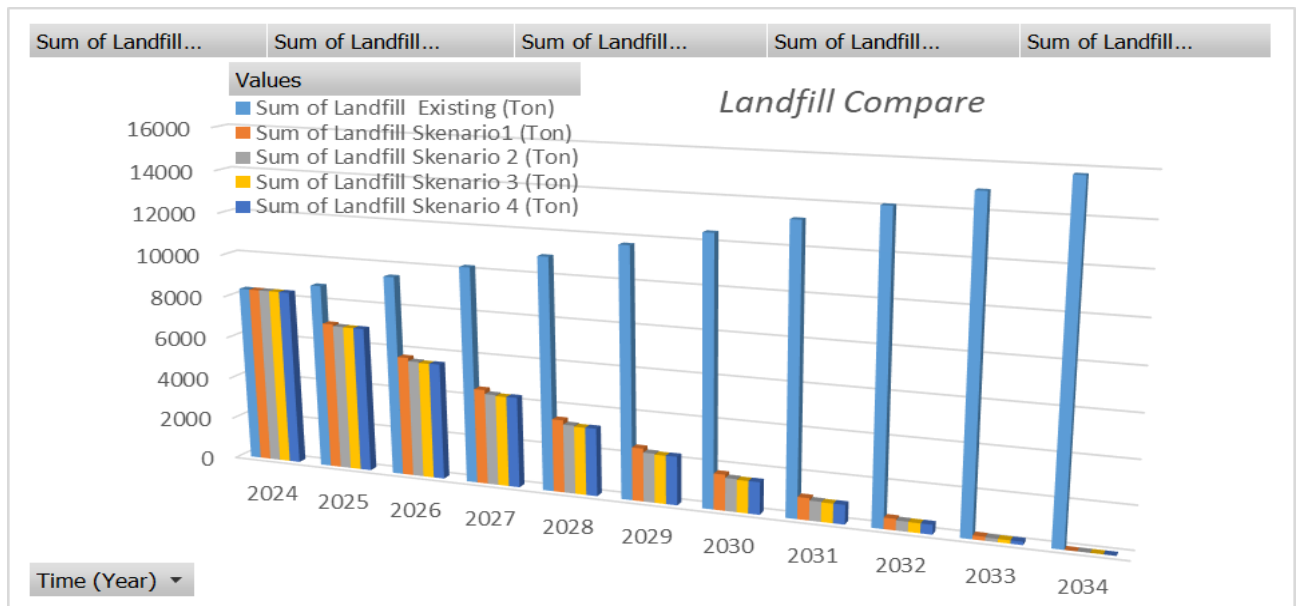


Gambar 5.11 Pivot *Chart* Hasil *Running* Simulasi Skenario 4 Kabupaten Sleman

Secara keseluruhan, skenario 4 merupakan strategi paling efektif karena mengombinasikan pengolahan organik dan anorganik secara seimbang, sehingga mampu menekan timbulan sampah di TPA dan *landfill* dengan sangat signifikan. Dibandingkan dengan model model yang lain, skenario 4 lebih merata dalam segala aspek pada pengolahan sampah. Skenario 4 juga merupakan implementasi sempurna dari CSCM karena memaksimalkan pengurangan limbah di berbagai aspek. Keunggulannya terletak pada sifatnya yang holistik, mencakup semua jenis sampah utama. Namun, kelemahannya adalah memerlukan biaya investasi, koordinasi kelembagaan, serta sarana prasarana yang lebih besar dibandingkan skenario lainnya. Berikut merupakan gambar dan tabel perbandingan antar skenario tiap unit.

Tabel 5.1 *Landfill Compare*

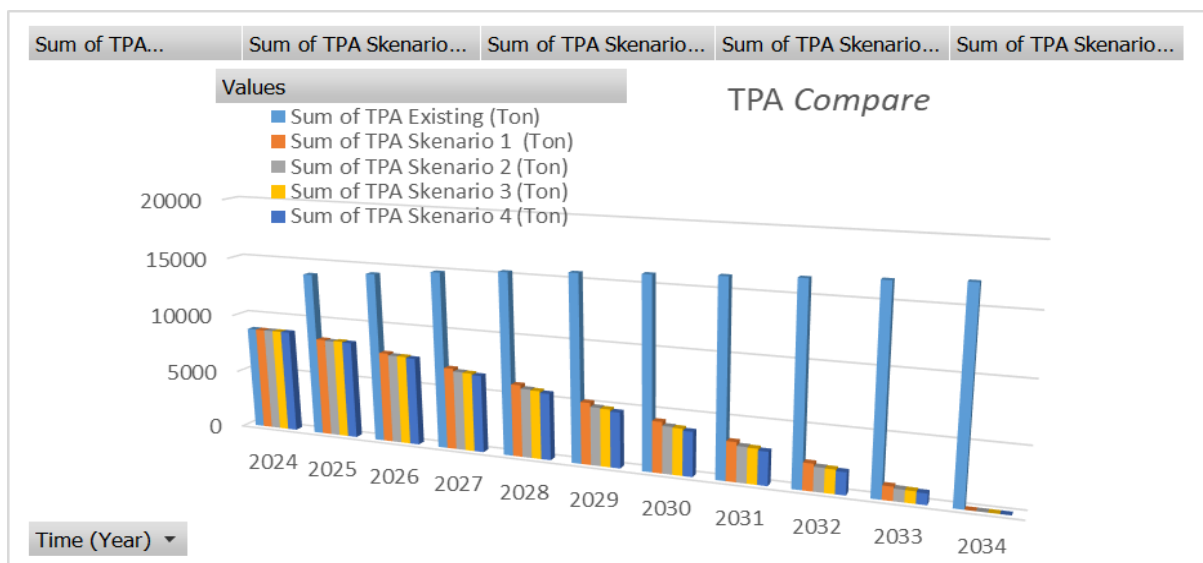
Tahun	<i>Landfill Existing</i>	<i>Landfill Skenario 1</i>	<i>Landfill Skenario 2</i>	<i>Landfill Skenario 3</i>	<i>Landfill Skenario 4</i>
2024	8.345,00	8.345	8.345	8.345	8.345
2025	8.781,90	6.994,86	6.911,72	6.896,34	6.896,98
2026	9.478,47	5.701,69	5.550,86	5.512,8	5.522,42
2027	10.197,09	4.512,11	4.324,18	4.277,12	4.288,92
2028	10.942,31	3.440,84	3.244,56	3.198,15	3.208,6
2029	11.708,51	2.498,09	2.317,18	2.277,09	2.284,9
2030	12.491,12	1.692,46	1.544,11	1.513,22	1.518,29
2031	13.287,67	1.031,93	925,97	905,14	907,93
2032	14.097,06	524,34	462,75	451,25	452,46
2033	14.918,97	177,63	154,19	150,01	150,34
2034	15.753,45	0,01	0,01	0,01	0,01



Gambar 5.12 Pivot Chart Landfill Compare

Tabel 5.2 TPA Compare

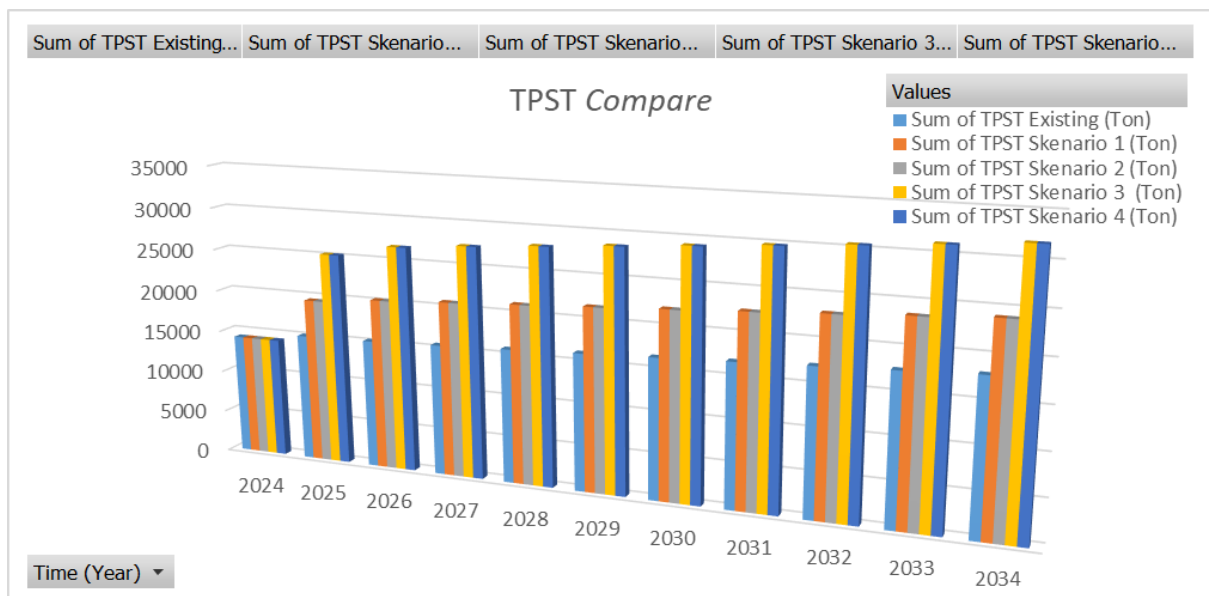
Tahun	TPA Existing	TPA Skenario 1	TPA Skenario 2	TPA Skenario 3	TPA Skenario 4
2024	8.738,00	8.738	8.738	8.738	8.738
2025	13.931,45	8.369,33	8.301,98	8.352,4	8.296,39
2026	14.372,34	7.698,92	7.555,26	7.552,47	7.465,82
2027	14.904,32	6.933,17	6.713,07	6.676,04	6.556,68
2028	15.324,13	6.101,41	5.819,92	5.767,01	5.620,92
2029	15.652,12	5.213,99	4.895,19	4.838,1	4.676,87
2030	15.930,96	4.274,91	3.948,34	3.894,49	3.732,66
2031	16.187,94	3.285,11	2.983,92	2.938,4	2.791,92
2032	16.438,13	2.243,86	2.003,99	1.970,63	1.856,08
2033	16.689,68	1.149,55	1.009,32	991,26	925,5
2034	16.947,01	0,01	0,01	0,01	0,01



Gambar 5.13 Pivot Chart TPA Compare

Tabel 5.3 TPST Compare

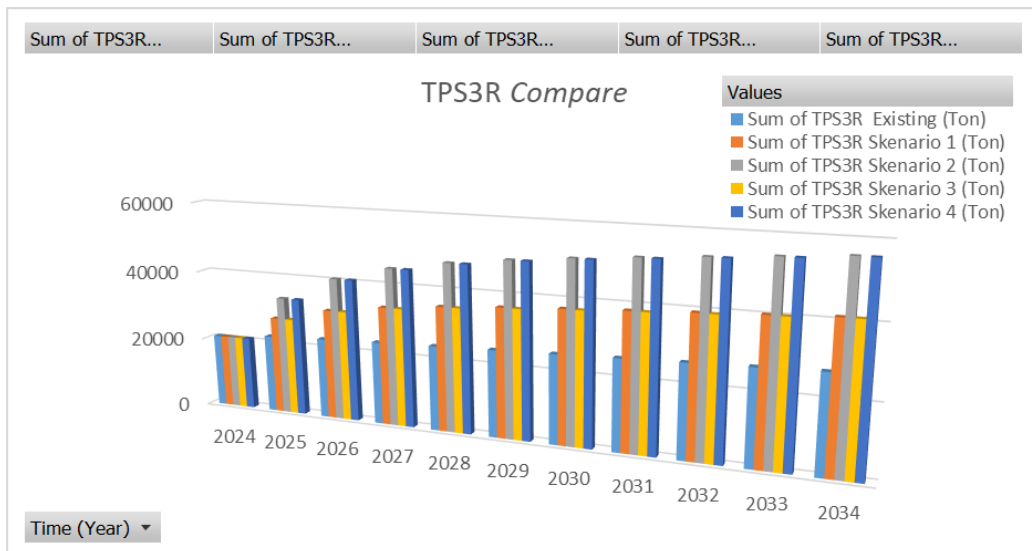
Tahun	TPST <i>Existing</i>	TPST Skenario 1	TPST Skenario 2	TPST Skenario 3	TPST Skenario 4
2024	14.232,00	14.232	14.232	14.232	14.232
2025	15.114,08	19.523,53	19.523,53	25.212,79	25.212,79
2026	15.249,74	20.249,7	20.249,7	26.700,87	26.700,87
2027	15.543,40	20.713,5	20.713,5	27.384,19	27.384,19
2028	15.871,47	21.160,5	21.160,5	27.984,63	27.984,63
2029	16.210,50	21.613,81	21.613,81	28.585,39	28.585,39
2030	16.557,33	22.076,41	22.076,41	29.197,38	29.197,38
2031	16.911,65	22.548,87	22.548,87	29.822,25	29.822,25
2032	17.273,56	23.031,41	23.031,41	30.460,45	30.460,45
2033	17.643,21	23.524,28	23.524,28	31.112,29	31.112,29
2034	18.020,78	24.027,71	24.027,71	31.778,11	31.778,11



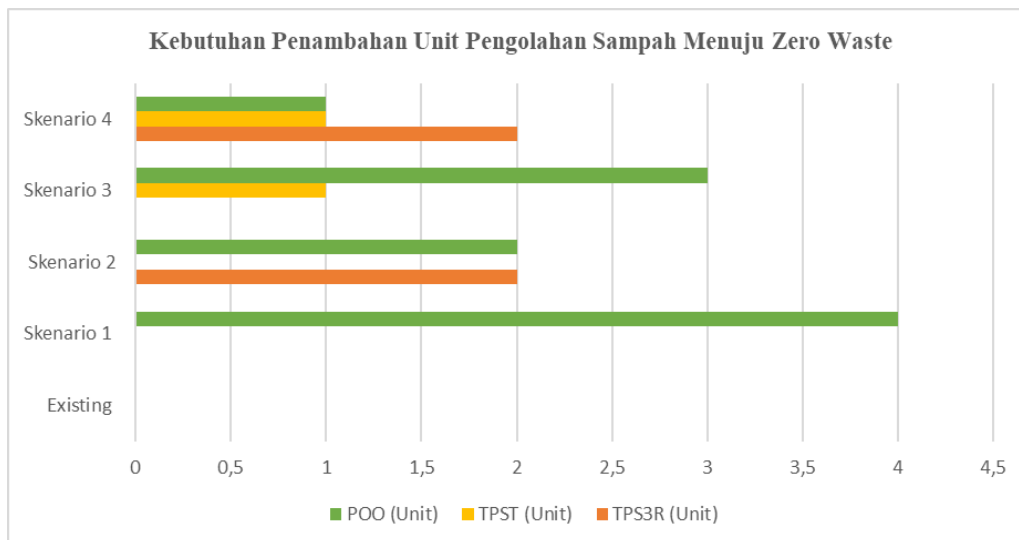
Gambar 5.14 Pivot Chart TPST Compare

Tabel 5.4 TP3R Compare

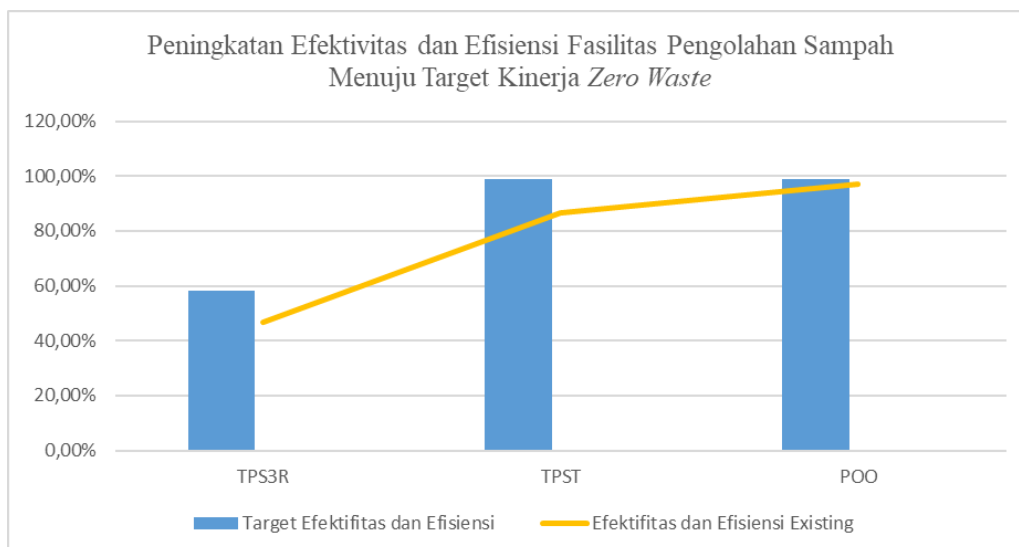
Tahun	TPS3R <i>Existing</i>	TPS3R Skenario 1	TPS3R Skenario 2	TPS3R Skenario 3	TPS3R Skenario 4
2024	20.791,00	20.791	20.791	20.791	20.791
2025	22.140,37	27.668,71	33.674,51	27.668,71	33.674,51
2026	22.875,42	31.358,78	40.574,78	31.358,78	40.574,78
2027	23.497,70	33.671,59	44.724,13	33.671,59	44.724,13
2028	24.071,13	35.267,08	47.429,96	35.267,08	47.429,96
2029	24.623,87	36.488,2	49.377,18	36.488,2	49.377,18
2030	25.170,87	37.517,7	50.930,83	37.517,7	50.930,83
2031	25.720,23	38.453,13	52.285,7	38.453,13	52.285,7
2032	26.276,34	39.346,7	53.545,86	39.346,7	53.545,86
2033	26.841,69	40.226,38	54.767,03	40.226,38	54.767,03
2034	27.417,73	41.107,32	55.979,19	41.107,32	55.979,19



Gambar 5.15 Pivot Chart TPS3R Compare



Gambar 5.16 Penambahan Unit Fasilitas Pengolahan Sampah untuk Mencapai Zero Waste



Gambar 5.17 Target Efektifitas & Efisiensi Pengolahan Sampah untuk Mencapai Zero Waste

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan berdasarkan perancangan implementasi strategi *circular supply chain* dengan menggunakan sistem dinamis, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

6.1 Kesimpulan

Berikut ini merupakan kesimpulan yang disusun secara lengkap dan relevan dengan rumusan masalah diatas sebagai berikut :

1. Strategi Implementasi CSCM Berdasarkan Model *Existing* adalah berdasarkan hasil analisis sistem dinamis, model *existing* pengelolaan sampah di Kabupaten Sleman masih menunjukkan karakteristik sistem semi *linear supply chain*, yaitu sistem “kumpul angkut buang” di sisi hilir dengan ketergantungan tinggi pada TPA Piyungan. Model ini belum sepenuhnya menerapkan prinsip 5R (*Reduce, Reuse, Recycle, Recover, Redesign*) dan belum mengintegrasikan *reverse logistics* serta sistem daur ulang terpadu. Namun, struktur dasar rantai pasok pengelolaan sampah sudah terbentuk, meliputi Desentralisasi di hulu oleh RT/RW, bank sampah, TPS3R dan TPST. Ini menjadi pondasi awal yang dapat dikembangkan menjadi *circular supply chain management* yang berkelanjutan. Kemudian dilakukan penambahan Pusat Olah Organik (POO) di hilir, Pencacah Plastik TPS3R dan Kompos TPST pada proses pengolahan sampah di tengah guna memperbaiki sistem pengolahan sampah dan pengurangan limbah di Kabupaten Sleman.
2. Skenario Pengelolaan Sampah yang Paling Efektif dan Efisien, Dari empat skenario simulasi yang dikembangkan adalah Skenario 4 terbukti paling optimal. Skenario ini mengintegrasikan berbagai subsistem, yaitu pencacahan plastik di TPS3R, optimalisasi untuk pemilahan dan pengolahan anorganik, serta penguatan TPST dan Pusat Olah Organik (POO) untuk pengolahan sampah organik menjadi kompos dan energi alternatif. Hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan kapasitas pengolahan melalui TPS3R sebesar $\pm 104\%$ dan TPST sebesar $\pm 76\%$ dibandingkan kondisi *eksisting*. Selain itu, Skenario 4 menciptakan *multi-loop system* yang mendukung sirkulasi material dan nilai ekonomi baru dari limbah, sehingga menjadi dasar untuk sistem CSCM yang efisien dan adaptif. Sementara itu pada posisi kedua ditempati oleh skenario 2 (Pencacah Plastik & POO) yang dapat membantu mengurangi sampah anorganik dan organik secara

signifikan, kemudian skenario 3 (Kompos&POO) *advance* dalam mengolah sampah organik oleh TPST dan POO serta mengurangi timbunan *landfill* secara signifikan, yang terakhir skenario 1 (POO) membuat *closed loop* di hilir.

3. Langkah Strategis bagi Pemerintah Kabupaten Sleman, Untuk memperkuat implementasi CSCM, Pemerintah Kabupaten Sleman perlu menyiapkan kebijakan berbasis integrasi multi-aktor dan sistem informasi terpadu. Hal ini mencakup:
 - a. Peningkatan kapasitas kelembagaan DLH dan perangkat desa dalam mengelola data dan sistem pengawasan berbasis teknologi.
 - b. Penguatan edukasi dan partisipasi masyarakat dalam pemilahan sampah dari sumber (melanjutkan dan menguatkan kebijakan Desentralisasi di hulu).
 - c. Kolaborasi antara sektor publik, swasta, dan komunitas dalam membangun rantai pasok sirkular (*Circular Supply Chain Management*).
 - d. Mengimplementasikan penerapan rancangan model skenario yang telah dibuat sehingga dapat memperbaiki serta membantu pengolahan sampah di proses tengah dan di hilir, yang dapat mengurangi timbunan sampah atau limbah di *landfill*.
 - e. Pemberian insentif bagi inisiatif daur ulang dan inovasi produk berbasis sampah. Dengan langkah-langkah tersebut, konsep *Circular Supply Chain Management* dapat diterapkan secara nyata untuk mencapai pengelolaan sampah yang berkelanjutan, mandiri, dan bernilai ekonomi.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk keberlanjutan implementasi strategi *circular supply chain* dengan menggunakan sistem dinamis sebagai berikut:

1. Bagi Pemerintah Daerah
 - Segera mengembangkan kebijakan daerah yang mengintegrasikan prinsip *Circular Economy* dan CSCM dalam Rencana Induk Pengelolaan Sampah Daerah (RIPSD).
 - Meningkatkan koordinasi antarinstansi, terutama DLH, Dinas Perindustrian, dan Dinas UMKM untuk mendukung terciptanya ekosistem industri daur ulang lokal.
 - Menerapkan sistem insentif dan disinsentif, seperti pengurangan retribusi bagi masyarakat yang aktif memilah sampah dan penalti bagi pelanggaran pengelolaan limbah.

2. Bagi Masyarakat dan Komunitas

- Meningkatkan kesadaran terhadap pentingnya pemilahan sampah dari sumber melalui edukasi lingkungan dan kegiatan *waste to value*.
- Meningkatkan koperasi daur ulang atau bank sampah yang dapat menjadi bagian dari rantai pasok sirkular daerah.
- Mengoptimalkan potensi ekonomi dari sampah organik dan anorganik, seperti produksi kompos, biogas, dan bahan bakar alternatif berbasis RDF.

3. Bagi Akademisi dan Peneliti Selanjutnya

- Disarankan untuk menggunakan validasi triangulasi guna meningkatkan keabsahan model. Pendekatan ini mengintegrasikan berbagai sumber data, metode analisis, teori, dan penilaian ahli agar model mencerminkan kondisi nyata di lapangan serta sesuai dengan prinsip CSCM. Dengan penerapan triangulasi, hasil simulasi menjadi lebih valid, realistis, dan mendukung perumusan kebijakan pengolahan sampah yang berkelanjutan.
- Pengembangan dan penguatan model di hulu yang mendukung desentralisasi, contohnya pemerintah daerah bekerjasama dengan perusahaan pemroduksi sampah kemudian sampah di kembalikan atau di proses oleh perusahaan pemroduksi sampah, seperti Nestlé (Menerapkan praktik kemasan berkelanjutan dengan mengurangi berat kemasan, memberdayakan bank sampah, dan meluncurkan produk seperti sedotan kertas untuk mengurangi limbah plastik.), Astra (program *circular economy*), IKEA (Menerapkan program *go green*), Panasonic (menerapkan inisiatif ramah lingkungan), *Circular Logistics Co* (pengambilan kembali barang bekas dari mitra bisnisnya, mendaur ulang bahan baku untuk produk baru), dan Perusahaan lainnya.
- Disarankan untuk memperluas model sistem dinamis dengan memasukkan variabel sosial dan ekonomi, seperti perilaku masyarakat dan biaya penambahan unit pengolahan sampah maupun unit pendukung logistik.

Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa penerapan *Circular Supply Chain Management* berbasis sistem dinamis bukan hanya menjadi solusi teknis, tetapi juga strategi kebijakan komprehensif menuju pengelolaan sampah berkelanjutan dan berkeadilan di Kabupaten Sleman. Model ini dapat direplikasi di daerah lain dengan menyesuaikan karakteristik sosial, ekonomi, dan infrastruktur lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Guarnieri, P., Oliveira, L. H., Demajorovic, J. 2023. From Trash to Profit: Packaging Waste Management in the Circular Economy. *Logistics*, Vol. 7(3), Article 66. DOI : 10.3390/logistic7030066.
- Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., Mäkinen, S. J. 2021. Circular economy innovations and market creation: A study on disruptive business models. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 146, pp. 218-231.
- Dell Technologies. 2023. Closed-loop Plastics Recycling for IT Products. *Internal Sustainability Reports*. [Unpublished Data].
- Oliveira, F., Silva, P. 2021. Strategies to promote circular economy in the management of construction and demolition waste at the regional level. *Journal of Environmental Management*, Vol. 299, Article 113601.
- Montag, T., Petersen, L., Schupp, F. 2022. Circular Supply Chain Definitions and Conceptualizations. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 186, Article 106547.
- Agrawal, S., Singh, R. K. 2019. Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple bottom line approach. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 150, Article 104448.
- Blum, C., Haupt, M., Hellweg, S. 2020. Circular economy and supply chains: Challenges and opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 24(5), pp. 1021-1030.
- Dissanayake, D., Weerasinghe, S. 2023. Circular supply chain practices: Challenges and innovations. *Journal of Operations and Production Management*, Vol. 43(2), pp. 234-251.
- Vlachos, I. 2016. Reverse logistics capabilities and firm performance: Mediating role of business strategy. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 2114-2124
- Scott McDonald, A., Singh, S., Chang, C. 2023. Navigating environmental challenges through supply chain quality management 4.0 in circular economy. *Global Supply Chain Review*, Vol. 2(1), pp. 15-29.
- Sznitowski, S., Barros, P., Almeida, T. 2023. Circular practices in a rural property in Mato Grosso, Brazil. *Rural Sustainability*, Vol. 5(3), pp. 89-101.
- Patagonia. 2023. Upcycling in Outdoor Apparel Supply Chains. *Environmental Progress Reports*. [Unpublished].
- European Packaging Management Initiative. 2023. Circular models for food packaging waste management. *European Journal of Packaging Studies*, Vol. 17(4), pp. 45-63.

- Parajuly, K., Habib, K., Liu, G. 2021. Designing sustainable circular supply chains: The case of electronic waste. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 25(3), pp. 678-692.
- Geisendorf, S., Pietrulla, F. 2018. The circular economy and circular economic concepts: A review of research streams. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 195, pp. 127-140.
- Agrawal, S., Singh, R. K. 2019. Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple bottom line approach. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 150, Article 104448.
- Vasquez, J., Ramirez, L. 2023. Waste-to-energy in circular supply chains: Applications in urban settings. *Journal of Environmental Innovation*, Vol. 9(2), pp. 204-219.
- Blumhardt, R., Thomson, L. 2023. Leveraging AI for circular supply chain optimization in waste management. *Technological Advances in Sustainability*, Vol. 14(1), pp. 33-52.
- Kravchenko, M., Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2019). *Towards the ex-ante sustainability screening of circular economy initiatives in manufacturing companies: Consolidation of leading sustainability-related performance indicators*. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118318.
- Çıkmak, E., & Kesici, E. (2023). *Circular supply chain practices: Challenges, innovations, and development*. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135266.
- Vegter, J., Barros, A. I., & Dekker, R. (2021). *Circular waste management: Reimagining urban systems in developing countries*. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105511.
- Masi, D., Day, S., & Godsell, J. (2017). *Supply chain configurations in the circular economy: A systematic literature review*. *Sustainability*, 9(9), 1602.
- Baxter, N., Collings, D., and Adjali, I., 2003. Agent-based modeling – intelligent customer relationship management. *BT Technology Journal*, 21 (2), 126–132.
- Beamon, M. 1999. *International Journal of Operation and Production Management*. Volume 19.
- Bakker, C., Wang, F., Huisman, J., Den Hollander, M., 2014. Products that go round: exploring product life extension through design. *J. Clean. Prod.* 69, 10e16.
- Boulding, K. 1996. *Environmental Quality in a Growing Economy*, pp. 3-14. Baltimore, MD: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press.
- Bowen, G.A., 2009. Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative research journal*, 9(2), pp.27-40.
- Carter, P. L., Monczka, R. M., Ragatz, G. L., & Jennings, P. L. (2009). Supply chain integration.
- Carter, R.C., Dale, S.R., 2008. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *Int. J. Phys. Distribution. Logistic. Management*. 38 (5), 360e387.

- De Angelis, R., Howard, M. and Miemczyk, J., 2018. Supply chain management and the circular economy: towards the circular supply chain. *Production Planning & Control*, 29(6), pp.425-437.
- De Wit, M., Hoogzaad, J., Ramkumar, S., Friedl, H. and Douma, A., 2018. The Circularity Gap Report: An analysis of the circular state of the global economy. Circle Economy: Amsterdam, The Netherlands.
- De Angelis, R., Howard, M. and Miemczyk, J., 2018. Supply chain management and the circular economy: towards the circular supply chain. *Production Planning & Control*, 29(6), pp.425-437.
- EMF (Ellen MacArthur Foundation) Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-Up across Global Supply Chains (2014).
- Farooque, M., Zhang, A., Thurer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*
- Genovese, A., Acquaye, A.A., Figueroa, A. and Koh, S.L., 2017. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, pp.344-357.
- Ghisellini et al., 2018 P. Ghisellini, X. Ji, G. Liu, S. Ulgiati Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: a review *J. Clean. Prod.*, 195 (2018), pp. 418-434.
- Gorissen L et al 2016. Transition thinking and business model innovation towards a transformative business model and new role for the reuse centres of Limburg.
- Hasanaj, M. and Jansson, A., Supply Chain Management—A way to achieve Circular Economy.
- Hobson, K., 2016. Closing the loop or squaring the circle? Locating generative spaces for the circular economy.
- Hokey Min 2010. Artificial intelligence in supply chain management and theory. *International journal of Logistics*.
- Hobson, K., Lynch, N., Lilley, D., Smalley, G., 2017. Systems of practice and the Circular Economy: transforming mobile phone product service systems. *Environmental Innovation*.
- Hong, P., & Jeong, J. (2006). Supply chain management practices of SMEs: from a business growth perspective. *Journal of Enterprise Information Management*, 19(3), 292-302.

- Humphreys, P., Huang, G., and McIvor, R., 2002. An expert system for evaluating the make or buy decision. *Computers and Industrial Engineering*, 42 (2/4), 567–585.
- Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 44(6), 434-463.
- Lorentz, H & Hilmola, O 2012, 'Confidence and supply chain disruptions', *Journal of Modeling in Management*, vol. 7, no. 3, pp. 328-356
- Meadows et al., 1972 D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens *The Limits to Growth*. Universe Books New York (1972).
- Nasir et al 2017. Comparing linear circular supply chain . *Journal Production*
- Stael. W .2010 *The Performance Economy* 2010.
- Weetman, C , 2017. *A circular economy handbook for business and supply chains: Repair , Remake , Redesign , Rethink* , Kogan page.
- Wang and Kuah, 2018 P. Wang, A.T.H. Kuah *Green marketing cradle-to-cradle: remanufactured products in Asian markets* *Thunderbird Int. Business Rev.*, 60 (5) (2018), pp. 783-795.
- Azevedo, B. D., Scavarda, L. F., Caiado, R. G. G. 2019. Urban solid waste management in developing countries from the sustainable supply chain management perspective: A case study of Brazil's largest slum. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 233, pp. 1377-1386.
- Zhou, Z., Chi, Y., Dong, J., Tang, Y., Ni, M. 2019. Model development of sustainability assessment from a life cycle perspective: a case study on waste management systems in China. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 210, pp. 1005-1014
- Fetanat, A., Mofid, H., Mehrannia, M., Shafipour, G. 2019. Informing energy justice based decision-making framework for waste-to-energy technologies selection in sustainable waste management: a case of Iran. *Journal of Cleaner*
- Kuznetsova, E., Cardin, M. A., Diao, M., Zhang, S. 2019. Integrated decision support methodology for combined centralized-decentralized waste-to-energy management systems design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 103, pp. 477-500.
- Phonphoton, N. & Pharino, C. 2019. Multi-criteria decision analysis to mitigate the impact of municipal solid waste management services during floods. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 146, pp. 106-113.

- Phonphoton, N., & Pharino, C. 2019. A system dynamics modeling to evaluate flooding impacts on municipal solid waste management services. *Waste Management*, Vol. 87, pp. 525-536.
- Tirkolaei, E. B., Mahdavi, I., Esfahani, M. M. S., Weber, G. W. 2020. Strong green site allocation inventory problem to design urban waste management systems under uncertainty. *Waste Handling*, Vol. 102, pp. 340-350.

LAMPIRAN

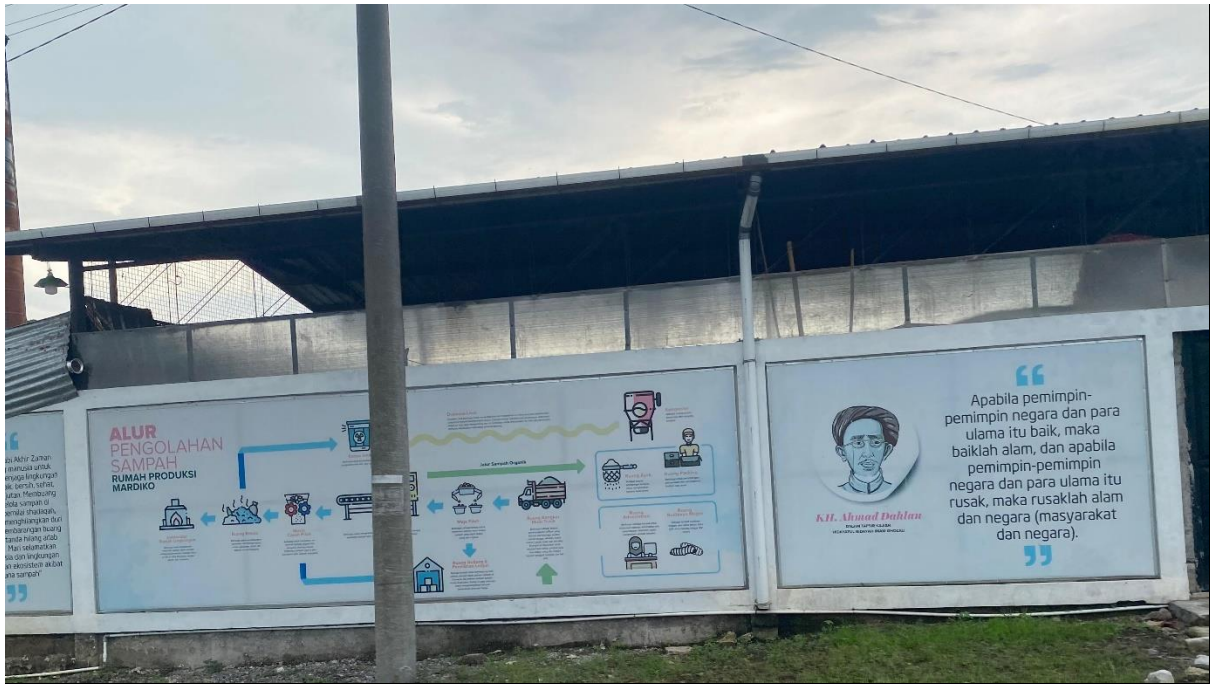














PEMERINTAH KABUPATEN SLEMAN
DINAS LINGKUNGAN HIDUP

Jalan KRT. Pringgodiningrat, Beran, Tridadi, Sleman, Yogyakarta, 55511
Telepon (0274) 868316, Faksimile (0274) 868316
Website : www.slemankab.go.id, E-mail : klh@slemankab.go.id

TANDA TERIMA SURAT ATAU DOKUMEN

Surat Dari : Dwina2 Fadzil Muhammad.
Tanggal Surat : 2 Juni 2025
Nomor Surat : 67/kaprodi/70/MTI/VI/2025
Perihal Surat : permohonan ijin penelitian



Diterima

- Tanggal : 3-6-2025 ✓
- Penerima : YCI
- Tanda Tangan :

LEMBAR DISPOSISI

Indeks:	Kode:	Nomor Urut:	Tgl. Penyelesaian:
ZIN	503	1339	

Isi Ringkas: Permohonan izin penelitian

LEMBAR DISPOSISI

Indeks:	Kode:	Nomor Urut:	Tgl. Penyelesaian:
IZIN	503	1339	

Isi Ringkas: Permohonan izin penelitian

Asal Surat:	Tanggal:	Nomor:	Lamp.:
OWINAZ FADZIL MUHAMMAD	3 Juni 2025	671 Kaprodi 70/MT/IVU 2025	-

Diteruskan Kepada:

Sekretariat
dan Kebersihan
Pengelolaan Ruang
Rak Hijau
Pengendalian
Lingkungan Hidup
dan Tata
Lingkungan Hidup
Pelayanan
Pelayanan

Informasi/Instruksi:

Dibantu

3/6 4/6

Asal Surat:	Tanggal:	Nomor:	Lamp.:
OWINAZ FADZIL MUHAMMAD	3 Juni 2025	671 Kaprodi 70/MT/IVU 2025	-

Diteruskan Kepada:

1. Sekretariat
2. Bidang Kebersihan dan Pengelolaan Ruang Terbuka Hijau
3. Bidang Pengendalian Lingkungan Hidup
4. Bidang Tata Lingkungan Hidup
5. UPTD Pelayanan Persampahan

Informasi/Instruksi:

Bantu periksa
koordinasi dengan
menunggu
5/6

Fe. Bel KPTI
- UPTD Persampahan

Persampahan

- Bantu
1 10/6

Me. Auu

- Urang, 10/6 hari

ini

10/6

Kuisisioner Penelitian Pengolahan Sampah TPS3R

Dengan Hormat,

Perkenalkan saya Dwinaz Fadzil Muhammad, Mahasiswa Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia sedang melakukan penelitian mengenai "Perancangan Strategi *Circular Supply Chain Management* Berbasis Sistem Dinamis Pada Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta".

Saya mohon kesediaan Bapak/Ibu/Saudara/i untuk mengisi kuesioner ini dengan jujur dan objektif. Partisipasi Anda sangat berharga dalam membantu saya dalam memperoleh data yang akurat dan relevan. Seluruh jawaban yang diberikan akan dijaga kerahasiaannya dan hanya digunakan untuk kepentingan penelitian ini.

Terima kasih atas waktu dan partisipasi Bapak/Ibu/Saudara/i.

Hormat saya,
Dwinaz Fadzil Muhammad
Universitas Islam Indonesia

1. Bagaimana cara Pengelolaan Sampah yang dilakukan di TSP3R saat ini ?

Mark only one oval.

- ☐ Pemrosesan Organik (.....)
- ☐ Pemrosesan Anorganik (.....)
- ☐ Produk yang dihasilkan (.....)
- ☐ Alat / Mesin yang digunakan (.....)
- ☐ Jumlah Karyawan (.....)
- ☐ Luas lahan (.....)
- ☐ Kapasitas penampungan sampah (.....)
- ☐ Other: _____

2. Berapa rata-rata Sampah Masuk dan Sampah yang berhasil diolah ?

Check all that apply.

- ☐ Sampah Masuk (..... Ton), Sampah Diolah (..... Ton)

Kuisisioner Penelitian Pengolahan Sampah TPST

Dengan Hormat,

Perkenalkan saya Dwinaz Fadzil Muhammad, Mahasiswa Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia sedang melakukan penelitian mengenai "Perancangan Strategi *Circular Supply Chain Management* Berbasis Sistem Dinamis Pada Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta".

Saya mohon kesediaan Bapak/Ibu/Saudara/i untuk mengisi kuisisioner ini dengan jujur dan objektif. Partisipasi Anda sangat berharga dalam membantu saya dalam memperoleh data yang akurat dan relevan. Seluruh jawaban yang diberikan akan dijaga kerahasiaannya dan hanya digunakan untuk kepentingan penelitian ini.

Terima kasih atas waktu dan partisipasi Bapak/Ibu/Saudara/i.

Hormat saya,
Dwinaz Fadzil Muhammad
Universitas Islam Indonesia

1. Bagaimana cara Pengelolaan Sampah yang dilakukan di TSPST saat ini ?

Mark only one oval.

- ☐ Pemrosesan Organik (.....)
- ☐ Pemrosesan Anorganik (.....)
- ☐ Produk yang dihasilkan (.....)
- ☐ Alat / Mesin yang digunakan (.....)
- ☐ Jumlah Karyawan (.....)
- ☐ Luas lahan (.....)
- ☐ Kapasitas penampungan sampah (.....)
- ☐ Other: _____

2. Berapa rata-rata Sampah Masuk dan Sampah yang berhasil diolah ?

Check all that apply:

- ☐ Sampah Masuk (..... Ton), Sampah Diolah (..... Ton)

Kuisisioner Penelitian Pengolahan Sampah TPA

Dengan Hormat,

Perkenalkan saya Dwinaz Fadzil Muhammad, Mahasiswa Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia sedang melakukan penelitian mengenai "Perancangan Strategi *Circular Supply Chain Management* Berbasis Sistem Dinamis Pada Pengelolaan Sampah di Kabupaten Sleman, Yogyakarta".

Saya mohon kesediaan Bapak/Ibu/Saudara/i untuk mengisi kuesioner ini dengan jujur dan objektif. Partisipasi Anda sangat berharga dalam membantu saya dalam memperoleh data yang akurat dan relevan. Seluruh jawaban yang diberikan akan dijaga kerahasiaannya dan hanya digunakan untuk kepentingan penelitian ini.

Terima kasih atas waktu dan partisipasi Bapak/Ibu/Saudara/i.

Hormat saya,
Dwinaz Fadzil Muhammad
Universitas Islam Indonesia

1. Berapa banyak rata-rata Sampah Masuk TPA?

2. Presentase Komposisi Sampah

⌵ Dropdown

Mark only one oval.

- ☐ Sisa Makanan (%)
☐ Kayu/Ranting (%)
☐ Plastik (%)
☐ Logam (%)
☐ Kaca (%)
☐ (%)
☐ (%)