

PEMODELAN DINAMIS PENGOLAHAN PERSAMPAHAN KOTA MAKASSAR DENGAN MENGGUNAKAN APLIKASI STELLA



MUHAMMAD FARUQ ZULFIKAR
D131201006



PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

**PEMODELAN DINAMIS PENGOLAHAN PERSAMPAHAN KOTA
MAKASSAR DENGAN MENGGUNAKAN APLIKASI STELLA**

**MUHAMMAD FARUQ ZULFIKAR
D131201006**



**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PEMODELAN DINAMIS PENGOLAHAN PERSAMPAHAN KOTA
MAKASSAR DENGAN MENGGUNAKAN APLIKASI STELLA

MUHAMMAD FARUQ ZULFIKAR

D131201006

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Teknik Lingkungan

pada

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI

PEMODELAN DINAMIS PENGOLAHAN PERSAMPAHAN KOTA MAKASSAR DENGAN MENGGUNAKAN APLIKASI STELLA

MUHAMMAD FARUQ ZULFIKAR J. PATUNRANGI
D131201006

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada 26 November 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



Mengesahkan:

Pembimbing tugas akhir,



Dr. Eng. Ir. Kartika Sari, S.T., M.T.

NIP. 197312012000121001

Mengetahui:

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr.Eng. Ir. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., AER.

NIP. 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul **“Pemodelan Dinamis Pengolahan Persampahan Kota Makassar Dengan Menggunakan Stella”** adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 26 November 2024



Muhammad Faruq Zulfikar
NIM D131201006

UCAPAN TERIMA KASIH

Maha Besar Allah SWT dengan segala keagungan dan kekuasaan-Nya yang telah memberikan kesehatan dan kesempatan hingga pada hari ini, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Pemodelan Dinamis Pengolahan Persampahan Kota Makassar Dengan Menggunakan Aplikasi Stella”. Sholawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah SAW., yang telah membawa umat manusia dari alam kegelapan ke masa yang cerah seperti saat sekarang ini.

Penelitian yang penulis lakukan dapat terlaksana dengan sukses serta dapat terampungkan dalam bentuk tugas akhir ini atas bimbingan, diskusi, dan arahan dari Ibu Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak/Ibu dosen serta karyawan dan staf Departemen Teknik Lingkungan yang telah memberikan banyak pengetahuan kepada penulis selama bangku perkuliahan.

Teruntuk teman-teman Lingkungan 2020 serta ENTITAS 2021, penulis berterima kasih atas segala cerita dan pengalaman yang kalian berikan kepada penulis selama menjalani dinamika perkuliahan. Serta kepada seluruh pihak yang membantu selama penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian.

Tugas akhir ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Dr. Ir. Jurair Patunrangi, M.T dan Ibu Sri Anawaty Kaharu, S.H yang senantiasa memberikan dukungan, baik secara finansial dan moral, mendidik dan menyayangi, serta senantiasa mendoakan dan memberikan nasehat kepada penulis. Terima kasih terdalam penulis persembahkan kepada Ibu dan Bapak. Berkat bimbingan kalian penulis dapat menyadari pentingnya pendidikan yang menjadi sumber semangat penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis,
Muhammad Faruq Zulfikar

ABSTRAK

MUHAMMAD FARUQ ZULFIKAR. **Pemodelan Dinamis Pengolahan Persampahan Kota Makassar Dengan Menggunakan Aplikasi Stella** (dibimbing oleh Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T)

Latar belakang. Timbulan sampah Kota Makassar per Tahun 2022 berdasarkan data Dinas Lingkungan Hidup adalah sebesar 296.251,898 ton/tahun yang dimana menempati posisi pertama di Provinsi Sulawesi Selatan dan posisi ke 12 di Indonesia. Tentunya hal ini sangat memprihatinkan yang dimana terjadi peningkatan sejak tahun 2020. Banyak kota besar di Indonesia, seperti Makassar, menghadapi masalah yang sama yaitu tingginya jumlah sampah yang tidak diimbangi dengan pengelolaan sampah yang baik. Sehingga diperlukan sistem pengolahan terkait persampahan di Kota Makassar agar dapat menekan jumlah timbulan sampah yang dihasilkan. **Tujuan.** mengestimasi timbulan sampah Kota Makassar berdasarkan hasil skenario tanpa dilakukan pengolahan, skenario pengolahan pengomposan, skenario pengolahan insenerator, dan skenario pengolahan gabungan pengomposan dan insenerator. untuk mengetahui skenario paling efektif untuk mereduksi timbulan Kota Makassar selama 10 tahun (2025-2035), dan untuk mengetahui umur pakai TPA Tamangapa Kota Makassar. **Metode.** Metode penelitian yang digunakan adalah dengan mengumpulkan data sekunder berupa timbulan dan komposisi sampah Kota Makassar tahun 2023, data pertumbuhan penduduk Kota Makassar, data jumlah penduduk Kota Makassar, luas lahan aktif dan pasif TPA Tamangapa Antang tahun 2024, dan kriteria desain teknologi pengolahan sampah (pengomposan dan insenerator). Kemudian dilakukan pengolahan data menggunakan aplikasi STELLA 10.0.6 untuk membuat pemodelan sistem dinamis dan mendeskripsikan proyeksi dari timbulan sampah Kota Makassar menggunakan skenario pengolahan. **Hasil.** Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa berdasarkan proyeksi timbulan sampah interval 2025-2035 dan berdasarkan hasil skenario yang dijalankan, skenario 4 dengan pengolahan gabungan pengomposan dan insenerator dapat mereduksi berat sampah TPA Tamangapa Kota Makassar sebesar 83,15% pada tahun pertama dan 7,36% pada tahun 2023. Berdasarkan skenario 4 sisa umur pakai zona aktif di TPA Tamangapa Kota makassar adalah hingga 24 Februari 2025.

Kata Kunci: Pemodelan Dinamis, STELLA, Pengolahan Persampahan Kota Makassar.

ABSTRACT

MUHAMMAD FARUQ ZULFIKAR. **Dynamic Modeling of Makassar City Waste Processing Using the Stella Application** (supervised by Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T)

Background. Makassar City's waste generation as of 2022 based on data from the Environment and Forestry Service is 296,251,898 tons/year, which is in first place in South Sulawesi Province and 12th in Indonesia. Of course, this is very concerning, which has increased since 2020. Many large cities in Indonesia, such as Makassar, are facing the same problem of high amounts of waste which is not balanced by good waste management. So a waste processing system is needed in Makassar City in order to reduce the amount of waste generated. **Aim.** estimate the waste generation of Makassar City based on the results of scenarios without processing, composting processing scenarios, incinerator processing scenarios, and combined composting and incinerator processing scenarios. to find out the most effective scenario for reducing the generation of Makassar City for 10 years (2025-2035), and to find out the useful life of the Tamangapa TPA, Makassar City. **Method.** The research method used is to collect secondary data in the form of waste generation and composition for Makassar City in 2023, population growth data for Makassar City, data for the population of Makassar City, the active and passive land area of the Tamangapa Antang TPA in 2024, and the design criteria for waste processing technology (composting). and incinerators). Then data processing was carried out using the STELLA 10.0.6 application to create dynamic system modeling and describe projections of Makassar City waste generation using processing scenarios. **Results.** based on projected waste generation for the 2025-2035 interval and based on the results of the scenarios implemented, scenario 4 with combined composting and incinerator processing can reduce the weight of Tamangapa landfill waste in Makassar City by 83,15% in the first year and 7,36% in 2023. Based on scenario 4 The remaining useful life of the active zone at Tamangapa TPA Makassar City is until February 24 2025.

Keywords: Dynamic Modeling, STELLA, Makassar City Waste Processing.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Teori	4
1.7 Penelitian Terdahulu	19
BAB II METODE PENELITIAN	29
2.1 Lokasi Penelitian	29
2.2 Waktu Penelitian	29
2.3 Kerangka Berpikir	30
2.4 Diagram Alir	31
2.5 Bagan Alir	32
2.6 Kebutuhan Data	33
2.7 Populasi	33
2.8 Metode Pengambilan Data	33
BAB III ANALISIS DAN PEMBAHASAN	35
3.1 Kependudukan Kota Makassar	35
3.2 Timbulan, Densitas, dan Komposisi sampah Kota Makassar	36
3.3 Skenario Pengolahan Sampah Kota Makassar	40
3.4 Potensi Reduksi Sampah Kota Makassar	41
3.5 Pemodelan Sistem Dinamik Pengolahan Sampah Kota Makassar	43
3.6 Analisis Umur Pakai TPA Tamangapa Kota Makassar	72
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	80
4.1 Kesimpulan	80
4.2 Saran	80
Daftar pustaka	82
Lampiran	85

DAFTAR TABEL

Nomor urut	Halaman
Tabel 1 Besaran timbulan sampah berdasarkan komponen sumbernya.....	6
Tabel 2 Komposisi sampah berdasarkan sumber sampah	6
Tabel 3 Recovery factor.....	11
Tabel 4 Recovery factor berdasarkan data di TPS 3R Kampung Injeuman	11
Tabel 5 Recovery factor berdasarkan data di Kelurahan Selamat	11
Tabel 6 Tingkat akurasi validasi menggunakan metode MAPE	16
Tabel 7 Komponen pembentuk <i>stock flow diagram</i>	17
Tabel 8 Komponen pembentuk <i>stock flow diagram</i>	17
Tabel 6 Penelitian terdahulu	19
Tabel 7 Data - data yang dibutuhkan dalam penelitian ini	33
Tabel 8 Jumlah penduduk dan kepadatan penduduk Kota Makassar Tahun 2023.....	35
Tabel 9 Jumlah timbulan sampah kota makassar tahun 2021-2023	36
Tabel 10 Densitas sampah kota makassar tahun 2023	37
Tabel 11 Komposisi sampah kota makassar tahun 2023.....	38
Tabel 12 Komposisi sampah kota makassar tahun 2023 dalam kilogram	39
Tabel 13 Potensi reduksi sampah kota makassar.....	41
Tabel 14 Variabel sub model proyeksi penduduk kota makassar	44
Tabel 15 Sub model proyeksi timbulan kota makassar	45
Tabel 16 Sub model proyeksi timbulan kota makassar	47
Tabel 17 Sub model reduksi volume pengomposan menggunakan windrow.....	50
Tabel 18 Sub model reduksi berat pengomposan menggunakan windrow.....	52
Tabel 19 Sub model reduksi volume menggunakan insenerator	53
Tabel 20 Sub model reduksi berat sampah menggunakan insenerator.....	54
Tabel 21 Proyeksi laju timbulan sampah.....	56
Tabel 22 Hasil <i>running</i> skenario 1 reduksi berat sampah	57
Tabel 23 Hasil <i>running</i> skenario 1 reduksi volume sampah ke TPA	58
Tabel 24 Proyeksi laju timbulan sampah.....	60

Tabel 25	Proyeksi laju timbulan sampah	61
Tabel 26	Proyeksi laju timbulan sampah	62
Tabel 27	Proyeksi laju timbulan sampah	64
Tabel 28	Proyeksi laju timbulan sampah	65
Tabel 29	Proyeksi laju timbulan sampah	67
Tabel 30	Validasi Proyeksi Penduduk Kota Makassar	71
Tabel 31	Validasi proyeksi timbulan berat sampah kota makassar dalam ton	71
Tabel 32	Validasi proyeksi timbulan volume sampah Kota Makassar	71
Tabel 33	Sisa kapasitas zona aktif TPA tamangapa kota makassar	74
Tabel 34	Sisa kapasitas zona aktif TPA tamangapa kota makassar	75
Tabel 35	Rekapitulasi kondisi volume eksisting zona aktif TPA tamangapa kota makassar	76
Tabel 36	Kapasitas volume maksimum zona aktif TPA tamangapa kota makassar	76
Tabel 37	Sisa kapasitas zona aktif TPA tamangapa kota makassar	77
Tabel 38	Sisa umur zona aktif TPA tamangapa kota makassar skenario 1	77
Tabel 39	Sisa umur zona aktif TPA tamangapa kota makassar skenario 2	78
Tabel 40	Sisa umur zona aktif TPA tamangapa kota makassar skenario 3	78
Tabel 41	Sisa umur zona aktif TPA tamangapa kota makassar skenario 4	79

DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	Halaman
Gambar 1. <i>Windrow composting</i>	9
Gambar 2. Contoh Layout insenerator <i>double chamber</i>	11
Gambar 3. Peta lokasi penelitian	29
Gambar 4. Kerangka berpikir	30
Gambar 5. Diagram alir penelitian	31
Gambar 6. Bagan alir	32
Gambar 7. Grafik timbulan sampah kota makassar tahun 2021-2023	36
Gambar 8. Diagram komposisi sampah kota makassar tahun 2021	38
Gambar 9. Diagram komposisi sampah kota makassar tahun 2022	38
Gambar 10. Diagram komposisi sampah kota makassar tahun 2022	39
Gambar 11. Diagram <i>casual loop</i>	44
Gambar 12. Sub model proyeksi penduduk kota makassar	44
Gambar 13. Komposisi volume sampah kota makassar	45
Gambar 14. Komposisi berat sampah kota makassar	47
Gambar 15. Sub model laju timbulan sampah m ³ /orang/hari	49
Gambar 16. Sub model laju timbulan sampah kg/orang/hari	49
Gambar 17. Sub model reduksi volume sampah menggunakan pengomposan	50
Gambar 18. Sub model reduksi berat sampah menggunakan pengomposan	51
Gambar 19. Sub model reduksi volume sampah menggunakan insenerator	53
Gambar 20. Sub model reduksi berat sampah menggunakan insenerator	54
Gambar 21. Grafik proyeksi jumlah penduduk dan timbulan sampah Kota Makassar	55
Gambar 22. Simulasi skenario 1 residu berat sampah	56
Gambar 23. Grafik timbulan berat sampah skenario 1	57
Gambar 24. Simulasi skenario 1 residu volume sampah ke TPA	58
Gambar 25. Grafik timbulan volume sampah skenario 1	58
Gambar 26. Simulasi skenario 2 residu berat sampah ke TPA	59
Gambar 27. Perbandingan grafik timbulan berat sampah skenario 2 dengan kondisi eksisting TPA	59

Gambar 28.	Simulasi skenario 2 residu volume sampah ke TPA	60
Gambar 29.	Perbandingan grafik timbulan volume sampah skenario 2 dengan kondisi eksisting TPA.....	61
Gambar 30.	Simulasi skenario 3 residu berat sampah ke TPA	62
Gambar 31.	Perbandingan grafik timbulan berat sampah skenario 3 dengan kondisi eksisting TPA	62
Gambar 32.	Simulasi skenario 3 residu volume sampah ke TPA	63
Gambar 33.	Perbandingan grafik timbulan volume sampah skenario 3 dengan kondisi eksisting TPA.....	64
Gambar 34.	Simulasi skenario 4 residu berat sampah ke TPA	65
Gambar 35.	Perbandingan grafik timbulan berat sampah skenario 4 dengan kondisi eksisting TPA	65
Gambar 36.	Simulasi skenario 4 residu volume sampah ke TPA	66
Gambar 37.	Perbandingan grafik timbulan volume sampah skenario 4 dengan kondisi eksisting TPA.....	66
Gambar 38.	Rekapitulasi reduksi volume sampah dari tiap skenario	68
Gambar 39.	Rekapitulasi reduksi volume sampah dari tiap skenario	69
Gambar 40.	Verifikasi unit pemodelan	70
Gambar 41.	Pembagian Zona Kawasan TPA Tamangapa Kota Makassar	72
Gambar 42.	Tampak atas pembagian zona menggunakan Agisoft Metashape	73
Gambar 43.	Tampak 3D tumpukan sampah di TPA tamangapa kota makassar	73
Gambar 44.	Peta kontur zona aktif B1	74
Gambar 45.	Peta kontur zona aktif B2	75

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor urut	Halaman
Lampiran 1. Perhitungan Kapasitas Maksimum TPA.....	85
Lampiran 2. Dokumentasi Penelitian	87
Lampiran 3. Definisi Variabel dan Formula Model.....	89

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sampah adalah sisa kegiatan manusia yang sudah tidak lagi digunakan, dipakai, atau diinginkan, dan biasanya dibuang. Menurut SNI 19-2454-2002 tentang Pengelolaan Sampah Perkotaan, sampah diartikan sebagai limbah padat yang terdiri dari bahan organik dan anorganik yang dianggap tidak berguna lagi. Pengelolaan sampah yang baik diperlukan untuk menghindari bahaya dan melindungi pembangunan. Data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2023) menunjukkan bahwa di Indonesia, timbulan sampah pada tahun 2023 mencapai 18.110.198,25 ton per tahun. Meskipun 67,4% sampah berhasil dikelola, sisanya, yaitu 32,6%, berakhir di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Jumlah sampah ini diperkirakan akan terus meningkat seiring bertambahnya penduduk.

Produksi sampah yang terus menerus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk, perubahan pola konsumsi, dan gaya hidup masyarakat telah meningkatkan jumlah timbulan sampah, jenis, dan keberagaman karakteristik sampah. Sampah menurut WHO (World Health Organization) adalah sesuatu yang tidak digunakan, tidak dipakai, tidak disenangi atau sesuatu yang dibuang yang berasal dari kegiatan manusia dan tidak terjadi dengan sendirinya (Dobiki, 2018)

Timbulan sampah Kota Makassar per Tahun 2022 berdasarkan data Dinas Lingkungan Hidup adalah sebesar 296.251.898 ton/tahun yang dimana menempati posisi pertama di Provinsi Sulawesi Selatan dan posisi ke 12 di Indonesia. Tentunya hal ini sangat memprihatinkan yang dimana terjadi peningkatan sejak tahun 2020. Banyak kota besar di Indonesia, seperti Makassar, menghadapi masalah tingginya jumlah sampah yang tidak diimbangi dengan pengelolaan sampah yang baik. Sehingga diperlukan sistem pengolahan terkait persampahan di Kota Makassar agar dapat menekan jumlah timbulan sampah yang dihasilkan.

Jenis sampah yang dihasilkan khususnya daerah perkotaan adalah jenis sampah rumah tangga sehingga didominasi oleh sampah organik, kertas, dan plastik. Sehingga pengolahan persampahan yang sangat cocok untuk mereduksi sampah yang dihasilkan adalah dengan cara dilakukannya pengomposan dan juga proses insenerasi. Untuk pengolahan pengomposan ada banyak jenisnya untuk skala perkotaan jenis pengomposan yang efektif digunakan adalah windrow komposting (Damanhuri & Padmi, 2018) sedangkan untuk insenerator dapat digunakan jenis *double chamber* yang dimana pada *secondary chamber* dilakukan pembakaran gas dan akan mengubah gas berbahaya menjadi karbon dioksida dan hidrogen (MMIS, 2010)

Untuk mempermudah dilakukannya pengolahan persampahan, maka dapat dilakukan simulasi pengolahan persampahan melalui pemodelan dinamis. Yang dimana dalam pemodelan dinamis ini kita dapat merancang berbagai kejadian yang

dapat memengaruhi suatu kejadian lain sehingga kejadian yang dimodelkan dapat mendekati kejadian aktual di lapangan (Prahasta Eddy, 2018). Salah satu aplikasi yang dapat melakukan pemodelan dinamis adalah STELLA (*System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation*)

Merujuk dari latar belakang tersebut, peneliti memilih judul Tugas Akhir yang berjudul “Pemodelan Dinamis Pengolahan Persampahan di Kota Makassar menggunakan STELLA” yang memodelkan sektor pengolahan sampah agar dapat menganalisis efektivitas jenis teknologi pengolahan sampah yang sesuai dengan kondisi eksisting Kota Makassar sehingga dapat mengestimasi Tingkat reduksi sampah serta dapat mengurangi jumlah sampah yang berakhir di TPA sehingga dapat memperpanjang umur pakai TPA.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang diangkat, yaitu:

1. Bagaimana prediksi jumlah timbulan dan residu sampah di TPA Tamangapa Kota Makassar dalam interval Tahun 2025-2035 berdasarkan hasil skenario model tanpa pengolahan?
2. Bagaimana prediksi jumlah timbulan dan residu sampah di TPA Tamangapa Kota Makassar dalam interval Tahun 2025-2035 berdasarkan hasil skenario menggunakan pengolahan pengomposan?
3. Bagaimana prediksi jumlah timbulan dan residu sampah di TPA Tamangapa Kota Makassar dalam interval Tahun 2025-2035 berdasarkan hasil skenario menggunakan pengolahan insenerator?
4. Bagaimana prediksi jumlah timbulan dan residu sampah di TPA Tamangapa Kota Makassar dalam interval Tahun 2025-2035 berdasarkan hasil skenario gabungan dari kedua pengolahan tersebut?
5. Apa skenario yang paling efektif untuk digunakan di Kota Makassar pada Tahun 2025-2035?
6. Berapa lama jangka waktu maksimal umur pakai TPA Tamangapa Kota Makassar berdasarkan skenario model tanpa pengolahan, pengomposan, insenerator, dan gabungan dari kedua pengolahan?.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini, antara lain:

1. Untuk mengestimasi jumlah timbulan sampah dan residu sampah ke TPA Tamangapa Kota Makassar berdasarkan hasil skenario model tanpa pengolahan
2. Untuk mengestimasi jumlah timbulan sampah dan residu sampah ke TPA Tamangapa Kota Makassar berdasarkan hasil skenario model menggunakan pengolahan pengomposan

3. Untuk mengestimasi jumlah timbulan sampah dan residu sampah ke TPA Tamangapa Kota Makassar berdasarkan hasil skenario model menggunakan pengolahan insenerator
4. Untuk mengestimasi jumlah timbulan sampah dan residu sampah ke TPA Tamangapa Kota Makassar berdasarkan hasil skenario model gabungan dari kedua pengolahan tersebut.
5. Untuk mengetahui jenis teknologi yang paling efektif untuk mereduksi timbulan sampah di Kota Makassar pada 10 Tahun kedepan (Tahun 2025-2035).
6. Untuk mengetahui umur pakai TPA Tamangapa Kota Makassar.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Mahasiswa mampu memprediksi skenario yang sesuai untuk mereduksi sampah di Kota Makassar.
2. Dapat menjadi baseland pengambilan keputusan dalam sistem pengolahan sampah yang tepat.
3. Hasil dari penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk pengembangan ilmu mengenai simulasi menggunakan pemodelan dinamis dan menentukan kebijakan pengolahan sampah di Kota Makassar.

1.5 Ruang Lingkup

Batasan ruang lingkup pada penelitian ini, antara lain:

1. Teknologi yang digunakan merupakan teknologi pengolahan pengomposan windrow composting dan insenerator double chamber, yang disesuaikan dengan tingkat kemudahan pengoperasian metode pengolahan sampah skala kawasan.
2. Jenis timbulan sampah yang diolah hanya jenis sampah organik dan plastik.
3. Data series timbulan sampah yang diperoleh dari instansi terkait merupakan data tahun 2021-2023 yang terdapat data prediksi dan aktual lapangan. sehingga data tersebut dapat dilihat perbandingan antara data prediksi dengan data asli di lapangan.
4. Skenario yang dibuat hanya menilai dari aspek teknologi dan presentase potensi reduksi sampah masing-masing metode.
5. Skenario reduksi dan realisasi penempatan teknologi hanya untuk Kota Makassar.
6. Pengolahan persampahan yang digunakan hanya diambil dari segi reduksi tanpa memperhatikan biaya yang digunakan.
7. Lahan untuk pengolahan persampahan diasumsikan sebesar 30.000 m² yang masih dalam cakupan luas area TPA Tamangapa Kota Makassar.
8. Angka faktor kompaksi yang digunakan di TPA Tamangapa Kota Makassar adalah sebesar 30%

1.6 Teori

1.6.1 Sampah

Menurut UU Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, menyebutkan bahwa sampah merupakan permasalahan nasional sehingga pengelolaannya perlu dilakukan secara komprehensif dan terpadu dari hulu ke hilir agar memberikan manfaat secara ekonomi, sehat bagi masyarakat, dan aman bagi lingkungan, serta dapat mengubah perilaku masyarakat.

Menurut definisi World Health Organization (WHO) sampah adalah sesuatu yang tidak digunakan, tidak dipakai, tidak disenangi atau sesuatu yang dibuang yang berasal dari kegiatan manusia dan tidak terjadi dengan sendirinya (Dobiki, 2018). Berdasarkan SK SNI Tahun 1990, sampah adalah limbah yang bersifat padat yang terdiri dari zat organik dan zat anorganik yang dianggap tidak berguna lagi dan harus dikelola agar tidak membahayakan dan melindungi infestasi pembangunan.

1.6.2 Jenis Sampah dan Sumber Sampah

Pembagian jenis sampah dibagi menjadi dua, berdasarkan sumber dan karakteristiknya. Di negara industri, jenis sampah atau yang dianggap sejenis sampah, dikelompokkan berdasarkan sumbernya seperti disebutkan berikut ini (Tchobanoglous, 1993 dalam Damanhuri, 2010):

1. Pemukiman yang biasanya berupa rumah atau apartemen.
2. Daerah komersil yang meliputi pertokoan, rumah makan, pasar, perkantoran, hotel dan lain-lain.
3. Institusi yaitu sekolah, rumah sakit, penjara, pusat pemerintahan dan lain-lain.
4. Konstruksi dan pembongkaran bangunan meliputi pembuatan konstruksi batu, perbaikan jalan dan lain-lain.
5. Fasilitas umum seperti penyapuan jalan, taman, pantai, tempat rekreasi dan lain-lain.
6. Pengolah limbah domestik seperti instalasi pengolahan air minum, instalasi pengolah air buangan dan insinerator.
7. Kawasan industri memiliki jenis sampah yang dihasilkan ditimbulkan yaitu sisa proses produksi, buangan non industri dan sebagainya.
8. Pertanian memiliki jenis sampah yang dihasilkan seperti sisa makanan busuk dan sisa pertanian.

Untuk setiap sampah berdasarkan sumbernya terdapat pembagian jenis sampah berdasarkan karakteristiknya. Pembagian jenis sampah berdasarkan karakteristiknya menurut SNI 19-2454-1991 dan SNI 19-3242-1994 tentang Tata Cara Pengelolaan Sampah Perkotaan adalah:

1. Sampah organik atau sampah basah yang terdiri atas daun-daunan, kayu, kertas, karton, tulang, sisa makanan ternak, sayur, buah, dan lain-lain
2. Sampah anorganik atau sampah kering yang terdiri dari kaleng, plastik, besi dan logam-logamnya, gelas dan mika.

Sementara itu dalam Undang-undang No 18 tahun 2018 pembagian jenis sampah dilakukan dengan berdasarkan sumber dan karakteristiknya, yaitu:

1. Sampah rumah tangga: bersumber dari kegiatan sehari-hari dalam rumah tangga, tidak termasuk tinja dan sampah spesifik.
2. Sampah sejenis sampah rumah tangga: bersumber dari kawasan komersial, kawasan industri, kawasan khusus, fasilitas sosial, fasilitas umum, dan/atau fasilitas lainnya.
3. Sampah spesifik: sampah yang berdasarkan sifat dan karakteristiknya membutuhkan penanganan khusus.

1.6.3 Komposisi Sampah

Dilihat dari komposisi sampah, maka sebagian besar sampah kota di Indonesia adalah tergolong sampah hayati, atau secara umum dikenal sebagai sampah organik. Sampah yang tergolong hayati ini untuk kota-kota besar bisa mencapai 70% dari total sampah, dan sekitar 28% adalah sampah non hayati yang menjadi obyek aktivitas pemulung yang cukup potensial, mulai dari sumber sampah (dari rumah-rumah) sampai ke TPA. Sisanya (sekitar 2%) tergolong B3 yang perlu dikelola tersendiri (Damanhuri & Padmi, 2010). Kategori sampah domestik yang terukur adalah:

1. Sampah kertas dan bahan-bahan kertas
2. Kayu atau produk dari kayu
3. Plastik, kulit, dan produk karet
4. Kain dan produk tekstil
5. Gelas
6. Logam
7. Bahan batu, pasir
8. Sampah organik

Komponen sampah sengaja disusun sesuai kecepatan degradasi atau kecepatan sampah dalam membusuk. Sampah yang membusuk adalah sampah yang dengan mudah terdekomposisi karena aktivitas mikroorganisme, disebut juga sampah basah atau sampah organik.

Dampak yang harus dihadapi dari sampah seperti diatas yaitu saat pembusukan ia dapat menghasilkan bau tidak enak seperti amoniak dan asam, gas metan dan sejenisnya, yang dapat membahayakan keselamatan bila tidak ditangani secara baik. Maka dari itu pengelolaannya juga diharapkan lebih cepat baik dalam pengumpulan, pembuangan, maupun pengangkutannya. Perlu dicatat penumpukan sampah basah harus dihindari (Damanhuri & Padmi, 2010).

1.6.4 Timbulan Sampah

Timbulan sampah adalah sejumlah sampah yang dihasilkan oleh suatu aktivitas dalam kurun waktu tertentu, atau banyaknya sampah yang dihasilkan dalam satuan berat (kilogram) gravimetri atau volume (liter) volumetri (Andrie et al., 2022). Kajian mengenai data timbulan sampah perlu diketahui sebab timbulan sampah merupakan langkah awal yang dilakukan dalam mengelola persampahan.

Didasarkan oleh SNI 19-3949-1994 tentang Metode Pengambilan dan Pengukuran Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan, dikemukakan bahwa

sebaiknya frekuensi dalam pengambilan sampel dilakukan selama 8 hari berturut-turut untuk dapat menggambarkan fluktuasi harian yang ada.

Tabel 1 Besaran timbulan sampah berdasarkan komponen sumbernya

No.	Komponen Sumber Sampah	Satuan	Volume (Liter)	Berat (kg)
1	Rumah Permanen	/orang/hari	2,25 – 2,50	0,350 – 0,400
2	Rumah Semi Permanen	/orang/hari	2,00 – 2,25	0,300 – 0,350
3	Rumah non permanen	/orang/hari	1,75 – 2,00	0,250 – 0,300
4	Kantor	/pegawai/hari	0,50 – 0,75	0,025 – 0,100
5	Toko	/petugas/hari	2,50 – 3,00	0,150 – 0,350
6	Sekolah	/murid/hari	0,10 – 0,15	0,010 – 0,020
7	Jalan Arteri Sekunder	/m/hari	0,10 – 0,15	0,020 – 0,100
8	Jalan Kolektor Sekunder	/m/hari	0,10 – 0,15	0,010 – 0,050
9	Jalan Lokal	/m/hari	0,05 – 0,1	0,005 – 0,025
10	Pasar	/m ² /hari	0,20 – 0,60	0,1 – 0,3

Sumber: SNI 19-3083-1995

Tabel 2 Komposisi sampah berdasarkan sumber sampah

No	Sumber Sampah	Persentase
1	Rumah Tangga	41.42%
2	Perniagaan	19.38%
3	Pasar	15.73%
4	Perkantoran	6.75%
5	Fasilitas Publik	6.74%
6	Kawasan Lain	3.54%

Sumber: SNI 19-3083-1995

Pengukuran timbulan sampah bertujuan untuk mendapatkan besaran timbulan sampah yang digunakan dalam perencanaan dan pengelolaan sampah. Sampah diambil dari lokasi pengambilan terpilih kemudian diukur volumenya lalu ditimbang berat dan diukur komposisinya. Berdasarkan SNI 19-3964-1994, komposisi sampah terbagi menjadi beberapa jenis yaitu sisa-sisa makanan, kertas-karton, kayu, kain-tekstil, plastik, logam besi-non besi, kaca, dan lain-lain (misalnya tanah, pasir, batu, keramik).

Metode pengambilan dan pengukuran contoh timbulan dan komposisi sampah perkotaan dapat dilihat pada SNI 19-3964-1994 yaitu sebagai berikut:

1. Jumlah contoh jiwa dan kepala keluarga (KK) dapat dihitung berdasarkan rumus

$$S = Cd \sqrt{Px} \quad (1)$$

Dimana:

S = Jumlah contoh (jiwa)

Cd = Koefisien perumahan

Cd = Kota besar / metropolitan

Cd = Kota sedang / kecil/ IKK

$$\begin{aligned}
 Px &= \text{Populasi (jiwa)} \\
 K &= \frac{S}{N} \quad (2) \\
 \text{Dimana:} \\
 K &= \text{Jumlah contoh (KK)} \\
 N &= \text{Jumlah jiwa per keluarga} = 5
 \end{aligned}$$

2. Jumlah contoh timbulan sampah dari perumahan adalah

- Contoh dari perumahan permanen = $(S_1 \times K)$ keluarga
- Contoh dari perumahan semi permanen = $(S_2 \times K)$ keluarga
- Contoh dari perumahan non permanen = $(S_3 \times K)$ keluarga

Dimana:

S_1	=	Proporsi jumlah KK perumahan permanen dalam (%)
S_2	=	Proporsi jumlah KK perumahan semi permanen dalam (%)
S_3	=	Proporsi jumlah KK perumahan non permanen dalam (%)
S	=	Jumlah contoh jiwa
N	=	Jumlah jiwa per keluarga
K	=	Jumlah KK

1.6.5 Proses Penanganan Sampah

Berdasarkan UU No.18 Tahun 2008 kegiatan penanganan sampah terbagi menjadi pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pemrosesan akhir.

1. Pemilahan

Pemilahan adalah proses pengelompokan dan pemisahan sampah sesuai dengan jenis, jumlah, dan/atau sifat sampah

2. Pengumpulan

Pengumpulan sampah adalah proses pengambilan dan pemindahan sampah dari sumbernya menuju ke tempat penampungan sementara atau tempat pengolahan sampah terpadu

3. Pengangkutan

Pengangkutan adalah proses membawa sampah dari sumbernya dan/atau dari tempat penampungan sampah sementara atau dari tempat pengolahan sampah terpadu menuju ke tempat pemrosesan akhir

4. Pengolahan

Pengolahan sampah adalah proses mengubah karakteristik, komposisi, dan jumlah sampah

5. Pemrosesan akhir

Pemrosesan akhir sampah adalah bentuk pengembalian sampah dan/atau residu hasil pengolahan sebelumnya ke media lingkungan secara aman.

1.6.6 Teknologi Pengolahan Sampah

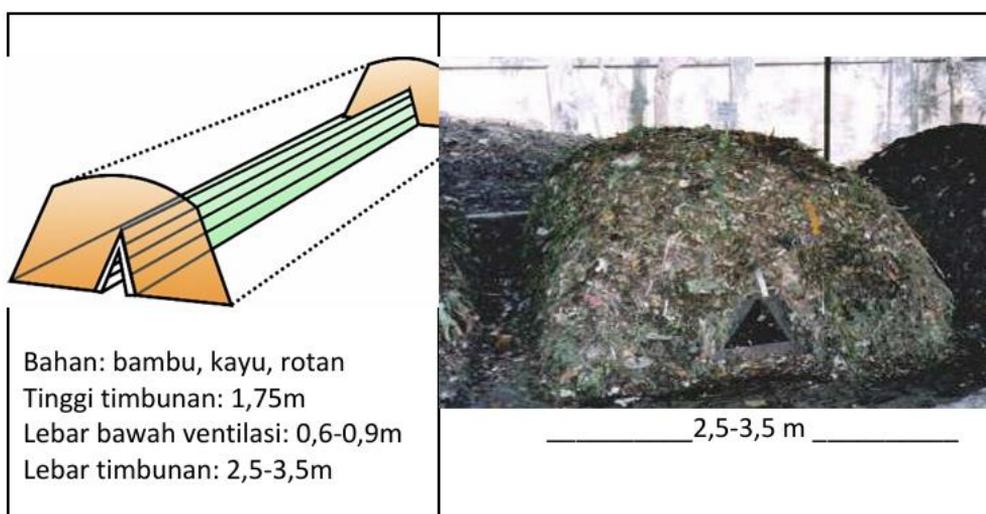
Pengolahan sampah merupakan sebuah proses untuk memanfaatkan potensi sampah dan juga untuk mengurangi timbulan sampah yang akan berakhir di TPA

1. Pengomposan

Pengomposan merupakan salah satu metode untuk mengurangi permasalahan persampahan perkotaan. Proses pengomposan ini sangat penting karena 50%-85% sampah di perkotaan merupakan bahan organik yang dapat dijadikan kompos (L. Sahwan, 2016). Pengomposan secara Ekologi adalah proses dekomposisi dimana substrat terus menerus dipecah oleh suksesi populasi organisme (Nurdiana et al., 2017). Pada dasarnya pengomposan merupakan proses degradasi materi organik menjadi stabil melalui reaksi biologis mikroorganisme dalam kondisi yang terkendali. Teknologi pengomposan sampah yang dilakukan saat ini sangat beragam ditinjau dari segi teknologi maupun kapasitas produksinya antara lain: pengomposan dengan cara aerobik, pengomposan dengan cara semi aerobik, pengomposan dengan reaktor cacing, dan pengomposan dengan menggunakan adiktif.

Salah satu contoh pengomposan dengan cara aerobik adalah pengomposan metoda lajur terbuka (*open windrow*). Pengomposan jenis ini sangat cocok dengan kondisi iklim di Indonesia yang memiliki iklim tropis. Selain itu metode ini dapat diterapkan dengan mudah dan juga biaya yang relatif lebih rendah daripada menggunakan metode yang lainnya (Nurdiana et al., 2017). Cara ini merupakan teknologi standar, prosesnya bersifat alami. Sampah sebaiknya dicacah terlebih dahulu, kemudian ditambahkan bulking agent. Untuk dimensi dari pengolahan sampah organik dengan sistem windrow berdasarkan (Damanhuri & Padmi, 2018) adalah sebagai berikut:

- a. Lebar windrow : 2,5m – 3,5m (menyesuaikan dengan ketersediaan tempat)
- b. Lebar bawah ventilasi : 0,6m – 0,9m
- c. Tinggi maksimum windrow : 1,75m
- d. Panjang windrow : tak terbatas (menyesuaikan luas lahan)



Gambar 1. *Windrow composting*

2. Insenerator

Pembakaran sampah sebenarnya membahayakan kesehatan orang-orang yang berada di sekitarnya. Bahaya tersebut biasanya ditimbulkan oleh adanya emisi gas dan partikel debu. Gas-gas berbahaya yang ditimbulkan oleh pembakaran sampah antara lain adalah gas karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), dioxin dan furan (Kazliani, 2023).

Insenerator merupakan alat atau sarana untuk membakar *refuse* dengan pembakaran bahasan bakar yang minim. Insenerasi adalah proses pengurangan atau perubahan bentuk sampah yang sudah terbakar pada suhu optimum 1400°F - 1800°F. Fungsi utama insinerasi untuk mengurangi volume dan jumlah serta menyuci hamakan 5% - 15% berat limbah yang tersisa sebagai residu (Irsam, 2019). Hasil dari pembakaran insenerator adalah abu sebanyak 20% dari total berat awal sampah (Susastrio et al., 2020). Jenis insenerator yang paling umum diterapkan untuk membakar limbah padat B3 yaitu *rotary klin*, *multiple hearth*, *fluidized bed*, *open pit*, *single chamber*, *multiple chamber*, *aqueous waste injection*, dan *starved air unit*. Dari semua jenis insinerator tersebut, *rotary klin* mempunyai kelebihan karena alat tersebut dapat mengolah limbah padat, cair, dan gas secara simultan (Irsam, 2019). Berikut beberapa jenis insinerator antara lain sebagai berikut.

a. *Rotary klin incinerator*

Rotary klin membentuk ruang pembakaran utama, menjadi silinder baja dilapisi dengan bata tahan api untuk isolasi dan perlindungan terhadap keretakan. Insenerator *rotary klin* telah banyak digunakan sebagai sistem pengolahan limbah industri.

b. *Multiple hearth incinerator*

Multiple hearth incinerator terdiri dari suatu kerangka lapisan baja tahan api dengan *serangkaian* tungku (*hearth*) yang tersusun secara vertikal, satu di atas yang lainnya dan biasanya berjumlah 5-8 buah tungku. Burner dipasang pada sisi dinding tungku pembakar dimana pembakaran terjadi. Udara diumpan masuk dari bawah dan sampah diumpan masuk dari atas.

c. *Fluidized bed incinerator*

Fluidized bed incinerator merupakan sebuah tungku pembakaran yang menggunakan media pengaduk berupa pasir seperti pasir kuarsa atau pasir silika, sehingga akan terjadi pencampuran (*mixing*) yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut.

Di Indonesia penggunaan insenerator skala kecil atau modular paling banyak memiliki kapasitas 5 ton/hari sedangkan skala terpusat biasanya dapat memproses sampah hingga kapasitas 100 ton/hari (Damanhuri & Padmi, 2018). Berdasarkan *the incenerator guidebook* dari (MMIS, 2010) kapasitas pembakaran insenerator *double chamber* adalah kisaran 20 hingga 40 ton/hari dengan kemampuan reduksi berat sampah hingga 95% dari total berat sampah yang masuk.

Insenerator dilengkapi mesin pembakar dengan suhu tinggi yang dalam waktu relatif singkat dapat membakar habis semua sampah hingga menjadi abu. Pembakaran sampah ini digunakan dengan sistem pembakaran bertingkat (*double chamber*) sehingga emisi yang melalui cerobong tidak berasap dan tidak berbau (Lolo, 2014). Berikut bagian-bagian dalam insenerator *double chamber*:

a. Ruang bakar utama

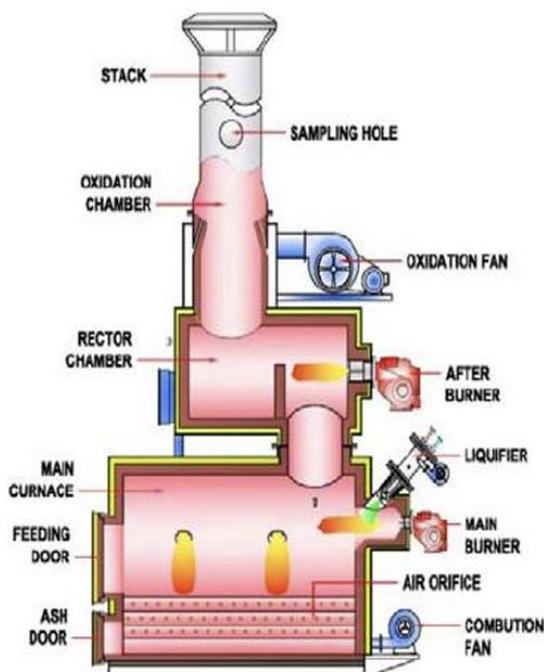
Dalam ruang bakar utama proses karbonisasi dilakukan dengan defisiensi udara dimana udara yang dimasukkan didistribusikan dengan merata ke dasar ruang bakar untuk membakar karbon sisa. Gas buang yang panas dari pembakaran, keluar dari sampah dan naik memanaskannya sehingga menghasilkan pengeringan dan kemudian membentuk gas-gas karbonisasi. Sisa padat dari pembentukan gas ini yang sebagian besar terdiri atas karbon, dibakar selama pembakaran normal dalam waktu pembakaran.

b. Ruang bakar tingkat dua

Ruang bakar tingkat kedua dipasang di atas ruang bakar utama dan terdiri dari ruang penyalaan dan pembakaran, berfungsi membakar gas-gas karbonisasi yang dihasilkan dari dalam ruang bakar utama.

c. Cerobong cyclon

Cerobong cyclon dipasang setelah ruang bakar tingkat dua, yang bagian dalamnya dilengkapi *water spray* yang berguna untuk menahan debu halus yang ikut terbang bersama gas buang, dengan cara gas buang yang keluar dari ruang bakar tingkat dua dimasukkan melalui sisi dinding atas sehingga terjadi aliran *cyclon* di dalam cerobon.



Gambar 2. Contoh Layout insenerator *double chamber***1.6.7 Recovery Factor dan Tingkat Reduksi Sampah**

Tingkat reduksi sampah dapat ditetapkan berdasarkan *material balance*, dengan memperhitungkan *recovery factor* tiap komponen sampah. *Recovery factor* adalah persentasi setiap komponen sampah yang dapat dimanfaatkan kembali, di-*recovery* atau didaur ulang. Selebihnya merupakan residu yang memerlukan pembuangan akhir atau pemusnahan (Selintung et al., 2014). *Recovery factor* dari tiap komponen sampah berdasarkan (tchobanoglous dan vigil, 1993) dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3 Recovery factor

Komponen Sampah	Recovery Factor (%)
Sampah Organik Mudah Terurai	80
Sampah Plastik	50
Sampah Kertas	40
Sampah Kaca	70
Sampah Logam	80

Sumber : Selintung et al., 2014

Berikut data *Recovery Factor* perbandingan berdasarkan kondisi pengolahan persampahan yang ada di Indonesia:

Tabel 4 Recovery factor berdasarkan data di TPS 3R Kampung Injeuman

Komponen Sampah	Recovery Factor (%)
Sampah Organik Mudah Terurai	91,18
Sampah Plastik	46,69
Sampah Kertas	80,942
Sampah Kaca	70
Sampah Logam	100
Sampah Kain/tekstil	58,67

Sumber : Noer Halimah et al., 2022

Tabel 5 Recovery factor berdasarkan data di Kelurahan Selamat

Komponen Sampah	Recovery Factor (%)
Sampah Organik Mudah Terurai	56,93
Sampah Plastik	46,69
Sampah Kertas	40
Sampah Kaca	65
Sampah Logam	85

Sumber : Widyawati et al., 2020

Rumus dari recovery factor itu sendiri menurut (Hendrawan et al., 2020) sebagai berikut:

$$Rf (\%) = \frac{\text{Reduksi sampah (kg/hari)}}{\text{Berat sampah (kg/hari)}} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

RF = Recovery Factor

Untuk menghitung tingkat reduksi dari tiap pengolahan, dapat dilakukan sebagai berikut:

a. Pengomposan

Dari sekian banyaknya metode pengomposan skala kawasan, metode pengomposan *komposting open windrow* merupakan salah satu metode yang paling efektif untuk digunakan. Berdasarkan Kementerian PUPR Pedoman Tata Cara Penyelenggaraan Umum Tempat Pengolahan Sampah (TPS) 3R Berbasis Masyarakat di Kawasan Permukiman Tahun 2014, sampah organik yang dapat dikomposkan adalah sebesar 60-70% dari total berat sampah yang ada dan akan terjadi penyusutan sebesar 75% dari proses pengomposan sehingga hasil dari kompos itu sendiri tersisa 25% dari total tumpukan awal.

b. Insenerator

Insenerator merupakan salah satu metode pengolahan sampah menggunakan metode thermal. Rumus yang digunakan dalam metode ini menurut (Setyawan, 2017) adalah sebagai berikut:

1. Mencari nilai Q

$$Q = m \times C_p \times T \quad (4)$$

2. Heat Loss

$$\% \text{ Heat Loss} = \frac{\text{Panas yang hilang}}{\text{Total panas masuk}} \times 100\% \quad (5)$$

3. Efisiensi Panas

$$\% \text{ Efisiensi Panas} = \frac{Q_{\text{Output}}}{Q_{\text{Input}}} \times 100\% \quad (6)$$

4. Laju Pembakaran

$$B_{bt} = \frac{m}{t} \quad (7)$$

5. Efisiensi Insenerator

$$\% \text{ Efisiensi} = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

1.6.8 Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah, berdasarkan Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, adalah tempat memproses dan mengembalikan sampah secara aman bagi manusia ke media lingkungan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa TPA merupakan tempat terakhir dilakukan pengolahan sampah agar aman dikembalikan ke lingkungan atau dengan kata lain TPA bukan hanya tempat terakhir bagi sampah tetapi juga menjadi tempat terakhir sampah diproses untuk nantinya dikembalikan ke lingkungan secara aman

(Manurung & Santoso, 2019).

Pada penelitian Rofihendra (2010) dijelaskan bahwa dengan dilakukannya upaya dalam mengurangi atau mereduksi sampah dapat memperpanjang umur pemakaian TPA (Rahmaniah et al., 2013). Oleh karena itu diperlukan upaya pengurangan sampah menggunakan beberapa pengolahan yaitu pemilahan, pengomposan, dan daur ulang (SNI 3242-2008). Potensi pengurangan volume sampah dengan melakukan kegiatan daur ulang dan komposting dapat mereduksi sampah sebanyak 78,46% dari total sampah (Rahmaniah et al., 2013). Berdasarkan petunjuk teknis Nomor CT/S/Re-CT/004/98 tentang Tata Cara Perencanaan TPA Sampah, Adapun perhitungan Kebutuhan Luas Lahan dan sisa umur TPA, dapat dihitung dengan persamaan berikut :

- a. Volume sampah terpadatkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$V = A \times E \quad (9)$$

Keterangan:

V = Volume sampah terpadatkan (m³/hari)

A = Volume sampah (m³/hari)

E = Tingkat pemadatan

- b. Metode analisis umur pakai TPA

1. Sisa daya tampung = total volume sampah tahun n – selisih daya tampung

2. Sisa umur pakai = sisa daya tampung/volume sampah per hari

Menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 tentang Penyelenggaraan Prasarana Dan Sarana Persampahan Dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga Dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga pada lampiran III, dalam pembuatan TPA harus memperhatikan kesesuaian tata ruang, rencana pemanfaatan lahan bekas TPA, dan rencana pembuangan. Pemilihan lokasi TPA sampah harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

- a. TPA sampah tidak boleh berlokasi di danau, sungai dan laut
- b. Disusun berdasarkan 3 tahapan yaitu :
 1. Tahap regional yang merupakan tahapan untuk menghasilkan peta yang berisi daerah atau tempat dalam wilayah tersebut yang terbagi menjadi beberapa zona kelayakan. Adapun kriteria zona layak untuk kriteria regional meliputi kondisi geologi, kondisi hidrogeologi, kemiringan zona harus kurang dari 20%, jarak dari lapangan terbang harus lebih besar dari 3.000 meter untuk penerbangan *turbo jet* dan harus lebih besar dari 1.500 meter untuk jenis lain, tidak boleh pada daerah lindung/cagar alam dan daerah banjir dengan periode ulang 25 tahun.
 2. Tahap penyisih yang merupakan tahapan untuk menghasilkan satu atau dua lokasi terbaik diantara beberapa lokasi yang dipilih dari zona-zona kelayakan pada tahap regional. Adapun kriteria penyisih dalam memilih lokasi terbaik meliputi kriteria regional, iklim, utilitas, lingkungan biologi, kondisi tanah, demografi, batas administrasi, kebisingan, bau, estetika,

dan ekonomi.

3. Tahap penetapan yang merupakan tahap penentuan lokasi terpilih oleh Instansi yang berwenang
 - c. Dalam hal suatu wilayah belum bisa memenuhi tahap regional, pemilihan lokasi TPA sampah ditentukan berdasarkan pemilihan lokasi TPA yang dapat dilihat pada lampiran kriteria yang berlaku pada tahap penyisihan.

1.6.9 System Thinking dan Pemodelan Dinamis

System thinking adalah cara pikir yang mengedepankan konsep kesisteman; segala sesuatunya merupakan kesatuan yang utuh, terkait, dan saling memengaruhi, cepat atau lambat, dan linier atau pun non-linier (Prahasta Eddy, 2018). Secara umum sistem dapat diartikan sebagai sekumpulan komponen (elemen atau unsur) yang saling berkaitan hingga dapat memengaruhi satu sama lainnya dengan urutan/prosedur tertentu dalam mencapai suatu tujuan (Prahasta Eddy, 2018).

Sistem dinamis adalah metodologi pemodelan simulasi berbasis komputer, dikembangkan pertama kali oleh Jay Forrester dari MIT tahun 1950-an. Sistem dinamis dibagi menjadi 2 kata yaitu sistem dan dinamis. Secara etimologi arti kata sistem berdasarkan KBBI adalah susunan yang teratur dari pandangan, teori, asas, dan sebagainya. Sedangkan kata dinamis berarti penuh semangat dan tenaga sehingga cepat bergerak dan mudah menyesuaikan diri dengan keadaan dan sebagainya. Secara terminologi arti dari sistem dinamis itu sendiri adalah sebuah metode yang digunakan pada suatu kondisi yang selalu bergerak/berbeda yang tidak akan pernah sama pada hari ini, kemarin, dan besok.

Keterkaitan *system thinking* dengan sistem dinamis adalah keduanya memiliki aspek-aspek perilaku dinamis yang terjadi di dalam sistemnya. Oleh sebab itu, sebagian dari pembahasan mengenai *system thinking*, biasanya, akan berakhir pada uraian mengenai sistem dinamis, sementara itu, di lain pihak, sistem dinamis pun menggunakan alat bantu yang asal-usulnya dapat ditelusuri hingga ke konsep *system thinking*.

Singkatnya, sistem dinamis berfokus pada studi-studi yang berkenaan dengan perilaku-perilaku (model) sistem-sistem yang terdapat di seputar kehidupan manusia, lingkungan sekitar, atau bahkan pada tingkatan dunia.global. sistem yang bekerja dengan basis teori umpan-balik dan analisis sebab-akibat ini (pada umumnya) menggunakan metode simulasi komputer untuk menguji model-model mental/konseptual (produk *system thinking*) mengenai bagaimana sistemnya bekerja. Oleh sebab itu, sistem dinamis sangat memudahkan pihak-pihak yang ingin mentransfer konsep/modelnya ke berbagai disiplin keilmuan (Prahasta Eddy, 2018).

Menurut Michael, K (2011), membagi penerapan sistem dinamik dalam beberapa bidang yaitu 1) *external forces and legislation*, 2) *corporate governance*, 3) *planning, resourcing and budgeting*, 4) *human resource management dilemmas*, 5) *teaching quality*, 6) *microworlds*, 7) *enrollment demand*. Sistem dinamik

menampilkan hasil data analisis berupa diagram dari sistem yang dimodelkan menggunakan ikon grafis. *Software-software* sistem dinamis dapat mensimulasikan model matematika yang diinput ke dalam sistem. Beberapa *software* pemodelan dinamis yang sering digunakan adalah Vesim, Powesim, dan Stella.

1. Tahapan Penyusunan Model

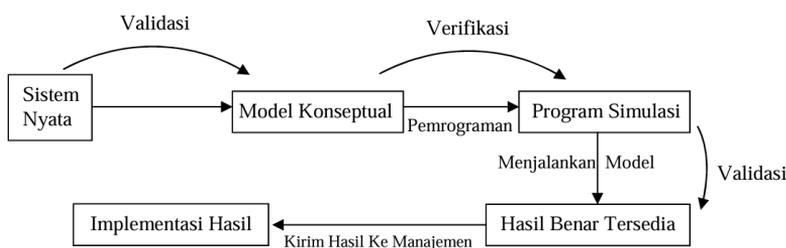
Sistem dinamik merupakan kerangka yang memfokuskan pada sistem berpikir dengan cara *feed back loop* dan mengambil beberapa langkah tambahan struktur serta mengujinya melalui model simulasi komputer (Forrester, 1994).

Menurut Sterman (2000) memaparkan terdapat 5 tahapan dalam mengembangkan model sistem dinamik yaitu sebagai berikut:

- a. *Problem Articulation*/Pendefinisian Permasalahan
- b. *Dynamic Hypothesis*/Pembuatan Hipotesa Awal
- c. *Formulation*/Formulasi Masalah
- d. *Testing*/Pengujian Skenario
- e. *Policy Formulation and Evaluation*/Pengambilan Kebijakan Terbaik dan Evaluasi

2. Verifikasi dan Validasi Simulasi

Dalam melakukan sistem pemodelan perlu dilakukan verifikasi dan juga validasi terkait simulasi yang akan dijalankan.



Gambar 3. Relasi verifikasi, validasi dan pembentukan model kredibel

Berdasarkan gambar di atas, kita perlu membangun model konseptual yang memuat elemen yang sesuai dengan sistem nyata. Pengembangan model simulasi melibatkan proses iteratif, di mana setiap tahapan mencakup sejumlah perubahan kecil. Proses iterasi ini bergantung pada keberhasilan atau kegagalan dalam verifikasi dan validasi model. Validasi bertujuan untuk memastikan bahwa model dapat merepresentasikan sistem nyata secara akurat, sedangkan verifikasi memeriksa apakah logika model telah diterapkan dengan benar. Karena verifikasi dan validasi memiliki tujuan yang berbeda, metode yang digunakan untuk satu proses belum tentu berlaku untuk yang lainnya. Untuk kedua proses tersebut, penting untuk menetapkan kriteria penilaian yang jelas guna mengevaluasi kebenaran diagram alur dan logika internal model, serta memastikan bahwa model konseptual mencerminkan sistem nyata secara valid. Selain itu, perlu ditentukan siapa yang akan menerapkan kriteria tersebut dan mengukur sejauh mana kriteria tersebut sesuai dengan realitas yang ada (Hasad A, 2011).

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) mengukur rata-rata perbedaan absolut antara nilai prediksi dan nilai aktual, yang dinyatakan sebagai persentase dari nilai aktual tersebut. MAPE digunakan untuk mengevaluasi hasil peramalan, sehingga dapat menunjukkan tingkat akurasi dengan membandingkan hasil prediksi dan data realisasi (Nabillah & Ranggadara, 2020). Berikut tingkat akurasi dari menggunakan metode MAPE:

Tabel 6 Tingkat akurasi validasi menggunakan metode MAPE

Range MAPE	Keterangan
<10%	Kompetensi Model Peramalan Sangat Baik
10-20%	Kompetensi Model Peramalan Baik
20-50%	Kompetensi Model Peramalan Layak
>50%	Kompetensi Model Peramalan Buruk

Sumber : Nabillah & Ranggadara, 2020

3. Kelebihan dan Kekurangan Aplikasi Pemodelan Dinamis

Dalam melakukan pemodelan dinamis diperlukan aplikasi agar dapat mempermudah dilakukannya pemodelan, berikut beberapa aplikasi yang dapat digunakan dalam pemodelan dinamis serta kelebihan dan kekurangannya:

Kriteria	STELLA	Vensim	PowerSIM
Tampilan <i>Interface</i>	Sangat visual dan ramah pengguna, cocok untuk pemula. Diagram stok-aliran intuitif.	<i>Interface</i> lebih teknis, lebih kompleks, namun lebih fleksibel.	<i>Interface</i> profesional, visual menarik, dengan fokus pada manajemen risiko.
Kelengkapan Fitur	Fitur dasar hingga menengah. Cocok untuk edukasi dan model bisnis sederhana.	Fitur lengkap, termasuk analisis sensitivitas, optimasi, dan simulasi Monte Carlo.	Fitur canggih, khususnya untuk simulasi bisnis dan keuangan. Menyediakan skenario manajemen risiko.
Kelebihan	<ul style="list-style-type: none"> - Mudah dipelajari oleh pemula. - Visualisasi yang jelas dan intuitif. - Cocok untuk pengajaran. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fleksibilitas tinggi. - Dapat menangani model kompleks. - Fitur analitik kuat. 	<ul style="list-style-type: none"> - Memiliki fitur kuat untuk simulasi bisnis. - Visualisasi skenario dan manajemen risiko yang baik.
Kekurangan	<ul style="list-style-type: none"> - Keterbatasan dalam fitur lanjutan. - Kurang optimal untuk model yang sangat kompleks. 	<ul style="list-style-type: none"> - Kurva belajar lebih curam. - Antarmuka kurang intuitif dibandingkan STELLA. 	<ul style="list-style-type: none"> - Harga mahal. - Kurang cocok untuk pemula atau pengajaran dasar.

Sasaran pengguna	Akademisi, pendidik, dan bisnis kecil.	Peneliti, analis kebijakan, dan modeler profesional.	Perusahaan besar, terutama dalam sektor keuangan dan manajemen strategis.
------------------	--	--	---

Sumber : (Isee System, 2024; Powersim Software, 2024; Ventana Systems, 2024)

4. STELLA (Systems Thinking, *Experimental Learning Laboratory with Animation*)

STELLA atau *System Thinking, Experimental Learning Laboratory with Animation* adalah sebuah perangkat lunak yang dikembangkan pada tahun 1985 oleh Barry Richmond. Aplikasi ini memungkinkan kita untuk mensimulasikan model yang akan dilakukan di kehidupan nyata. Sehingga dengan melakukan simulasi pemodelan kita dapat melakukan pendekatan model simulasi dengan rangkaian kegiatan aslinya di lapangan. Simulasi model menggunakan *software* ini telah banyak dilakukan salah satunya adalah memprediksi jumlah timbulan sampah perkotaan dan mengetahui umur pakai TPA.

Dalam membuat model pada *software* stella dimulai dengan menentukan *causal loop* diagram kemudian dikonversi menjadi *stock flow* diagram. Berikut komponen pembentuk *causal loop* diagram dan *stock flow* diagram:

a. *Casual loop diagram*

Tabel 7 Komponen pembentuk *stock flow diagram*

Icon	Nama Komponen	Fungsi
	<i>Module</i>	Variabel-variabel yang dihubungkan didalam casual loop dapat dimunculkan nilai ataupun hanya nama pada <i>module</i>
	<i>Connector</i>	Penghubung antar variabel dalam modul

Sumber : www.iseesystems.com

b. *Stock flow diagram*

Tabel 8 Komponen pembentuk *stock flow diagram*

Icon	Nama Komponen	Fungsi
	<i>Converter</i>	Secara umum digunakan untuk mengubah input menjadi output, menyimpan konstanta, tempat mengisi input persamaan, melakukan kalkulasi dari berbagai input atau menyimpan data dalam bentuk grafik x dan y.

Icon	Nama Komponen	Fungsi
	<i>Stock</i>	Menyimpan informasi berupa nilai suatu parameter hasil dari suatu akumulasi.
	<i>Flow</i>	Menambah atau mengurangi stock. Arah anak panah <i>flow</i> menunjukkan arah aliran. Aliran dapat bekerja dalam satu arah maupun dua arah.
	<i>Ghost</i>	Berfungsi untuk menduplikasi <i>converter</i> beserta data yang terisi.
	<i>Dynamite</i>	Menghapus variabel atau <i>converter</i> yang tidak sesuai.
	<i>Graphic</i>	Merepresentasikan data dalam bentuk grafik
	<i>Table</i>	Merepresentasikan data dalam bentuk tabel data

Sumber : www.iseesystems.com

1.7 Penelitian Terdahulu

Tabel 9 Penelitian terdahulu

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
1.	Freta Natalia Salendu dan Yuswono Hadi (2018) Analisis Dan Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah Yang Ada Di Universitas Ma Chung	Menjadikan Universitas Ma Chung menjadi Eco Campus dengan mengetahui penyebab terjadinya penggunaan sampah yang berlebih dan cara mengatasinya menggunakan Sistem Dinamis.	Simulasi sistem <i>Casual Loop</i> dan <i>Stock Flow Diagram</i> menggunakan software STELLA	Berdasarkan grafik yang ditampilkan total sampah yang dihasilkan oleh UMC selama 37 hari adalah 260,4 kg diantaranya: sampah botol sebesar 158 kg, sampah plastik sebesar 36,6 kg, sampah organik sebesar 32 kg, sampah <i>Styrofoam</i> sebesar 19,3 kg, dan sampah kertas sebesar 14,5 kg. Terdapat dua skenario yang dapat dilakukan untuk mereduksi sampah yang dihasilkan yaitu: 1. Menyediakan air siap minum di UMC. 2. Membawa tempat makan sendiri untuk membungkus makanan. Berdasarkan hasil running aplikasi untuk jumlah sampah selama 1 tahun ke depan skenario pertama memiliki jumlah sampah yang lebih rendah daripada skenario kedua dengan angka 7.183,8 kg/tahun sedangkan skenario 2 sebesar 8.041,2 kg/tahun
2.	Mochammad Chaerul dan Ika Artika (2021) Aplikasi Model Sistem Dinamik Untuk Evaluasi Skenario Pengelolaan Sampah Di Wilayah Pelayanan Tempat	mengaplikasikan sistem dinamik dalam mengevaluasi berbagai skenario pengelolaan sampah di Kota Depok, Kota Bogor, Kota Tangerang Selatan, dan	Simulasi sistem <i>Casual Loop</i> dan <i>Stock Flow Diagram</i> menggunakan software STELLA 9.1.3	Pada tahun 2045, jumlah penduduk Kota Depok diperkirakan mencapai 4.396.037 jiwa, Kota Bogor 1.269.266 jiwa, Kabupaten Bogor 8.100.301 jiwa, dan Kota Tangerang Selatan 2.944.465 jiwa. Timbulan sampah per kapita juga mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan ekonomi. Pada tahun 2045, timbulan sampah di Kabupaten Bogor, Kota Depok,

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
	Pengolahan Dan Pemrosesan Akhir Sampah (TPPAS) Nambo	Kabupaten Bogor untuk mengantisipasi dioperasikannya TPPAS Nambo		<p>Kota Tangerang Selatan dan Kota Bogor diperkirakan naik masing-masing menjadi 0,67; 0,78; 0,78 dan 0,79 kg/orang/hari.</p> <p>Terdapat 4 (empat) skenario pengelolaan sampah yang dikembangkan untuk mengantisipasi dioperasikannya TPPAS Nambo ini. Hasil simulasi keempat skenario menunjukkan bahwa karena keterbatasan kapasitas pengolahan sampah di TPPAS Nambo maka fasilitas pengelolaan sampah tetap dibutuhkan secara mandiri untuk mengelola sampah yang dihasilkan masing-masing kota/kabupaten.</p> <p>Dari keempat skenario tersebut maka skenario C, yaitu pengurangan sampah hingga 30% sesuai Jakstrada, merupakan skenario yang paling optimal bila mempertimbangkan jumlah timbulan sampah yang harus dikelola, biaya operasional, kebutuhan lahan untuk TPA dan emisi lingkungan. Akan tetapi, skenario C mensyaratkan adanya kebutuhan fasilitas penanganan sampah di sumber yang lebih besar.</p>
3.	Hariani dan Suprajaka (2017) Pemodelan Sistem Dinamis Pengolahan Sampah Secara Berkelanjutan Di	Mengetahui skenario pengolahan sampah yang efektif untuk mengurangi volume sampah di Kelurahan Duri Kepa Jakarta Barat	Pemodelan menggunakan Powersim Studio 8	alternatif solusi dibagi menjadi tiga skenario yaitu skenario optimis, moderat dan pesimis yang diharapkan mampu mengurangi jumlah sampah yang berakhir di TPS dan TPA, dengan menerapkan sistem partisipatif dan pengolahan sampah secara berkelanjutan. Dari ketiga skenario yang telah dibuat modelnya, skenario yang paling tepat dilakukan

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
	Kelurahan Duri Kepa Jakarta Barat			adalah skenario optimis, dengan catatan implementasi skenario ini harus didukung dengan adanya partisipasi dari masing-masing pihak seperti Dinas Kebersihan, pemulung, dan masyarakat di Kelurahan Duri Kepa.
4.	Dea Febrica Ervina dan Yayok Suryo Purnomo (2023) Pengembangan Model Prediksi Kebutuhan Air Bersih terhadap Keseimbangan antara Pemasok Air Bersih dengan Kebutuhan Air Bersih Menggunakan Sistem Dinamis pada PT. X Pengolahan Hasil Laut Di Jawa Timur	model manajemen air yang efektif dan efisien dalam pendistribusian air bersih kepada kegiatan perusahaan maupun proses produksi	Pemodelan dinamis menggunakan aplikasi STELLA 9.0.2	Dari hasil simulasi menunjukkan perbandingan antara pemasok air dengan kebutuhan air masih tidak sebanding. Kebijakan untuk mengatasi volume pasokan air bersih yang kurang, maka dapat dilakukan dengan penambahan suplai air bersih dari suplai luar dengan memperbesar jumlah volume air dari pihak PDAM ataupun ingin dipenuhi dengan penambahan suplai air dari dalam perusahaan itu sendiri yaitu dengan cara memperluas lahan water treatment plant atau dapat dengan membuat sumber dari air permukaan tanah dimana memanfaatkan air sumur. Pada hasil simulasi proyeksi tahun ke 10 kebutuhan air 72231,81 m ³ dan total produksi sebanyak 1546,64 ton, sedangkan dari perhitungan jumlah kebutuhan air dalam setiap ton mencapai 46,7 m ³ /ton hal tersebut telah melebihi standar baku mutu volume air berdasarkan Peraturan Gubernur Jawa Timur No 72 tahun 2013 yaitu 30 m ³ /ton. Dari penelitian ini dengan menggunakan sebab akibat yang masih lingkup perusahaan. Diharapkan untuk penelitian selanjutnya mencangkup sebab dan akibat yang lebih luas lagi.

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
5.	Abdul Ghefurulloh dan Mohammad Mirwan (2021) Perencanaan Jalur Pengangkutan Sampah Kota Bangkalan Dengan Model Dinamis	Untuk menentukan jalur pengangkutan sampah yang efisien serta menentukan kebutuhan ritasi dan jumlah armada pengangkutan sampah menggunakan simulasi pemodelan dinamis.	<p>1. Identifikasi setiap komponen sistem pengangkutan sampah yang meliputi identifikasi timbulan sampah, jumlah dan jenis armada, lokasi tiap TPS dan TPA, dan proses pengangkutan eksisting.</p> <p>2. Konseptualisasi model yang meliputi indentifikasi variabel yang berpengaruh pada pengangkutan sampah, penyusunan causal loop berdasarkan variabel yang sudah teridentifikasi, pembentukan sub model berdasarkan causal loop yang telah disusun.</p>	Model dinamis dapat merencanakan kebutuhan ritasi dan jumlah armada untuk 10 tahun mendatang. Hasil olah data yang didapat pada tahun 2029 dibutuhkan jumlah armada pengangkutan sebanyak 18 unit serta kebutuhan ritasi ialah sebanyak 40 ritasi, dengan total timbulan sampah sebesar 302,76 m ³ .

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
6.	Nurfatmala, Anwar Mallongi, Agus Bintara Birawida (2018) Model Dinamis Dalam Memprediksi Timbulan Sampah Rumah Tangga Di Kota Baubau	Untuk mendapatkan gambaran atau fenomena mengenai pengelolaan sampah dengan cara membuat “sistem model dinamis” pada sistem sampah perkotaan, dilanjutkan melakukan simulasi dengan menentukan dan mengubah - ubah variable berpengaruh pada sistem / model yang dibuat sehingga dapat diketahui respon dari variabel yang diamati dengan harapan dapat berguna untuk pengambilan kebijakan atau keputusan pada instansi terkait. Model ini diharapkan dapat mengestimasi timbulan sampah Kota Baubau	Analisis model dengan menggunakan STELLA 5.0	Estimasi rata – rata timbulan sampah rumah tangga di Kota Baubau berdasarkan hasil simulasi model dinamis selama 25 tahun (2017 - 2042) tanpa tindakan pengendalian mengalami kenaikan tiap tahunnya sebesar 0,99 kali lipat. Estimasi rata–rata timbulan sampah rumah tangga di Kota Baubau berdasarkan hasil simulasi model dinamis selama 25 tahun (2017-2042) dengan skenario bank sampah mengalami penurunan sebesar 1,01 kali lipat dari total sampah. Maka dari itu diharapkan pemerintah atau instansi terkait melakukan upaya pengendalian untuk menekan laju peningkatan timbulan sampah rumah tangga di Kota Baubau. Masyarakat diharapkan lebih kreatif dan inovatif dalm mengurangi timbulan sampah seperti memberi informasi kepada msyarakat yang belum paham terhadap sampah dan lingkungan, mendirikan bank sampah dikawasan tempat tinggal mereka.

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
		tahun 2017 hingga tahun 2042.		
7.	Nesli Aydın (2021) A Comprehensive Waste Management Simulation Model For The Assessment Of Waste Segregation In The Health Sector	penelitian ini bertujuan, (i) untuk mengatasi situasi pengumpulan, pengolahan dan pembuangan limbah medis di Wilayah Thrace, Turki (termasuk tiga provinsi Tekirdağ, Kırklareli dan Edirne), (ii) untuk menentukan hubungan antara faktor-faktor tersebut, yang mempengaruhi timbulan sampah limbah medis, dan (iii) mengkaji potensi minimalisasi timbulan limbah medis dengan menerapkan skema segregasi yang kuat di institusi kesehatan.	Penelitian ini mengambil pendekatan sistem dinamik dengan menggunakan perangkat lunak Stella dan Vensim.	Produksi limbah medis akan meningkat selama 25 tahun ke depan, terutama disebabkan oleh pertumbuhan penduduk regional. Yang penting adalah, jika kapasitas pengolahan limbah medis yang ada di kawasan ini ingin mencukupi hingga tahun 2045, kandungan limbah domestik dalam limbah medis harus dikurangi secara signifikan dibandingkan dengan tingkat yang ada saat ini. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut harus dilakukan sebagai hal yang mendesak untuk menentukan apakah pengurangan kandungan limbah domestik dalam limbah medis hingga 10% dapat dicapai di rumah sakit-rumah sakit yang ada di Turki. Kegiatan pelatihan pengelolaan sampah mempunyai potensi besar untuk menjadi efektif dalam konteks ini. Analisis sensitivitas memberikan hasil yang bermanfaat dalam kondisi di mana nilai-nilai variabel model dapat diestimasi secara wajar. Namun, di Turki, pembuatan rencana strategis, termasuk target untuk membatasi timbulan limbah medis, baru-baru ini mendapatkan perhatian yang lebih baik dari para pengambil keputusan. Dalam hal ini, jelas bahwa analisis sensitivitas akan memberikan hasil yang lebih

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
				<p>realistis, sehingga dapat memandu pengenalan target investasi baru dalam waktu dekat.</p> <p>Salah satu kelebihan simulasi pemodelan adalah kapan situasi yang tidak terduga terjadi, parameter sistem dapat dimodifikasi sesuai dengan situasi ini. Hal ini membuatnya sangat bermanfaat dalam memprediksi pembangunan infrastruktur yang diperlukan untuk pemisahan penyakit menular dengan benar limbah medis, khususnya limbah alat pelindung diri seperti masker dan plastik sekali pakai, meningkat secara tidak terduga selama pandemi COVID-19.</p>
8.	Pelangi Mayang Sukma Pertiwi dan Budi Kunchahyo (2021) Dynamic System Model For Waste Management In Bogor City To Reduce Building	Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengelolaan sampah di kota Bogor untuk mengurangi penumpukan sampah yang berlebihan di TPA Galuga dengan menggunakan simulai berdasarkan pendekatan sistem dinamik. Hasil penelitian ini dapat menjadi bahan masukan dalam pengelolaan sampah di TPA Galuga, sehingga tidak terjadi	Metode yang digunakan adalah simulasi model dengan menggunakan perangkat lunak STELLA 9.1.3. Pengembangan model dimulai dengan konseptualisasi terhadap sistem pengelolaan sampah yang dituangkan dalam	Berdasarkan hasil paper yang telah ditulis bahwa pengelolaan sampah di kota bogor masih memerlukan penanganan yang khusus Dikarenakan populasi penduduk dan volume sampah di Kota Bogor dan Kabupaten Bogor rentang tahun 2020-2030 selalu mengalami peningkatan begitu pula dengan peningkatan sampah yang lebih tinggi dari pada populasi penduduk sehingga menjadikan kekurangan lahan pada lokasi TPA, kurangnya partisipasi masyarakat untuk mengelola sampah.

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
		penumpukan sampah yang akan berakibat meningkatnya polusi air, tanah dan udara.	bentuk causal loop diagram	
9.	Rizki Andi Cahyono dan Atikha Sidhi Cahyana (2021) Model Pengendalian Food Waste pada Supermarket dengan menggunakan Sistem Dinamik	Untuk menggambarkan sistem sampah makanan yang ada di supermarket. Dan untuk mencari masalah dan solusi untuk menekan tumpukan sampah makanan yang ada di supermarket.	Metode yang digunakan adalah sistem dinamik dengan tujuan mencari sebab akibat timbulnya food waste, untuk pengolahan data menggunakan software Stella.	1. Food waste selam 14 hari kedepan yaitu total food waste buah slice sebesar 51 kg dan food waste fried chicken 42 pcs dengan total kerugian sebesar Rp2.053.281,00. 2. Alternatif pengendalian food waste yang dapat dilakukan dengan cara yaitu yang awal mulanya stock hari ini berdasarkan penjualan kemarin sebaiknya pemotongan buah slice atau pembuatan fried chicken dilakukan secara bertahap (jika target penjualan buah slice hari ini 15 pack, maka pemotongan buah slice dilakukan bertahap, bisa setiap 3 jam sekali atau waktu tertentu dengan melihat jumlah pack yang terjual).
10.	Atikha Sidhi Cahyana, Abdul Rakhmad Hidayat, dan Hana Catur Wahyuni (2022) Identifikasi Faktor Penyebab Food Waste Rumah Tangga Di Sidoarjo	untuk mengetahui factor - faktor yang mempengaruhi timbulnya food waste sehingga berpengaruh terhadap tumpukan sampah yang ada di Sidoarjo dengan metode sistem dinamik.	Pengolahan data di lakukan dengan menerapkan simulasi sistem dinamis. Simulasi di lakukan dengan menggunakan bantuan software stella	Simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan bantuan software stella di dapatkan hasil bahwa foodwaste yang ada di Sidoarjo semakin meningkat 2 kali lipat setiap harinya hal ini di karenakan pengaruh dari foodwaste yang berada di TPS Gedangan juga meningkat setiap hari sedangkan penampungan yang digunakan masih tetap dengan kapasitas yang sama, dari hal ini dapat di tarik kesimpulan bahwa foodwaste yang berada

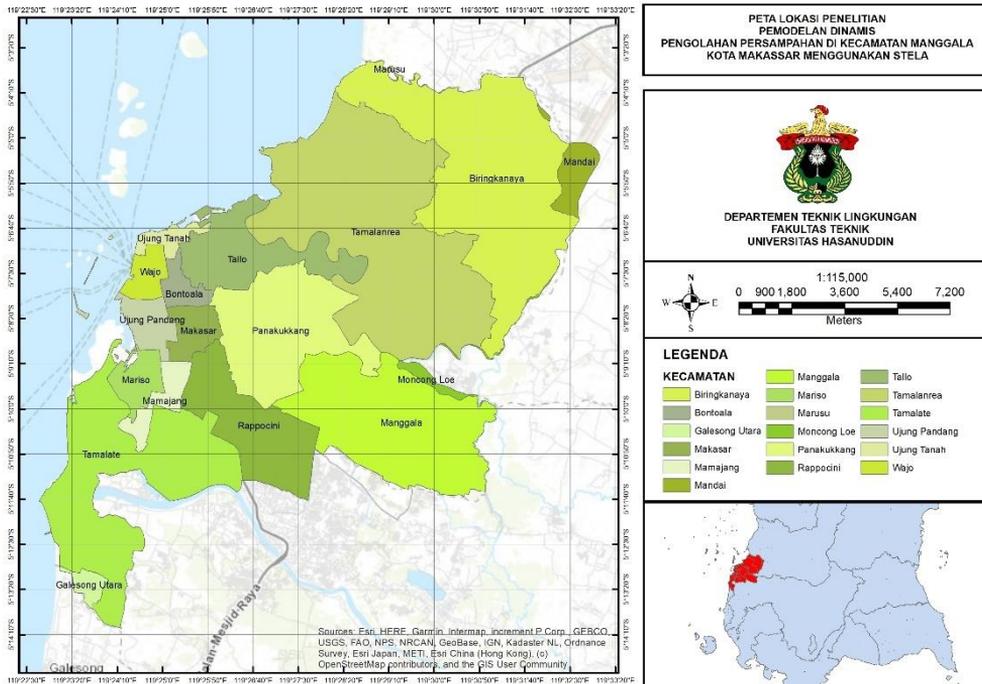
No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
			<p>untuk mensimulasikan factor - faktor pemicu food waste rumah tangga yang telah didapatkan. Kemudian melakukan validasi menggunakan data jumlah food waste yang didapatkan</p>	<p>di TPS Gedangan cukup berpengaruh terhadap tumpukan sampah yang ada di Sidoarjo. Sehingga perlu dilakukan beberapa hal seperti :</p> <p>(1). Warga melakukan pengolahan secara individu atau kelompok dalam mengolah food wastesebelum sampah diserahkan/dikirim ke TPS. Food waste bisa diolah menjadi makanan ternak atau sebagai kompos.</p> <p>(2). Mempercepat proses pengangkutan sampah dari TPS Gedangan menuju ke TPA Jabon Dengan cara memperbanyak armada pengangkutan sehingga sampah tidak sampai menumpuk di TPS Gedangan. Hal ini bisa dilakukan pengoptimalisasian terhadap armada yang telah ada berdasarkan pada rute dan jam pengambilan.</p> <p>(3). Melakukan pemilahan dan pengolahan sampah, dimana food waste diolah menjadi biogas atau bioenergy, kompos dan makanan ternak dengan kapasitas yang lebih besar dari pengolahan yang dilakukan oleh warga sebelum sampah dikirim menuju ke TPA.</p> <p>(4). Memperbanyak alat pengolahan sampah baik di area sorting maupun kompostingpada TPA Jabon.</p>

No	Judul Penelitian	Tujuan	Metode	Hasil Penelitian
11.	Hermansyah, Muh Sais L, dan Hernawati (2017)	Untuk mengetahui desain model dan mekanisme alat insinerator untuk mengatasi pencemaran udara pada pembakaran sampah.	Menguji dan mengamati kerja insinerator pembakaran di insinerator dan pembakaran bebas.	Prinsip kerja insinerator ialah sampah dibakar pada ruang pembakaran kemudian asap pembakaran di semprotkan air dengan nozzle spray pada pipa besi sebelum memasuki ruang penampung asap, kemudian asap memasuki pipa PVC filter air yang terdiri dari 2 pipa pada pipa tersebut di semprotkan air dari atas pipa menggunakan nozzle spray. Kemudian asap di isap oleh blower dan kemudian asap keluar ke lingkungan sehingga asap pembakarannya berkurang. Insinerator dua tahap ini dapat membakar 1 kg sampah plastik dalam waktu 36 menit, laju pembakarannya (Bbt) 1,7 kg/jam, rendemen arangnya 22,5 %, rendemen abunya 10 % dan tingkat efisiensinya dalam mengurangi sampah sebesar 67,5 %. Sedangkan pembakaran secara bebas dapat membakar 1 kg sampah plastik dalam waktu 31 menit, laju pembakarannya (Bbt) 2 kg/jam, rendemen arangnya 25 %, rendemen abunya 7,5 % dan tingkat efisiensinya dalam mengurangi sampah sebesar 67,5 %.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian yang diambil berada di Kota Makassar Sulawesi Selatan. Berikut gambaran peta dari cakupan Kota Makassar Sulawesi Selatan.

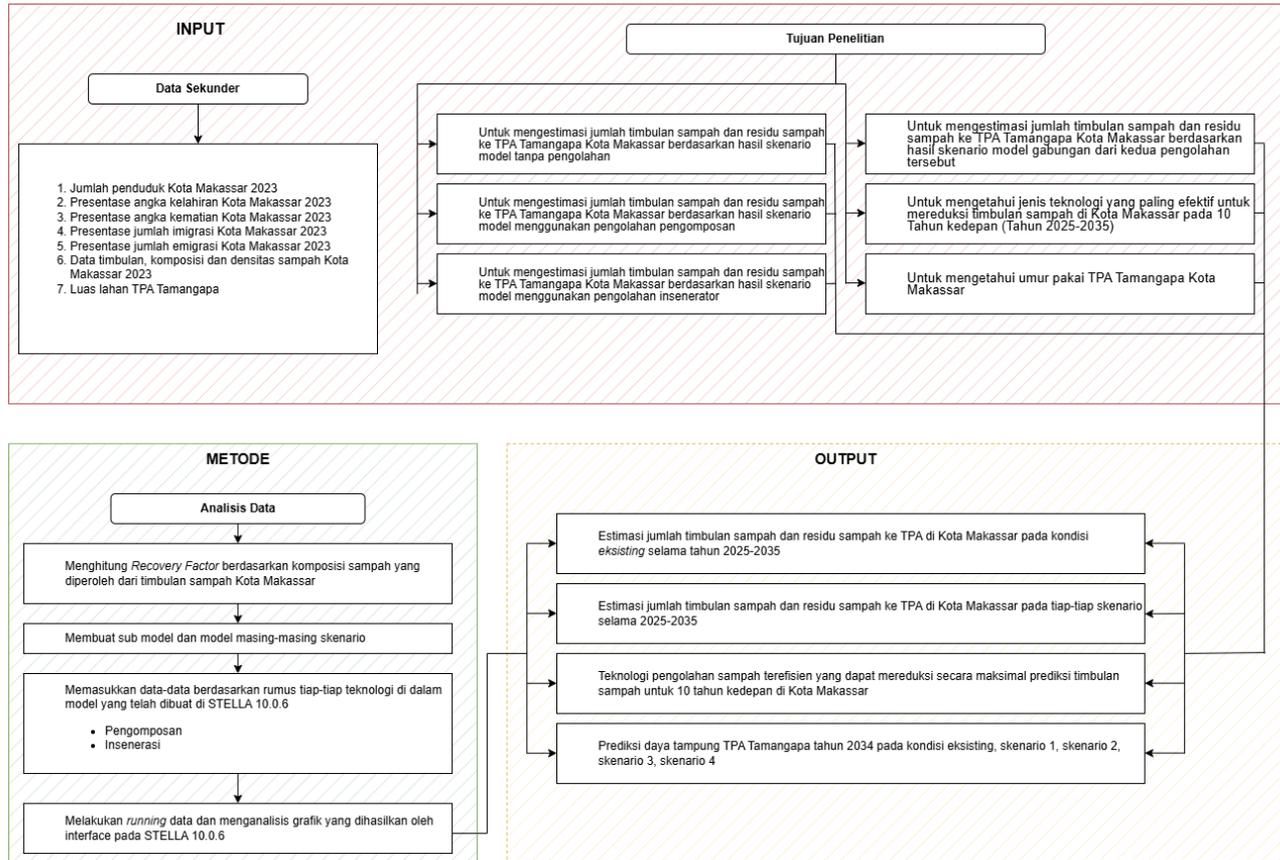


Gambar 4. Peta lokasi penelitian

2.2 Waktu Penelitian

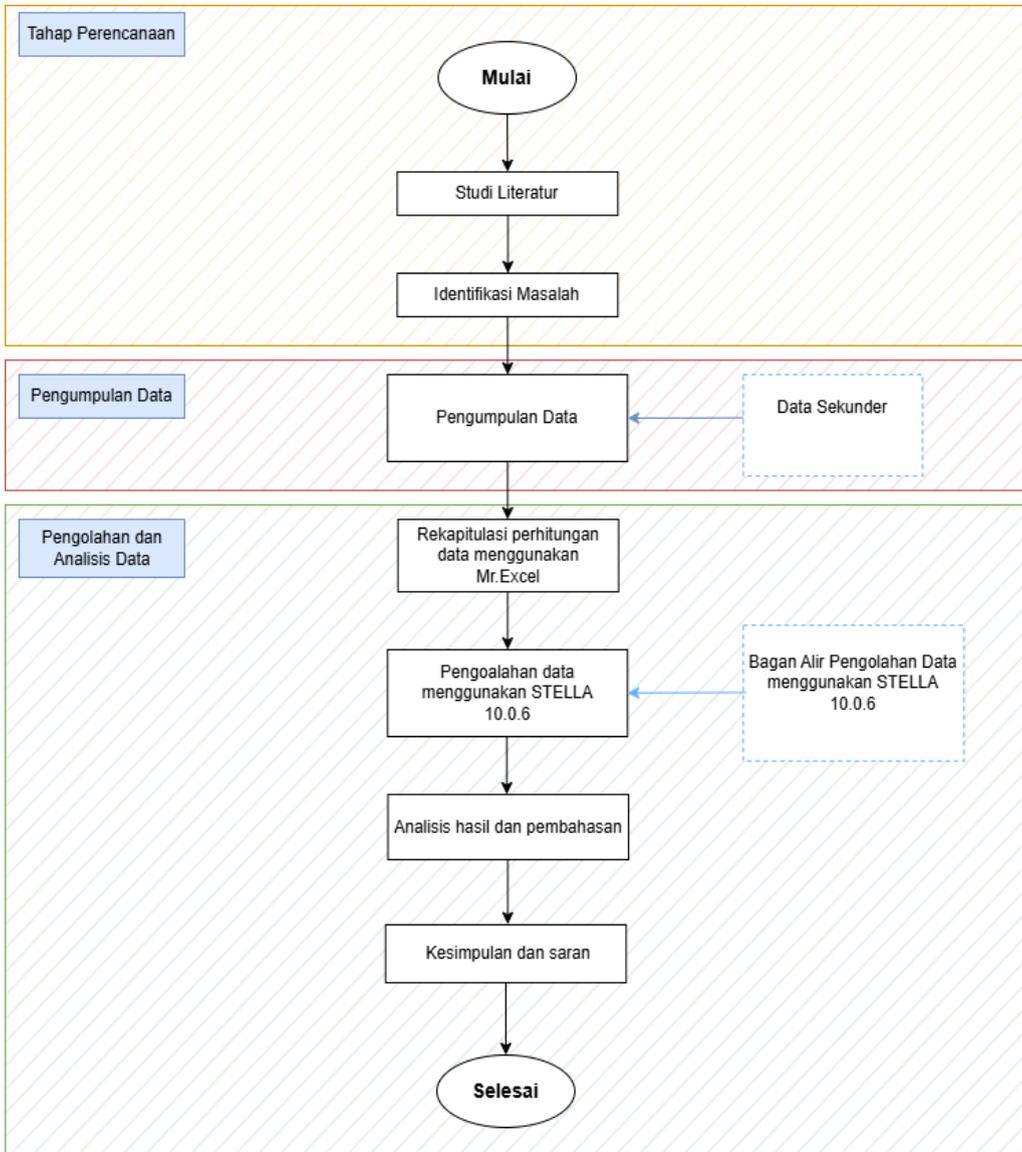
Penelitian ini direncanakan akan dilaksanakan selama 3 bulan, pada bulan Agustus – Oktober 2024 dengan waktu pengumpulan data sekunder selama 14 hari dan sisa waktu digunakan untuk mengolah dan melakukan analisis data serta validasi model.

2.3 Kerangka Berpikir



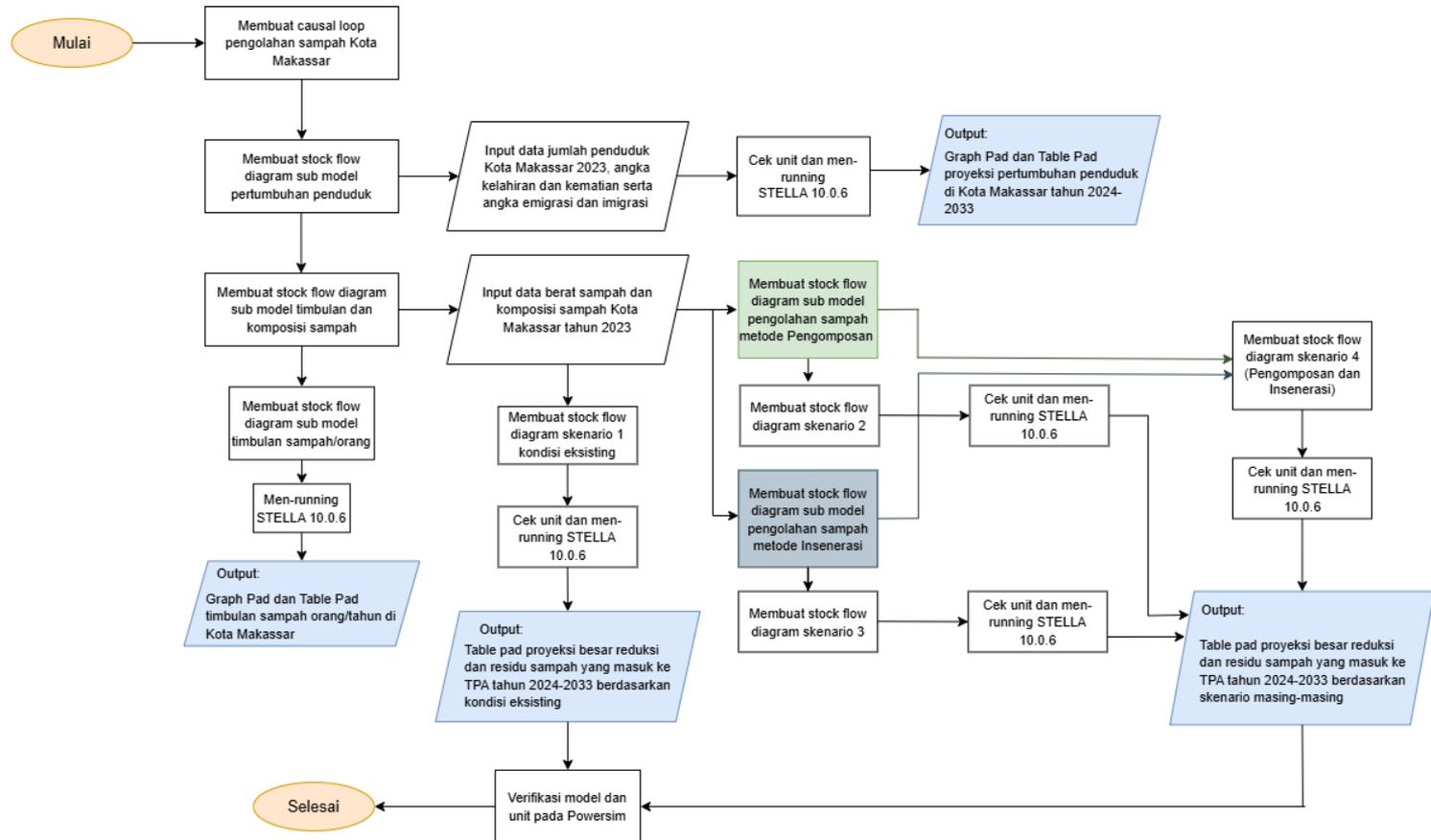
Gambar 5. Kerangka berpikir

2.4 Diagram Alir



Gambar 6. Diagram alir penelitian

2.5 Bagan Alir



Gambar 7. Bagan alir

2.6 Kebutuhan Data

Adapun kebutuhan data sekunder yang akan dikumpulkan diperoleh dari instansi terkait seperti yang tertera pada Tabel di bawah ini.

Tabel 10 Data - data yang dibutuhkan dalam penelitian ini

No.	Jenis Data	Sumber	Keterangan
1.	Data jumlah penduduk Kota Makassar	Badan Pusat Statistik Kota Makassar 2024	Data Sekunder
2.	Data indeks kematian, kelahiran, imigrasi dan emigrasi Kota Makassar	Sensus Penduduk Provinsi Sulawesi Selatan 2020	Data Sekunder
3.	Timbulan dan komposisi sampah Kota Makassar 2023	Dinas Lingkungan Hidup Kota Makassar	Data Sekunder
4.	Luas lahan aktif dan pasif TPA Tamangapa Antang	UPTD TPA Tamangapa Kota Makassar	Data Sekunder
5.	Kriteria desain teknologi pengolahan sampah (Pengomposan, dan Insenerator)	Studi literatur (tesis, dan jurnal)	Data Sekunder

2.7 Populasi

Populasi dalam penelitian ini adalah jumlah timbulan sampah dan komposisi sampah di Kota Makassar pada tahun 2023.

2.8 Metode Pengambilan Data

Metode pengolahan yang dilakukan adalah untuk memperoleh data sebagai berikut:

1. Timbulan sampah

Untuk mendapatkan data timbulan sampah Kota Makassar tahun 2023 dilakukan penjumlahan timbulan sampah tiap bulannya hingga bulan ke-12 dari data sekunder. Berikut rumus dari perhitungan timbulan sampah:

$$\text{Timbulan sampah (kg/o/h)} = \frac{\text{Berat Sampah } \left(\frac{\text{kg}}{\text{hari}}\right)}{\text{Jumlah Orang}} \quad (11)$$

$$\text{Timbulan sampah (kg/m}^2\text{/h)} = \frac{\text{Berat Sampah } \left(\frac{\text{kg}}{\text{hari}}\right)}{\text{Luas Area}} \quad (12)$$

2. Densitas sampah

Densitas sampah merupakan perbandingan dari berat sampah dengan volumenya. Sehingga didapatkan rumus seperti berikut:

$$\text{Densitas (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Berat Sampah (kg)}}{\text{Volume (m}^3\text{)}} \quad (13)$$

3. Komposisi Sampah

Komposisi sampah merupakan jenis-jenis sampah yang terkandung di dalam timbulan sampah. Untuk data sekunder yang diperoleh komposisi sampah terbagi menjadi 9 jenis sampah yaitu organik, kertas, logam, plastik, kain/tekstil, kayu, kaca, B3, dll. Untuk mengetahui persentase dari tiap-tiap komposisi sampah dapat dilihat pada rumus berikut:

$$\text{Komposisi (\%)} = \frac{\text{Berat Sampah Tiap Jenis (kg)}}{\text{N Berat Sampah Total (kg)}} \times 100\% \quad (14)$$

4. Recovery Factor

Setelah mengetahui dari timbulan sampah dan juga komposisi sampah selanjutnya dilakukan terkait perhitungan potensi reduksi sampah berdasarkan jenis sampah. Untuk rumus *recovery factor* dapat dilihat pada persamaan (3)

Setelah mendapatkan data-data yang dibutuhkan maka selanjutnya dilakukan Analisa data. Analisa data dalam penelitian ini terbagi menjadi 3 tahapan, yaitu:

1. Instrumen Penelitian

Penunjang penelitian ini adalah antara lain laptop beserta perangkat lunaknya (STELLA 10.0.6, Microsoft Word, Microsoft Excel, Arcgis 10.8, Agisoft Metashape, AutoCAD dan Google Earth Pro), *Smartphone*, *printer*, dan alat tulis.

2. Batasan Model

Batasan model dalam penelitian ini adalah terbatas untuk pengolahan persampahan berdasarkan data sekunder yang dikumpulkan dari instansi Dinas Lingkungan Hidup Kota Makassar. Untuk model pengolahannya menggunakan 2 teknologi yaitu skenario pengomposan, dan Skenario Insenerator.

3. Skenario Simulasi

Dalam penelitian ini penulis membuat 4 jenis skenario dengan masing-masing periode rancangan selama 10 tahun 2024-2034.

- a. Skenario 1 yaitu skenario yang mengestimasi timbulan sampah pada TPA tanpa adanya pengolahan sampah atau kondisi eksisting.
- b. Skenario 2 yaitu skenario yang mengestimasi timbulan sampah pada TPA dengan menambahkan metode pengolahan sampah composting
- c. Skenario 3 yaitu skenario yang mengestimasi timbulan sampah pada TPA dengan menggunakan metode pengolahan sampah berupa insenerator.
- d. Skenario 4 yaitu skenario dengan pengolahan sampah gabungan skenario 3 dan skenario 2 yaitu dilakukan pengolahan persampahan menggunakan metode composting dan insenerator secara bersamaan.