

P-ISSN: 2774-4574 ; E-ISSN: 363-4582
TRILOGI, 6(3), Juli-Sep 2025 (64-73)
@2025 Lembaga Penerbitan, Penelitian,
dan Pengabdian kepada Masyarakat (LP3M)
Universitas Nurul Jadid Paiton Probolinggo
DOI: [10.33650/trilogi.v6i3.12464](https://doi.org/10.33650/trilogi.v6i3.12464)



Evaluasi Pengelolaan Sampah terpadu Melalui Analisis Skenario dengan Pendekatan *Waste Reduction Model V.16* - (Studi Kasus TPA Makbon, Sorong, Provinsi Papua Barat Daya)

Firmanullah Fadlil

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia
firmanullah_fadlil@unimudasorong.ac.id

Yusron Difinubun

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia
yusrondifinubun@unimudasorong.ac.id

Yusnita La Goa

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia
yusnitaLaGoa@unimudasorong.ac.id

Ainul Alim Rahman

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia
ainul_Alim_Rahman@unimudasorong.ac.id

Abstract

The production of municipal solid waste is a global problem, therefore due to the large amount and environmental impacts produced, urban solid waste needs to be managed properly. The implementation of more appropriate and efficient solutions is important for sustainable development, minimizing environmental impacts and saving energy. This study aims to analyze alternative scenarios using the Waste Reduction Model (WARM) V.16 to find the best solution for solid waste management in Sorong City. Existing Scenarios, Scenario 1 (50% landfill, 25% incineration, 25% recycle), Scenario 2 (25% landfill, 50% incineration, 25% recycle) and Scenario 3 (25% landfill, 25% incineration, 50% recycle) are implemented using the WARM V.16 model. The results of this study indicate that Scenario 3 provides the best results in terms of environmental impact and energy savings (-30,443.37 MTCO_{2e} and -784,554.96 MBTU), followed by Scenario 2 (-10,146.07 MTCO_{2e} and -553,413.70 MBTU), Scenario 1 (-1,649.74 MTCO_{2e} and -441,080.90 MBTU), and the Existing Scenario (35,640.31 MTCO_{2e} and 13,725.96 MBTU).

Keywords: emissions; energy savings; municipal solid waste; scenario analysis; WARM Model.

Abstrak

Produksi jumlah sampah padat kota adalah sebuah masalah global, oleh karena disebabkan banyaknya jumlah dan dampak lingkungan yang dihasilkan maka sampah padat perkotaan perlu dilakukan pengelolaan yang tepat. Implementasi dari solusi yang lebih tepat dan efisien adalah penting untuk pengembangan berkelanjutan, minimalisir dampak lingkungan dan penghematan energi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis alternatif skenario pengelolaan Waste Reduction Model (WARM) V.16 untuk menemukan solusi terbaik pengelolaan sampah padat di Kota Sorong. Skenario Eksisting, Skenario 1 (50% landfill, 25% insenerasi, 25% recycle), Skenario 2 (25% landfill, 50% insenerasi, 25% recycle) dan Skenario 3 (25% landfill, 25% insenerasi, 50% recycle) diterapkan dengan menggunakan model WARM V.16. Hasil dari penelitian ini menunjukkan Skenario 3 memberikan hasil terbaik dalam hal dampak lingkungan dan energi saving (-30.443, 37 MTCO₂e dan -784.554,96 MBTU) diikuti Skenario 2 (-10.146,07 MTCO₂e dan -553.413,70 MBTU), Skenario 1 (-1.649,74 MTCO₂e dan -441.080,90 MBTU), dan Skenario Existing (35.640,31 MTCO₂e dan 13.725,96 MBTU)

Katakunci: emisi; energi saving; sampah padat kota; skenario analisis; WARM Model.

1 Pendahuluan

Pengelolaan sampah menjadi salah satu isu krusial di seluruh dunia, terutama di negara berkembang yang menghadapi peningkatan jumlah penduduk, urbanisasi, perubahan pola konsumsi masyarakat dan perubahan sosial-kemasyarakatan. Menurut United Nations Environment Programme (UNEP) produksi sampah dunia tahun 2020 diperkirakan lebih dari 2,1 miliar ton sampah dan diprediksi akan terus meningkat dengan pertumbuhan penduduk dan ekonomi sebesar 3,8 miliar ton sampah di tahun 2050 (Zoë Lenkiewicz, 2024). Di banyak negara maju maupun berkembang, pengelolaan sampah padat kota yang dihasilkan telah menyebabkan tantangan lingkungan yang serius (Maity, 2018). Namun, kekhawatiran global terhadap lingkungan dan energi menjadikan studi pengelolaan sampah diperlukan, bahkan untuk kota-kota kecil (Kayakutlu et al., 2017)(Fadlil, F. Difinubun, Y. Alim, 2025).

Indonesia sendiri tidak lepas dari permasalahan serupa. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) dan data dari SIPSN mencatat bahwa lebih dari 35 juta sampah dihasilkan di tahun 2024 sendiri (SIPSN, 2025). Dengan lebih dari 60% merupakan sampah organik dan sisanya terdiri dari plastik, logam, kertas dan material lainnya. Sementara kapasitas infrastruktur dan sistem pengelolaan sering kali tidak sejalan dengan laju pertumbuhan tersebut. Kondisi ini menyebabkan berbagai permasalahan mulai dari kesehatan manusia, pencemaran lingkungan (Knickmeyer, 2020), udara, tanah, dan air, hingga emisi gas rumah

kaca (GRK) yang berkontribusi pada perubahan iklim global.

Upaya pengelolaan sampah telah diatur melalui berbagai kebijakan, seperti Peraturan Presiden No 97 Tahun 2017 tentang kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga (Kebijakan, 2017). Dalam penerapannya masih mengalami kendala infrastruktur, rendahnya partisipasi masyarakat, dan lemahnya sistem pemisahan sampah dari sumbernya.

Di tingkat daerah permasalahan menjadi semakin kompleks, kota - kota di Indonesia seperti Sorong masih mengandalkan tempat pembuangan akhir (TPA) dengan sistem open dumping atau *control landfill* dengan berbagai keterbatasan dan potensi pencemaran lingkungan (Fadlil et al., 2025). Konsep *zero waste* merupakan strategi yang disetujui secara global untuk mengatasi masalah sampah. Dalam strategi ini, sampah dianggap sebagai sumber material berharga yang dihasilkan dalam proses pemanfaatan sumber daya alam (Zaman, 2014). Misalnya pemanfaatan limbah tulang ikan sebagai adsorben (Malik et al., 2023).

Tugas utama pengelolaan sampah kota adalah meminimalkan dampak buruk lingkungan akibat timbulan sampah dengan meminimalkan produksi sampah, mendorong pemanfaatan kembali bagian sampah yang masih dapat digunakan dan daur ulang tanpa menghasilkan produk sampah baru (Ugwu et al., 2021). Pengelolaan sampah terpadu merupakan hal penting yang harus diperhatikan. Dalam hierarki penanganan sampah padat (MSW) tahap - tahap yang dilakukan misalnya pencegahan (pengurangan sampah dari asalnya),

pemanfaatan kembali, dan yang terakhir pembuangan ke TPA (Couto et al., 2017). Untuk menciptakan pengelolaan sampah terpadu guna meminimalkan pembuangan sampah, langkah – langkah yang biasa diambil adalah meningkatkan perilaku, kesadaran, dan edukasi public, meminimalkan dan mencegah timbulan sampah, daur ulang sampah, produksi kompos, konversi sampah menjadi energi, serta meningkatkan kondisi TPA dan perawatan pasca-TPA (Garcia et al., 2010). Sedangkan untuk emisi gas rumah kaca dapat dikurangi melalui pengalihan sampah plastik dengan penerapan strategi nol sampah (*zero waste*) (Castigliengo et al., 2021), mengolah bahan organik dengan kompos, proses AD (Anaerobon Digestion), insenerasi, dan penimbunan sampah sisa (landfill) (Klavenieks et al., 2017).

Penelitian tentang evaluasi pengelolaan TPA dengan menggunakan WARM Model sudah banyak dilakukan, contohnya studi yang dilakukan di Iran menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca paling rendah terjadi ketika 50 persen sampah dilakukan insenerasi sebagai pembangkit listrik tenaga sampah, 30 persen sebagai landfill, dan 20 persen didaur ulang (Maghmoumi et al., 2020). Beberapa penelitian lain juga menggunakan metode WARM yang melakukan 114 skenario termasuk recycle, landfill (*no gas recover* dan *gas recover*) dan waste to energy (landfill dengan recovery energi, *anaerob digestion*, insinerasi) di kota Xangri-la Brazil. (de Medeiros Engelmann et al., 2022), penelitian lain adalah penggunaan WARM V.15 untuk mengevaluasi skenario komposting, recycle yang dilakukan di TPS3R Flamboyan (Maulidia & Wikaningrum, 2025). Saat ini masih sedikit sekali penelitian di Indonesia yang menggunakan WARM Model sebagai metode perhitungan potensi gas rumah kaca. Kebaharuan dari penelitian ini adalah belum adanya penelitian yang dilakukan untuk menghitung emisi gas rumah kaca dan energi saving di TPA Makbon dengan menggunakan model WARM V.16 (Waste Reduction Model). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan kondisi pengelolaan sampah TPA eksisting (saat ini) di TPA Makbon dengan skenario yang diusulkan dalam hal parameter emisi gas rumah kaca dan energi saving dengan menggunakan metode WARM V.16.

2 Metode

Penelitian dilaksanakan secara sistematis. Tahap pertama adalah kajian dan analisis komposisi sampah di TPA Makbon. Tahap kedua yaitu penetapan skenario pengelolaan sampah.

Skenario yang digunakan yaitu skenario eksisting, skenario 1 (50% landfill, 25% insenerasi, 25% recycle), skenario 2 (25% landfill, 50% insenerasi, 25% recycle) dan skenario 3 (25% landfill, 25% insenerasi, 50% recycle). Tahap ketiga perhitungan emisi equivalen karbon dioksida pada berbagai skenario dengan menggunakan WARM Model V.16 dan tahap ke empat merangkum hasil dan mengusulkan skenario terbaik.

Studi Area

TPA Makbon, sebagai wilayah pengelolaan sampah di Provinsi Papua Barat Daya, Indonesia meliputi 10 Distrik dan 41 kelurahan memiliki populasi sekitar 298.715 ribu jiwa pada tahun 2025. Berjarak sekitar 10 km dari pusat Kota Sorong. Sampah yang dihasilkan di wilayah ini diperkirakan sekitar 160,4 ton per hari (DLH, 2025) sebagian besar sampah ini dibuang langsung di TPA Makbon. Di Sorong, kendala teknologi dan pola kehidupan masyarakat menjadi masalah utama. Susahnya mengatur masyarakat untuk memilah, membuang sampah dan mengolahnya merupakan hal yang sangat umum terjadi. Selain itu jumlah tempat sampah yang ada masih belum mencukupi.

Karakteristik Sampah

Untuk mengetahui karakteristik sampah, maka dilakukan pengelompokan komposisi sampah. Data primer didapatkan dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Sorong sedangkan data sekunder didapatkan dari SIPSN (2025) dimana data tersebut memiliki hasil yang serupa. Data tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam beberapa kategori seperti sisa makanan, kayu/ranting, plastik, logam, karet, kaca dll. Data komposisi sampah dapat dilihat pada Gambar 1. Hasil analisis menunjukkan bahwa komposisi sampah adalah 11% sampah sisa makanan, 9% sampah kayu/ranting, 21% sampah kertas/karton, 25% sampah plastik, 15% sampah logam, 7% sampah kain, 3% sampah karet/kulit, 7% sampah kaca, dan 2% sampah lainnya (SIPSN, 2025). Berbeda dengan rata-rata komposisi sampah nasional yang didominasi oleh sisa sampah organik, di TPA Makbon sampah didominasi oleh plastik baru diikuti oleh organik dan logam. Tingginya persentase bahan plastik dalam aliran sampah perkotaan menunjukkan tingginya penggunaan wadah sekali pakai dan kantong plastik di area ini. Oleh karena itu, dengan menerapkan skenario *recycle* dan insinerasi diharapkan dapat mengurangi jumlah komposisi sampah yang terbuang di TPA, meminimalisir dampak

lingkungan yang dihasilkan dan jumlah energi saving yang dapat dilakukan.

Skenario Berbeda Dibandingkan Kondisi Eksisting

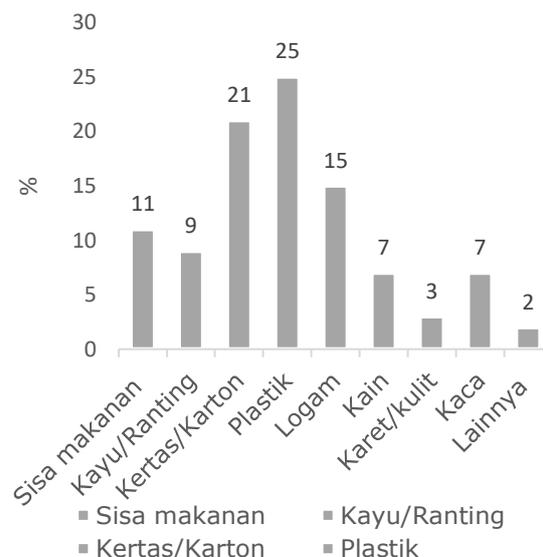
Tabel 1. Skenario strategi penanganan sampah padat kota

Skenario	MSW Strategi
Eksisting	Tidak ada upaya penangan sampah (Eksisting) (100% landfill, 0% insenerasi, 0% recycle)
Skenario 1	50% landfill, 25% insenerasi, 25% recycle
Skenario 2	25% landfill, 50% insenerasi, 25% recycle
Skenario 3	25% landfill, 25% insenerasi, 50% recycle

Tabel 1 menunjukkan skenario strategi penanganan sampah padat perkotaan berdasarkan proporsi metode pengelolaan yang berbeda. Pada kondisi eksisting, seluruh sampah padat kota dibuang ke tempat pembuangan akhir (landfill) tanpa adanya proses insinerasi maupun daur ulang, sehingga mencerminkan pendekatan pengelolaan konvensional dengan risiko lingkungan yang tinggi. Skenario 1 mengusulkan diversifikasi pengelolaan dengan membagi 50% sampah ke landfill, 25% dibakar melalui insinerasi, dan 25% didaur ulang, bertujuan mengurangi beban TPA sekaligus memanfaatkan potensi energi dan material. Skenario 2 meningkatkan proporsi insinerasi menjadi 50%, sementara landfill dan daur ulang masing-masing 25%, menekankan pemanfaatan energi dari sampah. Skenario 3 lebih menekankan pada daur ulang dengan 50% sampah diolah kembali, serta 25% masing-masing ke landfill dan insinerasi, untuk mengurangi limbah akhir dan mendukung ekonomi sirkular. Setiap skenario memberikan alternatif kebijakan yang dapat disesuaikan dengan kapasitas teknologi, biaya, dan tujuan keberlanjutan kota. Tabel 1 mengilustrasikan berbagai skenario pengelolaan sampah padat perkotaan berdasarkan proporsi metode pengolahan yang diterapkan. Kondisi eksisting sepenuhnya mengandalkan landfill, tanpa adanya insinerasi maupun daur ulang, sehingga menimbulkan risiko lingkungan yang tinggi dan menunjukkan pendekatan konvensional. Skenario 1 menerapkan strategi diversifikasi dengan 50% sampah masuk landfill, 25% dibakar melalui insinerasi, dan 25% didaur ulang, bertujuan mengurangi tekanan pada TPA sekaligus memanfaatkan potensi energi dan material.

Skenario 2 menitikberatkan pada insinerasi sebanyak 50%, sementara landfill dan daur ulang masing-masing 25%, untuk memaksimalkan pemanfaatan energi dari sampah. Skenario 3 lebih mengutamakan daur ulang dengan 50% sampah diolah kembali, dan 25% masing-masing ke landfill dan insinerasi, mendukung pengurangan limbah akhir serta pengembangan ekonomi sirkular. Dengan demikian, ketiga skenario menawarkan alternatif kebijakan pengelolaan sampah yang dapat disesuaikan dengan kapasitas teknologi, biaya, dan target keberlanjutan kota, memberikan landasan bagi pengambilan keputusan strategis dalam manajemen sampah perkotaan.

Komposisi Sampah Berdasarkan Jenis Sampah (%)



Gambar 1. Komposisi sampah di TPA Makbon

(sumber : pengamatan dan data SIPSN)

WARM Modeling

WARM Tools adalah perangkat pemodelan yang dikembangkan oleh EPA (Environmental Protection Agency, AS) untuk menghitung emisi gas rumah kaca (GRK) dan energi yang dihemat dari berbagai skenario pengelolaan sampah, misalnya: daur ulang, kompos, insinerasi, landfill, atau sumber lain dengan pendekatan berbasis Life Cycle Assessment (LCA). Model ini membutuhkan data input berupa komposisi masing-masing sampah. Skenario yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan data komposisi sampah yang ada di TPA Makbon, Sorong. Skenario *recycle* hanya mempertimbangkan sampah yang memiliki potensi untuk direcycle. Dengan demikian,

berdasarkan hasil tersebut, strategi yang tepat dalam pengelolaan sampah dapat ditentukan.

Tabel 2. Data Sampah yang masuk ke TPA Makbon

Tahun	Penduduk (jiwa)	Sampah (ton/tahun)
2025	302.452	58.551

Pada Tabel 4, 5, dan 6 di kolom *recycle* tidak terdapat data organik campur dan MSW campur hal ini disebabkan sampah-sampah tersebut tidak dapat direcycle.

Tabel 3. Data Skenario Eksisting

Jenis Sampah	Total Sampah Landfill (Ton/tahun)
Kertas campur	12.295,71
Plastik campur	14.637,75
Metal campur	8.782,65
Gelas	4.098,57
Organik campur	11.710,20
MSW campur	5.927,45

Tabel 4. Data Skenario 1

Jenis Sampah	Recycle (Ton/tahun)	Sampah Landfill (Ton/tahun)	Insenerasi (Ton/tahun)
Kertas campur	3.073,93	6.147,86	3.073,93
Plastik campur	3.659,44	7.318,88	3.659,44
Metal campur	2.195,66	4.391,33	2.195,66
Gelas	1.024,64	2.049,29	1.024,64
Organik campur	NA	8.782,65	2.927,55
MSW campur	NA	4.445,59	1.481,86

Tabel 5. Data Skenario 2

Jenis Sampah	Recycle (Ton/tahun)	Sampah Landfill (Ton/tahun)	Insenerasi (Ton/tahun)
Kertas campur	3.073,93	3.073,93	6.147,86
Plastik campur	3.659,44	3.659,44	7.318,88
Metal campur	2.195,66	2.195,66	4.391,33

Gelas	1.024,64	1.024,64	2.049,29
Organik campur	NA	5.855,10	5.855,10
MSW campur	NA	2.963,73	2.963,73

Tabel 6. Data Skenario 3

Jenis Sampah	Recycle (Ton/tahun)	Sampah Landfill (Ton/tahun)	Insenerasi (Ton/tahun)
Kertas campur	6.147,86	3.073,93	3.073,93
Plastik campur	7.318,88	3.659,44	3.659,44
Metal campur	4.391,33	2.195,66	2.195,66
Gelas	2.049,29	1.024,64	1.024,64
Organik campur	NA	8.782,65	2.927,55
MSW campur	NA	4.445,59	1.481,86

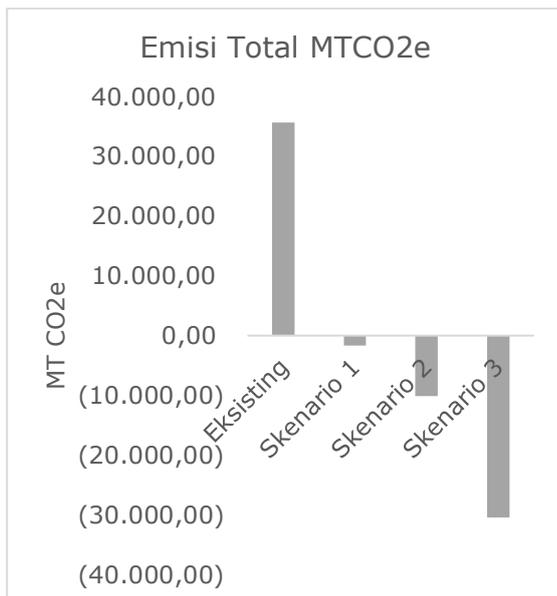
Tabel 4 hingga Tabel 6 menyajikan alokasi pengelolaan sampah berdasarkan tiga skenario strategi kota. Pada Skenario 1, sebagian besar sampah kertas, plastik, metal, dan gelas dibagi secara seimbang antara landfill, daur ulang, dan insinerasi, sedangkan sampah organik dan MSW campur sebagian besar dibuang ke landfill dengan sebagian kecil dibakar. Skenario 2 menekankan insinerasi sebagai metode dominan, di mana volume sampah yang dibakar meningkat dua kali lipat dibandingkan daur ulang dan landfill, sehingga memaksimalkan pemanfaatan energi dari sampah. Skenario 3 menitikberatkan pada daur ulang, terutama untuk sampah kertas, plastik, metal, dan gelas, sementara proporsi landfill dan insinerasi dikurangi, menunjukkan orientasi pada pengurangan limbah akhir dan pengembangan ekonomi sirkular. Perbandingan ketiga skenario menunjukkan pergeseran strategi dari landfill dominan ke insinerasi dan daur ulang sesuai tujuan pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan dan efisien.

3 Hasil dan Diskusi

Hirarki penanganan sampah secara internasional mengutamakan praktis pada *reduce*, *reuse* dan *recycle* (3R) (Couto et al., 2017). Secara umum penerapan 3R membutuhkan beragam keterampilan untuk meminimalisir volume sampah yang dipilah (Jibril et al., 2012). Sebagai contoh, kasus sampah plastik, gelas dan metal penerapan 3R adalah tindakan yang paling mudah

dan efektif untuk mengurangi kadar sampah yang sampai di TPA (Vazquez et al., 2020). Dalam konteks Kota Sorong, memerlukan alternatif metode penanganan sampah kota agar dapat berjalan dengan baik. Berbagai alternatif teknologi dapat digunakan (Chand Malav et al., 2020). WARM Model mampu memberikan perspektif untuk menghitung dampak lingkungan dan penghematan energi yang didapatkan melalui berbagai proses penanganan sampah yang berbeda (Deus et al., 2017). Dampak lingkungan yang ditunjukkan oleh WARM Model berdasarkan pada dampak terhadap pemanasan global sedangkan dampak lain seperti pencemaran tanah, pencemaran air dan sebagainya tidak masuk dalam perhitungan ini.

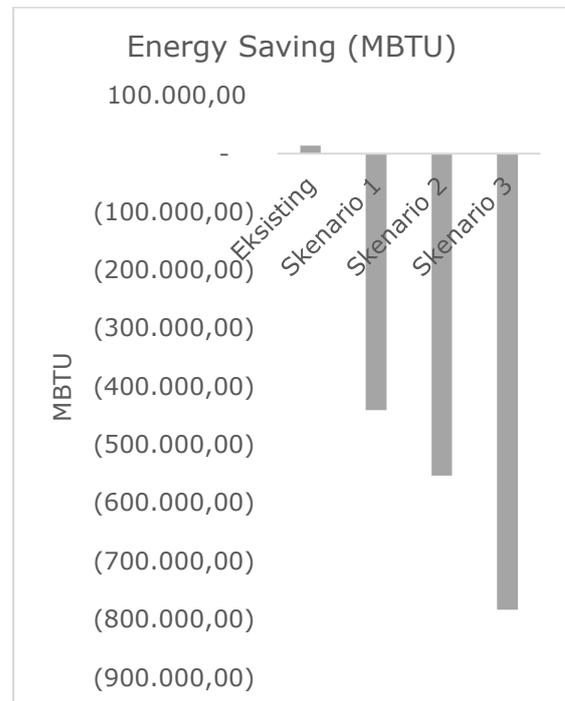
Pada Tabel 3. tampak berbagai komposisi sampah eksisting yang ada di TPA Makbon, Penelitian ini hanya berfokus pada penerapan berbagai skenario penanganan sampah existing dibandingkan dengan skenario 1 (50% landfill, 25% insenerasi, 25% recycle), skenario 2 (25% landfill, 50% insenerasi, 25% recycle). dan skenario 3 (25% landfill, 25% insenerasi, 50% recycle).



Gambar 2. Emisi MTCO₂e masing-masing Skenario

Gambar 2 menunjukkan total emisi gas rumah kaca dalam satuan MTCO₂e untuk berbagai skenario pengelolaan sampah perkotaan. Kondisi eksisting menghasilkan emisi tertinggi, sekitar 35.000 MTCO₂e, karena seluruh sampah dibuang ke landfill tanpa proses insinerasi atau daur ulang. Skenario 1 dan Skenario 2 menunjukkan penurunan emisi yang signifikan, bahkan cenderung negatif, yang menandakan potensi

pengurangan emisi melalui kombinasi insinerasi dan daur ulang. Skenario 3 menghasilkan emisi paling rendah atau negatif terbesar, sekitar -30.000 MTCO₂e, karena menekankan daur ulang dalam jumlah besar, sekaligus mengurangi sampah ke landfill dan insinerasi, sehingga menunjukkan efektivitas strategi pengelolaan sampah berbasis ekonomi sirkular dalam mitigasi perubahan iklim.



Gambar 3. Energy Saving (MBTU) pada Berbagai Skenario

Pada Tabel 3 sampai Tabel 6 menunjukkan komposisi sampah berbagai skenario di penelitian ini. Data yang ada dari tabel tersebut kemudian dimasukkan ke dalam WARM Model sehingga didapatkan data emisi gas rumah kaca (equivalent dengan CO₂) dalam satuan metrik ton (MTCO₂e) dan energi yang digunakan (MBTU) dalam satuan million *British Thermal Unit*. yang terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Pada Gambar 2 menunjukkan hasil perhitungan dengan metode WARM dimana didapatkan hasil 35.649 MTCO₂e untuk TPA Makbon kondisi eksisting, -1.649,74 MTCO₂e untuk skenario 1, -10.146,07 MTCO₂e untuk skenario 2, dan -30.443,37 MTCO₂e untuk skenario 3. Nilai positif menandakan adanya skenario tersebut memberikan dampak buruk ke lingkungan dalam hal ini ekuivalen dengan CO₂. Sedangkan jika bernilai positif berarti upaya yang dilakukan dengan menerapkan skenario 1,2,3 mampu mencegah pencemaran lingkungan yang ekuivalen

dengan CO₂. Terlihat bahwa kondisi eksisting memberikan dampak yang paling tinggi, sedangkan skenario 1,2,3 mencegah pencemaran lingkungan. Hal ini senada dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh (de Medeiros Engelmann et al., 2022) yang menunjukkan landfill memberikan dampak lingkungan terbesar. Skenario 1 (50% landfill, 25% insenerasi, 25% recycle) memberikan dampak nilai yang lebih kecil dibandingkan skenario 2 (25% landfill, 50% insenerasi, 25% recycle) dan 3 (25% landfill, 25% insenerasi, 50% recycle). Hal ini dapat dipahami karena skenario 1 menerapkan 50% sampah dibuang ke landfill sedangkan skenario 2 dan 3 sampah yang dibuang ke landfill lebih sedikit yaitu 25%. Hal ini terjadi salah satunya karena adanya degradasi bahan organik di TPA. Kemudian skema 2 memberikan hasil pencegahan terhadap pencemaran lingkungan dengan nilai yang lebih kecil dari skenario 3, karena skenario 2 melakukan proses insenerasi (50%) dibandingkan skenario 3 (25%). Tampak bahwa dengan pemilihan metode *recycle* lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan insenerasi. Hal ini terjadi karena *recycle* mampu menghindari emisi yang dihasilkan dari proses pengumpulan, transportasi, pencucian, peleburan, dan produksi bahan baku dari awal.

Adapun nilai energi yang dikonsumsi/dihasilkan dari pemilihan berbagai skenario tampak bahwa masing-masing bernilai 13.725,96 ; -441,080,9 ; -553,413,7 ; -783.554,96 MBTU untuk kondisi existing, skenario 1, skenario 2 dan skenario 3. Nilai positif berarti membutuhkan energi, sedangkan nilai negatif berarti menghemat energi. Terlihat bahwa kondisi existing dimana tidak terjadi perlakuan khusus hanya melakukan landfilling membutuhkan energi untuk operasional seperti transportasi, operasional alat berat, dll. Sedangkan pada skenario 1,2 dan 3 tampak menghemat energi. Insenerasi dengan membakar sampah yang ada akan menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan untuk operasional dan dialirkan ke unit lain. Dalam pemilihan metode penanganan sampah yang ekonomis perlu diperhatikan biaya yang harus dikeluarkan. Dalam praktiknya, biaya yang terkait dengan operasional insenerator termasuk tinggi, khususnya pembelian alat dan biaya operasional (Pin et al., 2018). Sedangkan *recycle* memberikan dampak pengurangan energi untuk menghasilkan sampah yang biasanya dimulai dari pembuatan bijih plastik dari minyak bumi hingga transportasinya dan pembuangan sampah. Dalam penelitian ini skenario 3 memberikan hasil terbaik dalam minimalisir dampak buruk pada lingkungan dan

menghasilkan/menghemat energi yang dibutuhkan.

Berdasarkan bank dunia, biaya insenerasi sekitar 40 – 150 US\$/ ton sampah padat jika dikonversikan dalam rupiah saat ini sekitar Rp 660.000 – Rp 2.475.000,- di negara middle income, berbeda jauh dengan biaya untuk landfill yaitu sekitar 15-65 US\$/ ton sampah padat (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012) jika dikonversikan dengan nilai rupiah saat ini sekitar Rp 247.000 – Rp 1.072.500,- Saat ini di Sorong belum menerapkan proses insenerasi sehingga tidak ada data terkait biaya operasional. Adapun biaya operasional berkisar Rp 350.000,-/ton sampah berdasarkan data refrensi (Fadlil, F. Dfinubun, Y. Alim, 2025).

Sehingga landfill merupakan opsi manajemen sampah yang termurah dibanding teknik lainnya namun landfill memiliki dampak negatif karena proses dekomposisi sampah di landfill menghasilkan biogas dan *leachate* (cairan hitam berbau menyengat) (Paladino & Massabò, 2017). Dampak ini dapat dikendalikan/dikurangi dengan cara 1) menggunakan pelapis dasar tak tembus untuk mencegah kontaminasi tanah dan air tanah, 2) IPAL pengolah *leachate*, 3) sumur dan sistem pemipaan untuk menampung gas (Kumar & Samadder, 2017). Normalnya landfill adalah pilihan terakhir karena membutuhkan banyak area yang dekat dengan pemukiman dan dampak yang ditimbulkannya ("Section 2: Waste Management Technologies," 2014). Hal penting lain yang perlu dipertimbangkan adalah perluasan dan meningkatkan upaya *recycle* dalam manajemen sampah.

Bagi banyak peneliti *recycle* merupakan opsi terbaik untuk mengurangi sampah di landfill dan emisi lingkungan (Hassan & Kasmuri, 2019) (Deus et al., 2017)(Hottle et al., 2015) hal ini senada dengan hasil yang didapatkan dalam penelitian ini yaitu skenario 3 (50% plastik direcycle) memberikan dampak paling minimal terhadap lingkungan. Dari Gambar 2, skenario 3 memberikan penurunan sekitar 2 kali lipat jika dibandingkan dengan landfill (kondisi existing). Begitu juga dengan skenario 1,2 dan 3 masing-masing menunjukkan hasil yang sangat signifikan. Hal ini semakin menegaskan bahwa *recycle* memberikan dampak paling baik (pengurangan emisi) dibandingkan metode yang lain.

Hal ini berlaku juga untuk saving energi yang diberikan oleh *recycle* yaitu hingga 80 kali lipat dibandingkan dengan landfill (kondisi existing). Penelitian lain juga menunjukkan hasil yang

senada (Hassan & Kasmuri, 2019). Hasil dari studi terkini menunjukkan pentingnya pemisahan dan recycle sampah yang benar.

Sebagai catatan bahwa WARM hanya digunakan untuk menilai dampak lingkungan khususnya terkait perubahan iklim tidak termasuk dampak pencemaran tanah, air dan kesehatan manusia. Hal ini disebabkan karena beberapa data seperti faktor emisi, data energi dan sistem pengolahan sampah berdasarkan data di Amerika. Meskipun dengan keterbatasan yang ada WARM telah banyak digunakan untuk pengambilan keputusan pemilihan metode teknologi penanganan sampah. Studi – studi sebelumnya menunjukkan potensi penggunaan aplikasi ini. Salah satu dari beberapa studi yang telah dilakukan, model ini digunakan untuk mengevaluasi skenario manajemen pengelolaan sampah di sebuah pulau kecil di pasifik. Hasilnya menunjukkan penggunaan insenerator dan AD adalah yang terbaik dari segi teknis, ekonomi dan lingkungan (Joseph & Prasad, 2020). Studi lain yang dilakukan di Iran, menunjukkan emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi yang lebih rendah dari recycle dibandingkan dengan landfill dan insenerasi ((Mahmoudkhani et al., 2014)). Hasil studi itu juga menguatkan bahwa recycle adalah teknik terbaik dalam mencegah gas emisi rumah kaca dan saving energi diikuti oleh proses insinerasi dan AD. Meskipun parameter yang dikembangkan di software ini berdasarkan basis parameter data yang berasal dari USA, namun hasil yang diberikan masih dapat cukup relevan digunakan. Contohnya seperti yang ada di Brazil (de Medeiros Engelmann et al., 2022), di Iran (Hosseini et al., 2023), dan di Indonesia (Maulidia & Wikaningrum, 2025).

Penggunaan teknologi waste to energi dalam skala kecil sudah banyak dilakukan oleh peneliti, contohnya di Spanyol. Bahkan untuk kota dengan jumlah sampah yang sedikit upaya pemanfaatan energi memberikan keuntungan yang penting dari sudut pandang ekonomi maupun lingkungan (Fernández-González et al., 2017)

Pemerintah telah membuat aturan pengelolaan sampah misalnya Undang-undang No 18 Tahun 2008 tentang pengelolaan sampah, Peraturan Pemerintah No 81 Tahun 2012 tentang pengelolaan sampah rumah tangga dan sejenisnya, dan Peraturan Presiden No 97 tahun 2017 tentang kebijakan dan strategi nasional pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga (Jaktranas) untuk tingkat pusat. Kemudian untuk tingkat daerah Peraturan Daerah No 15 Tahun 2023 tentang

pengelolaan sampah di Kota Sorong dan Instruksi Walikota Sorong No 100.3.4.3/70/2023 berupa arahan mengenai kebersihan lingkungan. Dari berbagai macam aturan yang ada sampai saat ini belum ada aturan yang mengatur tentang ambang batas baku mutu gas rumah kaca di TPA.

Dengan banyaknya aturan terkait pengelolaan sampah yang sudah dibuat oleh pemerintah pusat dan daerah ternyata tidak cukup untuk menangani masalah sampah yang ada. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan program edukasi pemahaman lingkungan yang dilakukan terus menerus secara berkesinambungan agar masyarakat *aware* tentang pentingnya memilah serta *merecycle* sampah sejak awal terbentuknya sampah. Insentif untuk program pemberdayaan dan pengelolaan sampah sejak awal terbentuknya juga penting sebagai alat untuk mengurangi dampak lingkungan yang diakibatkan oleh sampah. Hal lain yang perlu dilakukan oleh pemerintah adalah memperbaiki keakuratan data yang ada agar dapat memberikan keputusan yang tepat dalam memilih teknologi untuk pengelolaan sampah. selain itu pihak swasta juga perlu dilibatkan dalam penyelesaian masalah sampah yang ada (Deus et al., 2017)

4 Kesimpulan

Dengan pengembangan teknologi yang semakin maju dan tantangan permasalahan lingkungan yang semakin kompleks maka pemangku kepentingan seperti pemerintah daerah perlu mempertimbangkan kembali dan mengevaluasi penerapan teknologi dan praktik yang telah dilaksanakan dalam pengelolaan sampah yang ada. Yaitu dengan cara mengkombinasikan metode pengelolaan sampah seperti recycle dan insenerasi pada lahan landfill TPA. Penelitian ini menunjukkan bahwa upaya penanganan sampah yang terbaik dari segi aspek lingkungan dan energi saving adalah dengan menggunakan skenario 3 (25% landfill, 25% insenerasi, 50% recycle). Harapannya Pemerintah Kota Sorong dan DLH dapat menggunakan sebagai rujukan kebijakan penanganan sampah.

5 Referensi

- Castigliero, J. R., Pollack, A., Cleveland, C. J., & Walsh, M. J. (2021). Evaluating emissions reductions from zero waste strategies under dynamic conditions: A case study from Boston. *Waste Management*, 126, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.026>
- Chand Malav, L., Yadav, K. K., Gupta, N., Kumar,

- S., Sharma, G. K., Krishnan, S., Reznia, S., Kamyab, H., Pham, Q. B., Yadav, S., Bhattacharyya, S., Yadav, V. K., & Bach, Q. V. (2020). A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123227>
- Couto, N., Silva, V., Cardoso, J., & Rouboa, A. (2017). 2nd law analysis of Portuguese municipal solid waste gasification using CO₂/air mixtures. *Journal of CO₂ Utilization*, 20(January), 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.06.001>
- de Medeiros Engelmann, P., dos Santos, V. H. J. M., da Rocha, P. R., dos Santos, G. H. A., Lourega, R. V., de Lima, J. E. A., & Pires, M. J. R. (2022). Analysis of solid waste management scenarios using the WARM model: Case study. *Journal of Cleaner Production*, 345(January). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130687>
- Deus, R. M., Battistelle, R. A. G., & Silva, G. H. R. (2017). Current and future environmental impact of household solid waste management scenarios for a region of Brazil: carbon dioxide and energy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 155, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.158>
- Fadlil, F. Difinubun, Y. Alim, A. L. G. Y. (2025). *Potensi emisi gas metana (ch 4) dari kegiatan landfilling di tpa makbon sorong dengan pemodelan landgem.*
- Fadlil, F., Rahman, A. A., Goa, Y. La, & Diffinubun, Y. (2025). *Study Awal Pengelolaan Food Waste terhadap Global Warming (Pemanasan Global) di Kota Sorong.* 5(1).
- Fernández-González, J. M., Grindlay, A. L., Serrano-Bernardo, F., Rodríguez-Rojas, M. I., & Zamorano, M. (2017). Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. *Waste Management*, 67, 360–374. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003>
- Garcia, A. R., Filipe, S. B., Fernandes, C., Estevão, C., & Ramos, G. (2010). *Municipal Waste Management Report : Status-quo and Issues in Southeast and East Asian Countries.*
- Hassan, M. H. H. A., & Kasmuri, N. (2019). Assessment of CO₂ Emission and Energy Reduction on Solid Waste in Jeram Landfill Using Warm Analysis. *International Journal of Integrated Engineering*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:164340946>
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). A Global Review of Solid Waste Management. *World Bank Urban Development Series Knowledge Papers*, January 2012, 1–116. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>
- Hosseini, S. M., Mehrdadi, N., & Hosseini, S. A. (2023). Evaluation of integrated waste management by using of Waste Reduction Model (WARM)- (Case study of Amol-Noor region, Iran). *Journal of Civil Engineering Researchers*, 5(3), 15–23. <https://doi.org/10.61186/jcer.5.3.15>
- Hottle, T. A., Bilec, M. M., Brown, N. R., & Landis, A. E. (2015). Toward zero waste: Composting and recycling for sustainable venue based events. *Waste Management*, 38(1), 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.019>
- Jibril, J. D. azimi, Sipan, I. Bin, Sapri, M., Shika, S. A., Isa, M., & Abdullah, S. (2012). 3R s Critical Success Factor in Solid Waste Management System for Higher Educational Institutions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 65(ICIBSoS), 626–631. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.11.175>
- Joseph, L. P., & Prasad, R. (2020). Assessing the sustainable municipal solid waste (MSW) to electricity generation potentials in selected Pacific Small Island Developing States (PSIDS). *Journal of Cleaner Production*, 248, 119222. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119222>
- Kayakutlu, G., Daim, T. U., Kunt, M., Altay, A., & Suharto, Y. (2017). Scenarios for regional waste management. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 74, 1323–1335. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113830675>
- Kebijakan, P. T. (2017). *Kebijakan-Dan-Strategi-Daerah-Pengelolaan-Sampah-Rumah-Tangga-Dan-Sampah-Sejenis-Sampah-Rumah-Tangga27.Pdf.*
- Klavenieks, K., Dzene, K. P., & Blumberga, D. (2017). Optimal strategies for municipal solid waste treatment - Environmental and socio-economic criteria assessment. *Energy Procedia*, 128, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.071>
- Knickmeyer, D. (2020). Social factors influencing household waste separation: A literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas.

- Journal of Cleaner Production*, 245, 118605.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118605>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407–422.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Maghmoumi, A., Marashi, F., & Houshfar, E. (2020). Environmental and economic assessment of sustainable municipal solid waste management strategies in Iran. *Sustainable Cities and Society*, 59(August 2019), 102161.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102161>
- Mahmoudkhani, R., Valizadeh, B., & Khastoo, H. (2014). Greenhouse Gases Life Cycle Assessment (GHGLCA) as a decision support tool for Municipal Solid waste management in Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 1–7.
<https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-71>
- Maity, D. S. K. (2018). Importance of Municipal Solid Waste Management. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(5), 361–363.
<https://doi.org/10.22161/ijaers.5.5.49>
- Malik, S., Heremba, S., Goa, Y. La, Fadlil, F., Studi, P., Kimia, T., Pendidikan, U., Sorong, M., Studi, P., Kimia, T., Pendidikan, U., Sorong, M., Studi, P., Kimia, T., Pendidikan, U., Sorong, M., Studi, P., Kimia, T., Pendidikan, U., & Sorong, M. (2023). *Pemanfaatan Limbah Tulang Ikan Layaran (Istiophorus platypterus) Sebagai Adsorben Pada Pemurnian Minyak Goreng Bekas Indonesia adalah Negara kepulauan yang memiliki potensi*. 3(2), 6–10.
- Maulidia, A. G., & Wikaningrum, T. (2025). Greenhouse gas emission calculation and energy impact of TPS3R flamboyan using waste reduction model (WARM) V.15: Implications for disaster risk reduction. *ASEAN Natural Disaster Mitigation and Education Journal*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:276073734>
- Paladino, O., & Massabò, M. (2017). Health risk assessment as an approach to manage an old landfill and to propose integrated solid waste treatment: A case study in Italy. *Waste Management*, 68, 344–354.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.021>
- Pin, B. V. R., Barros, R. M., Silva Lora, E. E., & dos Santos, I. F. S. (2018). Waste management studies in a Brazilian microregion: GHG emissions balance and LFG energy project economic feasibility analysis. *Energy Strategy Reviews*, 19, 31–43.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.11.002>
- Section 2: Waste Management Technologies. (2014). *Solid Wastes Management*, 16–100.
<https://doi.org/10.1002/9781118863923.ch2>
- Ugwu, C. O., Ozoegwu, C. G., Ozor, P. A., Agwu, N., & Mbohwa, C. (2021). Waste reduction and utilization strategies to improve municipal solid waste management on Nigerian campuses. *Fuel Communications*, 9, 100025.
<https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100025>
- Vazquez, Y. V., Barragán, F., Castillo, L. A., & Barbosa, S. E. (2020). Analysis of the relationship between the amount and type of MSW and population socioeconomic level: Bahía Blanca case study, Argentina. *Heliyon*, 6(6).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04343>
- Zaman, A. U. (2014). Identification of key assessment indicators of the zero waste management systems. *Ecological Indicators*, 36, 682–693.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.024>
- Zoë Lenkiewicz. (2024). *Beyond an age of waste*.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>