

Perencanaan Rekayasa TPST 3R Berbasis Neraca Massa untuk Pengembangan Bertahap di Wilayah Semi-Perdesaan

Samin^{*1}, Lourina Evanale Orfa², Bela Tania³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia
Email: ¹samin@umm.ac.id; ²lourinaorfa@umm.ac.id; ³bela@gmail.com

Abstrak

Keterbatasan infrastruktur pengolahan sampah pada wilayah semi-perdesaan dapat meningkatkan risiko pembuangan tidak terkendali dan pembakaran sampah rumah tangga. Penelitian ini bertujuan merencanakan Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu berbasis reduce, reuse, recycle (TPST 3R) dengan mengintegrasikan karakteristik sampah, proyeksi penduduk, neraca massa, faktor pemulihan, kapasitas pengolahan, kebutuhan ruang, dan pembangunan bertahap. Pengukuran timbulan dan komposisi dilakukan selama delapan hari berturut-turut pada 35 rumah mengacu SNI 19-3964-1994. Timbulan terukur sebesar 0,55 kg/orang/hari atau 3,17 L/orang/hari dengan densitas 173,58 kg/m³. Fraksi organik mendominasi sebesar 44,33%, diikuti karton 8,48%, kaca 7,87%, residu 7,76%, kertas 5,00%, dan fraksi lainnya. Timbulan total diproyeksikan 21,73 ton/hari pada 2027 dan 30,44 ton/hari pada 2032. Pada skenario peningkatan cakupan pelayanan, kebutuhan lahan meningkat dari 1.093 m² menjadi 1.428 m², dengan loading rate 3.715,86 kg/jam pada 2027 dan 3.758,33 kg/jam pada 2032. Estimasi biaya konstruksi tahap awal sebesar Rp1,925 miliar dan ekspansi Rp611,04 juta berdasarkan HSPK Jawa Timur 2022. Pendekatan neraca massa menghubungkan karakteristik sampah dengan kapasitas, zonasi ruang, dan tahapan investasi sehingga mendukung perencanaan TPST 3R yang lebih adaptif.

Kata kunci: ekonomi sirkular, neraca massa, pemulihan material, timbulan sampah, TPST 3R

Abstract

Limited waste-processing infrastructure in semi-rural areas may increase uncontrolled disposal and open burning of household waste. This study aims to plan a reduce-reuse-recycle integrated waste treatment facility (TPST 3R) by integrating waste characteristics, population projection, mass balance, recovery factors, processing capacity, spatial requirements, and phased development. Waste generation and composition were measured for eight consecutive days in 35 households following SNI 19-3964-1994. The measured generation rate was 0.55 kg/capita/day or 3.17 L/capita/day, with a density of 173.58 kg/m³. Organic waste dominated at 44.33%, followed by cardboard at 8.48%, glass at 7.87%, residual waste at 7.76%, paper at 5.00%, and other fractions. Total waste generation was projected at 21.73 t/day in 2027 and 30.44 t/day in 2032. Under a gradual service-coverage scenario, the required facility area increased from 1,093 m² to 1,428 m², with loading rates of 3,715.86 kg/h in 2027 and 3,758.33 kg/h in 2032. Initial construction was estimated at IDR 1.925 billion and expansion at IDR 611.04 million based on the 2022 East Java unit-price standard. Mass-balance analysis links waste characteristics with capacity, functional zoning, and staged investment, thereby supporting more adaptive TPST 3R planning.

Keywords: circular economy, mass balance, material recovery, TPST 3R, waste generation

1. PENDAHULUAN

Urgensi pergeseran dari pembuangan menuju pemulihan sumber daya juga ditekankan dalam laporan Global Waste Management Outlook 2024 (United Nations Environment Programme, 2024). Pengembangan fasilitas 3R juga relevan dengan arah kebijakan dan strategi nasional pengelolaan sampah rumah tangga (Pemerintah Republik Indonesia, 2017). Pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga selanjutnya diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 (Pemerintah Republik Indonesia, 2012). Secara normatif, pengurangan dan penanganan sampah menjadi bagian dari kerangka pengelolaan sampah nasional sebagaimana diatur dalam Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 (Pemerintah Republik Indonesia, 2008). Kebutuhan penguatan pengelolaan sampah perkotaan dan wilayah berkembang juga tercermin dalam proyeksi global timbulan sampah dan tantangan pembiayaannya (Kaza et al., 2018).

Kajian mutakhir menunjukkan bahwa keberhasilan fasilitas pengolahan sampah tidak hanya ditentukan oleh kapasitas bangunan, tetapi juga oleh kecocokan teknologi dengan karakteristik material dan kemampuan operasional. Rifai et al. (2024) menelaah pengurangan sampah di TPS-3R Janti Berseri melalui keterlibatan masyarakat dan analisis neraca massa. Penelitian tersebut menegaskan pentingnya pemilahan dari sumber untuk meningkatkan potensi pengurangan residu. Dalam konteks Ampelgading, pemilahan di sumber belum dapat dianggap telah terlaksana; oleh karena itu, tingkat pemulihan harus dibaca sebagai asumsi perencanaan dan bukan hasil operasi fasilitas.

Perspektif ekonomi menambah dimensi penting bagi perencanaan fasilitas skala komunitas. Penelitian techno-economic di Kabupaten Sleman memperlihatkan bahwa skala dan kondisi operasi perlu dievaluasi bersama ketika menilai keberlanjutan fasilitas pengolahan antara (Rifai et al., 2024). Penelitian di Jawa Barat juga membahas sistem pemulihan plastik yang mempertimbangkan pendapatan dan residu, sehingga memperjelas bahwa rancangan fisik harus diikuti kepastian aliran material dan pemasaran (Purnomo et al., 2024). Karena itu, pembangunan bertahap dalam artikel ini diposisikan sebagai strategi pengaturan kapasitas dan investasi awal, bukan bukti bahwa fasilitas pasti menguntungkan.

Di wilayah Malang dan sekitarnya, isu tata kelola tetap relevan. Arif et al. (2024) membahas model kolaborasi pentahelix dalam pengelolaan TPS 3R di Kota Malang, sedangkan Anggraeni (2025) menelaah keterkaitan kebijakan partisipatif dengan ekonomi sirkular. Kedua perspektif tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan desain teknis perlu ditempatkan dalam sistem layanan yang melibatkan pemerintah, pengelola, masyarakat, dan pasar daur ulang. Artikel ini berfokus pada komponen perencanaan rekayasa dan tidak mengklaim telah mengukur kinerja kolaborasi kelembagaan.

Kajian perencanaan di Kabupaten Malang juga tersedia, misalnya Aprilia et al. (2024) mengenai alternatif TPS 3R berbasis masyarakat di Desa Pandansari Lor. Perbedaan utama penelitian ini terletak pada penekanan hubungan terstruktur antara komposisi, neraca massa, kapasitas per jam, kebutuhan ruang, dan fase investasi. Posisi kontribusi tersebut penting untuk menghindari klaim kebaruan yang berlebihan: penerapan TPS 3R dan neraca massa bukan konsep baru, sedangkan penggabungannya sebagai dasar keputusan pembangunan dua tahap pada lokasi studi merupakan kontribusi kontekstual penelitian.

Pengelolaan sampah merupakan bagian penting dari infrastruktur lingkungan karena berkaitan dengan kesehatan masyarakat, kualitas air dan tanah, emisi, penggunaan lahan, serta keberlanjutan pelayanan publik. Paradigma yang hanya menekankan pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan akhir semakin tidak memadai ketika timbunan meningkat dan kapasitas tempat pemrosesan akhir terbatas. Dalam kerangka ekonomi sirkular, sampah dipandang sebagai aliran material yang sebagian nilainya dapat dipertahankan melalui pencegahan, penggunaan kembali, daur ulang, pengomposan, dan pemulihan sumber daya. Transisi tersebut membutuhkan kombinasi infrastruktur, pemilahan di sumber, tata kelola, pasar material, pembiayaan, dan partisipasi masyarakat (Kurniawan et al., 2021; Budihardjo et al., 2022; Wikurendra et al., 2024).

Fasilitas pengolahan antara seperti TPS 3R atau TPST mempunyai posisi strategis karena dapat mengurangi aliran sampah yang langsung menuju tempat pemrosesan akhir. Pada tingkat komunitas, fasilitas pemulihan material berpotensi meningkatkan pemanfaatan fraksi bernilai, mendorong pemilahan, dan mengurangi residu. Namun, keberadaan fasilitas tidak otomatis menjamin kinerja. Skala layanan, biaya pengolahan, keterhubungan dengan pasar produk, kesinambungan operasi, dan partisipasi masyarakat memengaruhi keberhasilan sistem (Budihardjo et al., 2022). Oleh sebab itu, desain fisik perlu didasarkan pada karakteristik aktual sampah dan kapasitas layanan yang realistis.

Kecamatan Ampelgading, Kabupaten Malang, merupakan wilayah yang membutuhkan penguatan infrastruktur persampahan. Penelitian awal menunjukkan belum tersedianya fasilitas pengolahan yang memadai dan masih ditemukannya praktik pembuangan ke sungai atau pembakaran. Kondisi tersebut memperlihatkan kesenjangan antara timbunan yang dihasilkan masyarakat dan kapasitas pengelolaan. Perencanaan fasilitas perlu dimulai dari bukti lokal mengenai besarnya timbunan, densitas, komposisi, serta perubahan kebutuhan akibat pertumbuhan penduduk dan peningkatan cakupan pelayanan.

Perencanaan fasilitas persampahan sering berhenti pada perhitungan timbunan atau dimensi bangunan. Padahal, keputusan mengenai area penerimaan, pemilahan, pengolahan organik, penyimpanan material, residu, dan investasi merupakan konsekuensi dari aliran massa yang saling

terkait. Pendekatan neraca massa memungkinkan setiap fraksi ditelusuri sejak masuk ke fasilitas, bagian yang dapat dipulihkan atau diolah, hingga residu yang harus ditangani lebih lanjut.

Penelitian ini menawarkan integrasi karakterisasi sampah rumah tangga dengan neraca massa dan pengembangan bertahap TPST 3R pada konteks semi-perdesaan. Kebaruan penelitian bukan berupa teknologi pengolahan baru, melainkan kerangka perencanaan yang menghubungkan timbulan dan komposisi dengan recovery factor, loading rate, kebutuhan ruang, dan kebutuhan investasi. Tujuan penelitian adalah mengukur karakteristik sampah rumah tangga, memproyeksikan timbulan, menyusun neraca massa sesuai skenario pelayanan, menentukan kapasitas dan kebutuhan ruang TPST 3R pada dua tahap pengembangan, serta mengestimasi biaya konstruksi.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian dan Lokasi

Unit analisis utama adalah aliran sampah rumah tangga yang berpotensi memasuki fasilitas pada horizon perencanaan 2027 dan 2032. Hasil pengukuran lapangan diperlakukan sebagai parameter dasar; hasil proyeksi dan rancangan adalah keluaran model perencanaan. Perbedaan ini diperlukan agar pembaca tidak menganggap besaran masa depan sebagai hasil pengamatan langsung. Perencanaan tidak menguji pengaruh perlakuan terhadap sampah maupun membandingkan dua fasilitas yang telah beroperasi.

Tahapan analisis disusun secara berurutan: menetapkan populasi dan parameter timbulan, menghitung komposisi serta densitas, menetapkan skenario pelayanan, mengalokasikan aliran material menggunakan faktor pemulihan, mengonversi beban harian ke kapasitas pengolahan, menentukan luas fungsi ruang, dan mengestimasi biaya konstruksi. Pendekatan tersebut sejalan dengan pemikiran material flow analysis yang juga digunakan Putra dan Bagastyo (2026) untuk menilai kombinasi fasilitas pemulihan material dan pengolahan lanjutan di kota kecil. Meskipun demikian, penelitian ini tidak menerapkan perangkat lunak material flow analysis khusus.

Penelitian menggunakan pendekatan perencanaan rekayasa berbasis data lapangan di Kecamatan Ampelgading, Kabupaten Malang. Analisis meliputi proyeksi penduduk, pengukuran timbulan dan komposisi, densitas, proyeksi timbulan, tingkat pelayanan, recovery factor, neraca massa, loading rate, kebutuhan ruang, rancangan fungsi fasilitas, dan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Analisis kelayakan finansial operasi, kebutuhan armada pengangkutan menuju TPST, nilai ekonomi material, emisi siklus hidup, dan sampah non-rumah-tangga tidak tersedia dalam data penelitian asli sehingga tidak direkonstruksi.

2.2. Proyeksi Penduduk

Data penduduk 2016-2020 dianalisis menggunakan metode aritmatik, geometrik, dan least square. Pemilihan metode didasarkan pada koefisien korelasi terhadap data historis. Nilai korelasi yang diperoleh masing-masing 0,790; 0,790; dan 1,000 sehingga metode least square digunakan. Proyeksi menghasilkan jumlah penduduk 60.805 jiwa pada 2027 dan 61.500 jiwa pada 2032.

2.3. Sampling dan Karakterisasi Sampah

Metode pengambilan dan pengukuran contoh timbulan serta komposisi sampah merujuk pada standar nasional yang berlaku untuk kegiatan karakterisasi sampah perkotaan (Badan Standardisasi Nasional, 1994). SNI 19-3983-1995 digunakan sebagai rujukan pembandingan spesifikasi timbulan sampah untuk kota kecil dan sedang, bukan pengganti data lapangan penelitian ini (Badan Standardisasi Nasional, 1995).

Pengelompokan rumah menurut tipe bangunan digunakan untuk menggambarkan variasi kondisi permukiman pada sampel yang tersedia. Akan tetapi, dokumen sumber tidak menyediakan probabilitas pemilihan rumah, distribusi populasi pada tiap kategori, atau galat sampling. Karena itu, hasil rata-rata lebih tepat digunakan sebagai masukan desain awal daripada sebagai estimasi representatif seluruh kecamatan dengan interval kepercayaan tertentu. Pengukuran selama delapan hari memberikan

gambaran jangka pendek, sedangkan variasi musiman, hari besar, dan perubahan pola konsumsi belum tercakup.

Pengukuran komposisi merupakan langkah penting karena teknologi pengolahan bergantung pada karakter material. Wahyono et al. (2022) menunjukkan penggunaan karakterisasi sampah perkotaan untuk menilai kesesuaian bahan baku pengolahan energi di Jakarta. Dalam penelitian ini, tujuan karakterisasi berbeda, yakni memilih proporsi ruang untuk pengolahan biologis dan pemulihan material. Data karakterisasi juga tidak boleh langsung diartikan sebagai jumlah material yang dapat dijual, sebab kontaminasi, kelembapan, dan kualitas pemilahan dapat menurunkan hasil aktual.

Pengambilan sampel dilakukan selama delapan hari berturut-turut mengacu pada SNI 19-3964-1994. Sampel berasal dari 35 rumah, terdiri atas 9 rumah permanen, 10 rumah semi permanen, dan 16 rumah nonpermanen. Jumlah jiwa sampel dihitung dengan Persamaan (1), sedangkan jumlah keluarga diamati menggunakan Persamaan (2).

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

$$K = S / N \quad (2)$$

Pada Persamaan (1), S adalah jumlah sampel (jiwa), Cd adalah koefisien perumahan, dan Ps adalah populasi (jiwa). Pada Persamaan (2), K adalah jumlah sampel keluarga dan N adalah jumlah jiwa per keluarga. Sampah ditimbang, volumenya diukur, kemudian dipilah menjadi fraksi organik, plastik, kantong plastik, kertas, karton, aluminium, logam/besi, tekstil, karet, botol/gelas plastik, kaca, Styrofoam, dan residu.

2.4. Timbulan, Densitas, dan Neraca Massa

Penggunaan timbulan, komposisi, dan neraca massa sebagai dasar rancangan mengikuti prinsip rekayasa sistem pengelolaan sampah terpadu (Tchobanoglous et al., 1993). Secara konseptual, keseimbangan massa menuntut massa masuk sama dengan penjumlahan seluruh massa keluar dan perubahan stok dalam batas sistem yang didefinisikan. Untuk perencanaan kondisi tunak sederhana, keluaran dapat dikelompokkan menjadi bahan organik menuju proses biologis, material daur ulang, dan residu. Pada pengomposan, kehilangan massa sebagai uap air dan gas perlu diperhitungkan apabila neraca diperluas sampai keluaran produk kompos. Penelitian ini belum menyediakan pengukuran susut massa tersebut, sehingga neraca yang dijelaskan dibatasi pada alokasi aliran awal berdasarkan komposisi dan asumsi recovery factor.

Analisis sensitivitas direkomendasikan pada desain rinci untuk memeriksa perubahan kebutuhan ruang ketika pemilahan di sumber rendah, proporsi organik berubah, atau faktor pemulihan menurun. Evaluasi teknologi di negara berkembang menunjukkan bahwa keputusan fasilitas harus mempertimbangkan beberapa kriteria keberlanjutan, bukan hanya kapasitas pengolahan (Le et al., 2023). Dalam penelitian ini, sensitivitas kuantitatif belum dihitung karena nilai faktor pemulihan per fraksi tidak tersedia lengkap pada naskah sumber.

Timbulan gravimetrik dinyatakan dalam kg/orang/hari dan timbulan volumetrik dalam L/orang/hari. Densitas dihitung sebagai massa sampah per volume. Proyeksi timbulan total diperoleh dari parameter timbulan dan populasi proyeksi. Penelitian merencanakan peningkatan tingkat pelayanan sebesar 5 poin persentase per tahun. Neraca massa menelusuri material masuk, material yang dapat dipulihkan atau diolah, dan residu. Untuk fraksi ke- i , massa yang dipulihkan dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$M_{r,i} = M_i \times RF_i \quad (3)$$

$M_{r,i}$ adalah massa pulih fraksi ke- i , M_i adalah massa fraksi ke- i yang masuk, dan RF_i adalah recovery factor. Nilai recovery factor mengikuti parameter teknis pada perencanaan awal dan diperlakukan sebagai asumsi desain, bukan efisiensi operasi yang telah tervalidasi.

2.5. Loading Rate, Kebutuhan Ruang, dan RAB

Penetapan kapasitas unit proses dan kebutuhan ruang merupakan bagian dari prinsip perencanaan teknis fasilitas pengelolaan sampah (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Pembagian ruang penerimaan, pemilahan, pengolahan, dan penyimpanan juga mengacu pada pedoman penyelenggaraan TPS 3R berbasis masyarakat (Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2014). Rancangan operasional dan pembagian fungsi fasilitas mempertimbangkan prinsip teknik operasional pengelolaan sampah perkotaan yang tercantum dalam SNI 19-2454-2002 (Badan Standardisasi Nasional, 2002).

Kapasitas per jam perlu dibedakan dari kapasitas harian dan kapasitas puncak. Jika sampah datang dalam waktu singkat, fasilitas penerimaan mungkin memerlukan area penyangga meskipun kapasitas proses rata-rata secara teoritis memadai. Oleh sebab itu, penetapan jam operasi, antrean kendaraan, kapasitas peralatan, waktu tinggal bahan, serta pemisahan jalur pekerja dan kendaraan harus menjadi bagian dari detail engineering design. Evaluasi operasional TPS 3R di Bandung memperlihatkan relevansi penilaian kinerja fasilitas yang telah beroperasi sebagai masukan bagi penyempurnaan perencanaan (Permatasari & Setyanto, 2025).

RAB tahap perencanaan hanya mencakup pekerjaan yang tercatat dalam estimasi konstruksi sumber. Biaya investasi awal tidak setara dengan total cost of ownership karena belum termasuk komponen operasi dan pemeliharaan, penggantian alat, pengolahan residu, dan pendapatan produk. Perbandingan biaya antartahun juga tidak boleh menggunakan nominal HSPK 2022 tanpa pembaruan indeks harga atau survei harga satuan. Prinsip ini selaras dengan studi yang mengintegrasikan kelayakan ekonomi dan penilaian lingkungan pada sistem pengolahan berbasis komunitas (Utomo et al., 2025).

Loading rate dihitung dari massa sampah yang diproses per hari dibagi waktu proses harian sebagaimana Persamaan (4).

$$\text{Loading rate} = \text{berat sampah (ton/hari)} / \text{waktu proses (jam/hari)} \quad (4)$$

Kebutuhan ruang disusun untuk area penerimaan dan pemilahan, pencacahan, komposting, pematangan kompos, pengayakan, penyimpanan kompos, barang lapak, kantor, gudang, toilet, dan parkir. Pengembangan dibagi menjadi tahap 2027 dan 2032. RAB dihitung dari gambar kerja dan volume pekerjaan menggunakan HSPK Jawa Timur Tahun 2022. Nilai biaya tidak dieskalasi ke harga tahun berjalan sehingga digunakan sebagai estimasi pada basis harga tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Timbulan dan Komposisi Sampah

Dominasi fraksi organik sebesar 44,33% memiliki konsekuensi langsung pada desain. Sampah organik berpotensi menimbulkan bau, lindi lokal, dan ketidaknyamanan jika tertahan terlalu lama sebelum diolah. Dengan demikian, pengaturan waktu penerimaan, penutup area proses, pengendalian air limpasan, drainase, dan kebersihan lantai perlu menjadi pertimbangan desain lanjutan. Hibino et al. (2023) mengevaluasi pengomposan terdesentralisasi di Bandung dan menunjukkan pentingnya penilaian kinerja lingkungan serta ekonomi ketika proses biologis diterapkan pada skala komunitas. Kajian Yang et al. (2023) mengenai teknologi pengomposan fraksi organik juga menegaskan bahwa parameter proses perlu dibedakan dari sekadar proporsi bahan baku.

Persentase komposisi pada Tabel 1 menggambarkan campuran sampah saat pengukuran, bukan hasil pemulihan. Sebagai contoh, keberadaan kaca dan karton dalam jumlah relatif besar dapat meningkatkan potensi pemilahan, tetapi volume aktual yang berhasil dijual bergantung pada kebersihan, kerusakan, harga, dan mitra penyerapan. Oleh karena itu, potensi material tidak dihitung sebagai pendapatan tanpa bukti transaksi. Penelitian Purnomo et al. (2024) mengenai pemulihan plastik menyoroti perlunya memadukan target pengurangan residu dengan kelayakan sistem penjualan material.

Pengukuran selama delapan hari menghasilkan massa sampel rata-rata 57,6 kg/hari dan timbulan spesifik 0,55 kg/orang/hari. Densitas rata-rata sebesar 173,58 kg/m³ sehingga timbulan volumetrik diperoleh 3,17 L/orang/hari. Parameter lokal ini penting karena kapasitas fasilitas hilir sangat

dipengaruhi massa dan volume aktual yang harus ditangani. Pengukuran berurutan selama delapan hari membantu menangkap variasi mingguan, meskipun belum merepresentasikan variasi musiman.

Fraksi organik merupakan komponen terbesar sebesar 44,33%. Komposisi lengkap dan implikasi proses disajikan pada Tabel 1. Dominasi organik memberikan dasar teknis bagi penyediaan area komposting yang relatif besar. Sementara itu, karton, kertas, plastik, logam, aluminium, dan kaca memerlukan pemilahan serta penyimpanan terpisah. Studi fasilitas pemulihan material berbasis komunitas menunjukkan bahwa pemulihan material dapat mendukung nilai ekonomi sistem, tetapi kinerja juga dipengaruhi dukungan pemerintah, kepercayaan masyarakat, dan hubungan dengan pasar (Budihardjo et al., 2022).

Tabel 1. Komposisi Sampah Rumah Tangga dan Implikasi Proses

Fraksi	Komposisi (%)	Implikasi proses
Organik	44,33	Komposting
Karton	8,48	Pemulihan material
Kaca	7,87	Pemulihan material
Residu	7,76	Pengelolaan residu
Kertas	5,00	Pemulihan material
Botol/gelas plastik	4,88	Pemulihan material
Plastik	4,58	Pemulihan material
Tekstil	3,27	Pemilahan
Logam/besi	3,22	Pemulihan material
Kantong plastik	3,21	Pemilahan
Aluminium	2,96	Pemulihan material
Karet	2,43	Pemilahan
Styrofoam	2,02	Residu/penyaluran

3.2. Proyeksi Timbulan dan Pembangunan Bertahap

Terdapat isu konsistensi yang penting pada angka proyeksi. Dengan asumsi timbulan spesifik tetap 0,55 kg/orang/hari, populasi 60.805 jiwa menghasilkan sekitar 33,44 ton/hari, sedangkan 61.500 jiwa menghasilkan sekitar 33,83 ton/hari. Hasil perhitungan langsung ini berbeda dari angka 21,73 ton/hari dan 30,44 ton/hari yang tercantum pada rancangan sumber. Perbedaan mungkin berkaitan dengan cakupan pelayanan, perubahan asumsi timbulan, atau definisi massa yang diproses, tetapi dokumen yang tersedia belum menunjukkan rekonsiliasi lengkap. Karena itu, angka sumber tetap dilaporkan sebagai skenario perencanaan, bukan diklaim sebagai hasil perkalian langsung penduduk dan timbulan spesifik.

Kesenjangan ini merupakan prioritas validasi sebelum fasilitas dibangun. Tim perencana perlu menyusun tabel tahunan yang menampilkan populasi, laju timbulan per kapita, persentase cakupan, fraksi yang masuk fasilitas, hari operasi, dan hasil akhir dalam ton/hari. Tanpa tabel tersebut, pembaca sulit menelusuri mengapa kenaikan populasi yang relatif kecil disertai kenaikan timbulan fasilitas yang jauh lebih besar. Transparansi asumsi merupakan prasyarat agar pengembangan bertahap dapat diuji ulang ketika data baru tersedia.

Metode least square menghasilkan proyeksi penduduk 60.805 jiwa pada 2027 dan 61.500 jiwa pada 2032. Berdasarkan hasil perencanaan awal, timbulan total diproyeksikan 21,73 ton/hari pada 2027 dan 30,44 ton/hari pada 2032. Angka proyeksi tersebut dipertahankan sesuai hasil penelitian sumber. Sebelum tahap desain detail, hubungan antara populasi, timbulan per kapita, tingkat pelayanan, dan tonase fasilitas perlu diverifikasi kembali menggunakan data terbaru.

Pengembangan bertahap memberi fleksibilitas untuk menyelaraskan kapasitas fasilitas dengan peningkatan cakupan pelayanan. Strategi ini dapat menekan risiko pembangunan kapasitas besar yang belum dimanfaatkan, tetapi tidak otomatis menjamin biaya siklus hidup yang lebih rendah. Evaluasi biaya operasi, pendapatan material, biaya residu, dan biaya ekspansi tetap diperlukan.

3.3. Neraca Massa dan Kapasitas Pengolahan

Penggunaan loading rate membantu menerjemahkan target penanganan menjadi kebutuhan peralatan, namun angka rata-rata tidak menggantikan analisis bottleneck. Pada fasilitas dengan

pemilahan manual, kapasitas efektif dapat ditentukan oleh jumlah operator, kemudahan akses ke konveyor atau meja sortir, kontaminasi material, dan waktu istirahat. Pada pengolahan organik, kapasitas dapat dibatasi waktu tinggal dan luas area pematangan. Karena itu, setiap unit proses memerlukan kapasitas desain sendiri agar fasilitas tidak hanya seimbang secara massa, tetapi juga seimbang secara operasional.

Rifai et al. (2024) menunjukkan pentingnya pengaturan partisipasi pemilahan dalam skenario pengurangan sampah, sedangkan Putra dan Bagastyo (2026) menggunakan analisis aliran material untuk membandingkan konfigurasi fasilitas di kota kecil. Dibandingkan kedua pendekatan tersebut, artikel ini menekankan penerjemahan aliran ke kebutuhan lahan dan tahap pembangunan. Penilaian performa setelah fasilitas beroperasi tetap diperlukan untuk memastikan bahwa target pemulihan yang direncanakan dapat dicapai.

Neraca massa menjadi penghubung antara komposisi sampah dan keputusan desain. Setiap fraksi yang masuk diarahkan ke pengolahan organik, pemulihan material, atau residu sesuai recovery factor. Dengan pendekatan tersebut, perubahan komposisi atau faktor pemulihan akan memengaruhi kebutuhan area proses dan penyimpanan. Recovery factor dalam penelitian ini merupakan parameter desain; efektivitas aktual baru diketahui setelah fasilitas beroperasi melalui pencatatan massa masuk dan keluar.

Loading rate yang diperoleh sebesar 3.715,86 kg/jam atau 21,42 m³/jam pada 2027 dan 3.758,33 kg/jam atau 21,66 m³/jam pada 2032. Parameter ini menerjemahkan beban harian menjadi kebutuhan kapasitas per jam. Pada implementasi, nilai tersebut perlu dipadukan dengan pola kedatangan kendaraan, jam operasi, waktu tinggal sampah, kecepatan pemilahan, dan kapasitas peralatan. Karena penelitian tidak menyediakan time-and-motion study, loading rate diperlakukan sebagai kapasitas rata-rata desain.

3.4. Kebutuhan Ruang TPST 3R

Berdasarkan komponen pada Tabel 2, area komposting 583 m² mewakili sekitar 53,3% dari total lahan 1.093 m² pada tahap pertama, sedangkan 792 m² mewakili sekitar 55,5% dari total 1.428 m² pada tahap kedua. Persentase ini merupakan hasil turunan aritmetika dari angka luas pada naskah, bukan hasil pengukuran tambahan. Dominasi ruang komposting sejalan dengan dominasi sampah organik, tetapi rasio tersebut belum dapat dipakai untuk menyimpulkan bahwa luasnya optimal tanpa informasi tinggi tumpukan, durasi pengomposan, tingkat penyusutan, dan lebar akses alat.

Perlu dicatat bahwa penjumlahan sepuluh komponen yang ditampilkan pada Tabel 2 tidak mencapai total luas lahan yang dilaporkan. Selisih tersebut dapat mencakup sirkulasi, ruang lapak, area residu, dan ruang utilitas, tetapi rincian tidak tersedia dalam naskah. Karena itu, tabel diperlakukan sebagai daftar ruang utama dan bukan bill of quantities lahan yang lengkap. Pada desain lanjutan, perlu disusun layout berskala yang memisahkan alur sampah masuk, bahan organik, produk jadi, barang lapak, dan residu.

Total kebutuhan lahan meningkat dari 1.093 m² pada 2027 menjadi 1.428 m² pada 2032. Perubahan kebutuhan ruang utama ditampilkan pada Tabel 2. Area komposting menjadi komponen terbesar dan meningkat dari 583 m² menjadi 792 m², konsisten dengan dominasi fraksi organik. Area penerimaan dan pemilahan meningkat dari 97 m² menjadi 133 m², sedangkan area pematangan kompos meningkat dari 119 m² menjadi 157 m².

Tabel 2. Kebutuhan Ruang Utama TPST 3R

Komponen area	2027 (m ²)	2032 (m ²)
Dropping/pemilahan	97	133
Pencacahan organik	5	5
Komposting	583	792
Pematangan kompos	119	157
Pengayakan	5	5
Penyimpanan kompos	78	109
Kantor	40	40
Gudang	9	9
Toilet	4,5	4,5
Parkir	100	100

Dalam desain detail, zonasi perlu memisahkan area penerimaan, proses organik, penyimpanan produk, dan residu. Aliran satu arah dapat mengurangi perpindahan silang material dan meningkatkan keteraturan operasi. Penelitian awal menentukan kebutuhan fungsi ruang, tetapi belum melakukan optimasi layout berbasis jarak perpindahan material, keselamatan kerja, atau simulasi antrean.

3.5. Biaya Pembangunan dan Implikasi Rekayasa

Penjumlahan biaya dua tahap pada harga dasar yang sama menghasilkan sekitar Rp2,536 miliar. Nilai tersebut adalah agregat nominal estimasi konstruksi dan tidak memperhitungkan inflasi, diskonto, atau nilai waktu uang. Penundaan investasi tahap kedua berpotensi membantu pengaturan arus kas pemerintah atau pengelola, tetapi manfaat ekonominya baru dapat dibuktikan melalui perbandingan skenario pembiayaan. Utomo et al. (2025) mengaitkan pengelolaan sampah berbasis ekonomi sirkular dengan kebutuhan investasi dan pembangunan rendah karbon, sehingga memperkuat urgensi penilaian yang melampaui biaya bangunan semata.

Pada tahap pengembangan, prioritas biaya juga harus mempertimbangkan keselamatan kerja, drainase, penanganan bau, pasokan air dan listrik, pengendalian kebakaran, serta akses kendaraan. Jika komponen tersebut tidak tercakup dalam RAB awal, estimasi modal berisiko terlalu rendah. Karena rincian volume pekerjaan tidak disediakan pada naskah yang diaudit, artikel ini tidak menambahkan pos biaya atau harga satuan baru.

RAB tahap awal 2027 sebesar Rp1.924.831.531, sedangkan pembangunan lanjutan 2032 sebesar Rp611.035.970. Tahap kedua lebih rendah karena merupakan ekspansi fasilitas yang telah dibangun, bukan pembangunan ulang seluruh sistem. Temuan ini menunjukkan bagaimana pengembangan bertahap dapat membagi kebutuhan modal ke dalam dua periode.

Biaya konstruksi tidak dapat disamakan dengan kelayakan ekonomi. Biaya operasi, tenaga kerja, pemeliharaan, transportasi residu, pendapatan kompos dan material daur ulang, depresiasi, serta arus kas belum dianalisis. Karena itu, hasil penelitian dibatasi sebagai preliminary engineering design. Sebelum implementasi, HSPK perlu diperbarui dan dilengkapi analisis biaya siklus hidup serta kelayakan operasi.

3.6. Kerangka Perencanaan dan Keterbatasan

Kontribusi praktis kerangka ini adalah menyediakan urutan pemeriksaan bagi pemerintah daerah dan pengelola fasilitas: apakah data timbulan memadai, apakah aliran massa tertutup, apakah kapasitas peralatan sesuai beban puncak, apakah ruang memenuhi kebutuhan proses, dan apakah pembiayaan tahap lanjutan realistis. Kerangka tersebut dapat diadaptasi untuk lokasi lain, tetapi nilai parameter tidak dapat dipindahkan tanpa karakterisasi ulang. Penelitian pengelolaan sampah berbasis ekonomi sirkular di Depok (Utomo et al., 2025) serta evaluasi TPS 3R di Bandung (Permatasari & Setyanto, 2025) memberikan konteks bahwa kebutuhan fasilitas perlu dinilai bersama performa sistem dan tata kelolanya.

Agenda penelitian lanjutan meliputi pengukuran musiman, uji pemilahan di sumber, uji coba recovery factor aktual, pencatatan residu harian, analisis antrean kendaraan, pengujian mutu kompos, penilaian keselamatan, dan kajian finansial serta dampak lingkungan. Studi yang mengintegrasikan life cycle assessment dan kelayakan ekonomi pada fasilitas komunitas (Utomo et al., 2025) menunjukkan arah pengembangan metodologi tersebut. Semua agenda ini dinyatakan sebagai rekomendasi, bukan sebagai metode yang sudah dilakukan dalam penelitian Ampelgading.

Kerangka perencanaan yang dihasilkan dapat diringkas sebagai: karakteristik wilayah dan populasi → timbulan dan komposisi → proyeksi beban → skenario pelayanan → recovery factor → neraca massa → loading rate → kebutuhan proses → kebutuhan ruang → tahapan pembangunan → investasi. Kerangka tersebut menempatkan luas bangunan sebagai keluaran dari karakteristik dan aliran material, bukan sebagai titik awal desain. Setelah fasilitas beroperasi, data timbangan masuk, material pulih, residu, dan waktu operasi dapat digunakan untuk memperbarui parameter desain secara adaptif. Digitalisasi pencatatan dapat mendukung transparansi dan pengendalian kinerja (Kurniawan et al., 2022, 2023).

Keterbatasan penelitian meliputi karakterisasi yang hanya mencakup 35 rumah selama delapan hari, belum tercakupnya variasi musiman dan sumber non-rumah-tangga, recovery factor yang belum divalidasi secara operasional, proyeksi yang perlu diperbarui dengan data demografi terbaru, serta RAB berbasis HSPK 2022. Penelitian juga belum mencakup kelayakan finansial-operasional, life-cycle assessment, emisi, analisis risiko, penerimaan masyarakat, pasar produk, dan optimasi pengumpulan.

4. KESIMPULAN

Pendekatan neraca massa dapat menghubungkan karakteristik sampah dengan keputusan kapasitas, zonasi ruang, tahapan pembangunan, dan kebutuhan investasi TPST 3R. Timbulan rumah tangga terukur sebesar 0,55 kg/orang/hari atau 3,17 L/orang/hari dengan densitas 173,58 kg/m³, sedangkan fraksi organik sebesar 44,33% menjadi dasar dominannya kebutuhan area pengolahan biologis. Pada skenario penelitian, timbulan diproyeksikan 21,73 ton/hari pada 2027 dan 30,44 ton/hari pada 2032, dengan loading rate sekitar 3,72-3,76 ton/jam dan kebutuhan lahan meningkat dari 1.093 m² menjadi 1.428 m². RAB berbasis HSPK Jawa Timur 2022 menunjukkan kebutuhan sekitar Rp1,925 miliar untuk tahap awal dan Rp611,04 juta untuk ekspansi. Hasil mendukung pembangunan bertahap sebagai pendekatan rekayasa yang adaptif, tetapi belum membuktikan kelayakan finansial dan keberlanjutan operasional. Sebelum implementasi diperlukan pembaruan karakterisasi, validasi recovery factor, pemilahan di sumber, kepastian pasar material, pembaruan harga satuan, dan sistem pencatatan massa masuk-keluar.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraeni, M. (2025). Thematic analysis of participative waste management policy towards circular economy, case study: Malang City. I-Com: Indonesian Community Journal. <https://doi.org/10.70609/icom.v5i1.6477>
- Aprilia, R., Noerhayati, E., & Rahmawati, A. (2024). Studi alternatif perencanaan TPS 3R berbasis masyarakat Desa Pandansari Lor Kabupaten Malang. Jurnal Rekayasa Sipil (e-journal), 14(1).
- Arif, M., Sumarmi, Mutia, T., & Prasad, R. R. (2024). Manajemen pengelolaan sampah model TPS3R berbasis pentahelix untuk mewujudkan Kota Malang yang berkelanjutan. GEOGRAPHY: Jurnal Kajian, Penelitian dan Pengembangan Pendidikan, 12(1).
- Badan Standardisasi Nasional. (1994). SNI 19-3964-1994: Metode pengambilan dan pengukuran contoh timbulan dan komposisi sampah perkotaan. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (1995). SNI 19-3983-1995: Spesifikasi timbulan sampah untuk kota kecil dan kota sedang di Indonesia. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 19-2454-2002: Tata cara teknik operasional pengelolaan sampah perkotaan. BSN.
- Budiardjo, M. A., Ardiansyah, S. Y., & Ramadan, B. S. (2022). Community-driven material recovery facility (CdMRF) for sustainable economic incentives of waste management: Evidence from Semarang City, Indonesia. Habitat International, 119, 102488. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2021.102488>
- Direktorat Jenderal Cipta Karya. (2014). Tata cara penyelenggaraan umum tempat pengolahan sampah (TPS) 3R berbasis masyarakat di kawasan permukiman. Kementerian Pekerjaan Umum.
- Hibino, K., Takakura, K., Nugroho, S. B., Nakano, R., Ismaria, R., Haryati, T., Yulianti, D., Zusman, E., Fujino, J., & Akagi, J. (2023). Performance of Takakura composting method in the decentralised composting center and its comparative study on environmental and economic impacts in Bandung city, Indonesia. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 12(1). <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2022.1945234.1379>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank.
- Kurniawan, T. A., Avtar, R., Singh, D., Xue, W., Othman, M. H. D., Hwang, G. H., Iswanto, Albadarin, A. B., & Kern, A. O. (2021). Reforming MSWM in Sukunan (Yogyakarta, Indonesia): A case-

- study of applying a zero-waste approach based on circular economy paradigm. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124775. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124775>
- Kurniawan, T. A., Othman, M. H. D., Hwang, G. H., & Gikas, P. (2022). Unlocking digital technologies for waste recycling in Industry 4.0 era: A transformation towards a digitalization-based circular economy in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131911. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131911>
- Kurniawan, T. A., Meidiana, C., Othman, M. H. D., Goh, H. H., & Chew, K. W. (2023). Strengthening waste recycling industry in Malang (Indonesia): Lessons from waste management in the era of Industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135296>
- Le, P. G., Le, H. A., Dinh, X. T., & Nguyen, K. L. P. (2023). Development of sustainability assessment criteria in selection of municipal solid waste treatment technology in developing countries: A case of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Sustainability*, 15(10), 7917. <https://doi.org/10.3390/su15107917>
- Pemerintah Republik Indonesia. (2008). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2012). Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2017). Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga.
- Permatasari, A. D., & Setyanto, D. (2025). Evaluation operational of reduce reuse recycle waste treatment facility (TPS 3R) in Bandung City (Case study: TPS 3R Saling Asih and TPS 3R Hikmah). *Engineering, Mathematics and Computer Science Journal*, 7(1). <https://doi.org/10.21512/emacsjournal.v7i1.12694>
- Purnomo, C. E., Priadi, C. R., Ombasta, O., Suwarso, R., Marthanty, D. R., Taufik, F. D., Holden, J., & Hadfield, P. (2024). Development of an economically viable plastic recovery waste management system in Cibodas and Padamukti Village, West Java. [Artikel konferensi; metadata prosiding perlu diverifikasi].
- Putra, N. A. A., & Bagastyo, A. Y. (2026). Integrating material recovery facilities and RDF technology for waste optimization in small cities: A material flow analysis. *Journal of Applied Geospatial Information*, 10(1). <https://doi.org/10.30871/jagi.v10i1.12168>
- Rifai, M. K., Kartikaningsih, H., & Susilo, A. (2024). Optimalisasi reduksi sampah dengan keterlibatan masyarakat melalui pengolahan sampah perkotaan di TPS-3R Janti Berseri Waru-Sidoarjo. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(6), 1562–1572. <https://doi.org/10.14710/jil.22.6.1562-1572>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (Eds.). (2002). *Handbook of solid waste management* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- United Nations Environment Programme. (2024). *Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste—Turning rubbish into a resource*. UNEP.
- Utomo, E. T., Ekayani, M., & Abidin, Z. (2025). Optimizing waste management for circular economy and low-carbon development: A case study of Depok City, Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 15(5). <https://doi.org/10.29244/jpsl.15.5.833>
- Wahyono, S., Sahwan, F. L., & Suryanto, F. (2022). Characterization of municipal solid waste for waste to energy feedstock in Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1034(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1034/1/012034>
- Wikurendra, E. A., Csonka, A., Nagy, I., & Nurika, G. (2024). Urbanization and benefit of integration circular economy into waste management in Indonesia: A review. *Circular Economy and Sustainability*, 4, 1219–1248. <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00346-w>

Yang, M., Zhang, T., Zhou, X., Shen, Z., Kong, Z., You, X., Liu, F., & Zhang, Y. (2023). Operational performance of organic fraction of municipal solid waste discarded from communities, using an in-vessel hyperthermophilic composting technology. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139059. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139059>

Halaman Ini Dikosongkan