

Perencanaan Teknis Bank Sampah Unit Berdasarkan Proyeksi Timbulan Sampah dan Analisis Potensi *Material Recovery* di Kelurahan Ngaglik, Kota Batu

Arafat Barata Syah¹, Arroyan Arbie Yusuf^{2*}, A. Zahriel Fuady³, Abhinaya Rizquna Prasetyo³, Achmad Misbachul Aziz², Tegar Jaya Wibowo⁴, Anie Yulistyorini^{1*}

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Negeri Malang, Indonesia

²Program Studi Arsitektur, Universitas Negeri Malang, Indonesia

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Negeri Malang, Indonesia

⁴Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Universitas Negeri Malang, Indonesia

*Koresponden email: arroyan.arbie.2405266@students.um.ac.id; anie.yulistyorini.ft@um.ac.id

Diterima: 15 Juli 2026

Disetujui: 25 Juli 2026

Abstract

This study aimed to develop a technical plan for a Waste Bank Unit (BSU) based on a Material Recovery Station (MRS) by optimizing existing facilities in Ngaglik Village, Batu City, Indonesia. A quantitative approach was employed, including population projection, waste generation, waste composition, material recovery, mass balance, storage capacity, facility requirements, and operational system analyses. The projected population reached 16,251 people in 2037, generating 14,625 kg/day of municipal solid waste. The proposed system could recover 7,646.62 kg/day (52.28%) of waste materials while reducing landfill disposal to 2,830.95 kg/day (19.36%). The BSU was designed by utilizing an existing 85.24 m² facility with a storage capacity of 42.56 tons for a 14-day operational cycle. The proposed technical planning integrates material flow, facility layout, and operational procedures to improve material recovery efficiency, optimize existing infrastructure, reduce landfill dependency, and support the implementation of a circular economy at the community level.

Keywords: *circular economy, material recovery station, technical planning, waste bank unit, waste management*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menyusun perencanaan teknis Bank Sampah Unit (BSU) berbasis Material Recovery Station (MRS) melalui optimalisasi fasilitas eksisting di Kelurahan Ngaglik, Kota Batu. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif yang meliputi analisis proyeksi penduduk, timbulan sampah, komposisi sampah, *material recovery*, neraca massa, kapasitas penyimpanan, kebutuhan fasilitas, dan sistem operasional. Hasil penelitian menunjukkan jumlah penduduk tahun 2037 diproyeksikan mencapai 16.251 jiwa dengan timbulan sampah sebesar 14.625 kg/hari. Sistem yang direncanakan mampu memulihkan material sebesar 7.646,62 kg/hari (52,28%) dan menurunkan residu yang dikirim ke TPA menjadi 2.830,95 kg/hari (19,36%). Fasilitas BSU dirancang dengan memanfaatkan area eksisting seluas 85,24 m² serta kapasitas penyimpanan 42,56 ton untuk siklus operasional 14 hari. Perencanaan teknis yang diusulkan mengintegrasikan tata letak fasilitas, aliran material, dan sistem operasional untuk meningkatkan efisiensi *material recovery*, mengoptimalkan pemanfaatan fasilitas eksisting, mengurangi beban sampah menuju TPA, serta mendukung penerapan ekonomi sirkular di tingkat kelurahan.

Kata Kunci: *bank sampah unit, ekonomi sirkular, manajemen persampahan, stasiun pemulihan material, perencanaan teknis*

1. Pendahuluan

Pengelolaan *municipal solid waste* (MSW) menjadi salah satu tantangan utama pembangunan perkotaan akibat pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan perubahan pola konsumsi masyarakat yang terus meningkatkan timbulan sampah. Secara global, peningkatan timbulan sampah menyebabkan sistem pengelolaan konvensional yang masih berorientasi pada *collect-transport-dispose* tidak lagi mampu menjamin keberlanjutan lingkungan. Kondisi tersebut mendorong penerapan konsep ekonomi sirkular melalui optimalisasi *material recovery* sehingga sampah tidak hanya dipandang sebagai limbah, tetapi juga sebagai sumber daya yang memiliki nilai ekonomi [1], [2], [3], [4].

Di Indonesia, pengelolaan sampah diarahkan melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga (Jakstranas) yang menargetkan pengurangan sampah sebesar 30% dan penanganan sampah sebesar 70% pada tahun 2025. Kebijakan tersebut diperkuat melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Sampah pada Bank Sampah yang mendorong pengembangan bank sampah sebagai instrumen pengelolaan sampah berbasis masyarakat sekaligus mendukung implementasi ekonomi sirkular. Meskipun demikian, timbulan sampah nasional masih mencapai sekitar 56,63 juta ton per tahun, dengan 34,29% di antaranya belum terkelola secara optimal, sehingga diperlukan perencanaan fasilitas pengelolaan sampah yang didasarkan pada proyeksi timbulan, karakteristik sampah, serta potensi pemulihan material [5], [6], [7].

Permasalahan tersebut juga terjadi di Kota Batu, yang memiliki jumlah penduduk 225.408 jiwa pada tahun 2025 [8]. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), komposisi sampah Kota Batu didominasi oleh sisa makanan (53,55%), plastik (23,97%), dan kertas (8,38%), sehingga sekitar 32,35% merupakan material anorganik yang berpotensi dipulihkan melalui kegiatan *material recovery*. Namun, capaian pengurangan sampah Kota Batu baru mencapai 26%, sedangkan tingkat penanganan telah mencapai 73%, sehingga masih diperlukan penguatan sistem pengelolaan sampah berbasis masyarakat untuk mendukung pencapaian target Jakstranas. Hasil penelitian [9] menunjukkan bahwa karakteristik dan komposisi sampah merupakan dasar utama dalam menentukan strategi pemulihan material dan perencanaan fasilitas pengelolaan sampah yang efektif.

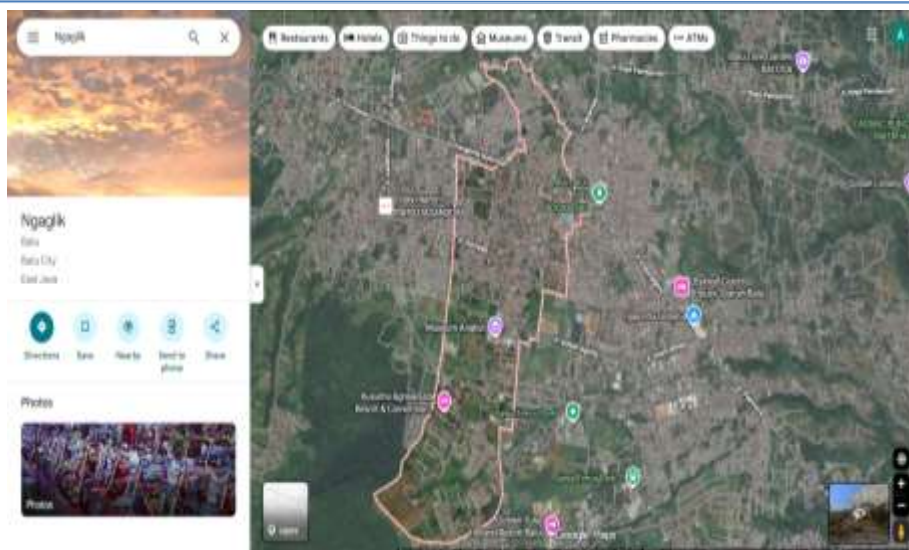
Permasalahan tersebut menjadi lebih nyata di Kelurahan Ngaglik, Kecamatan Batu, yang memiliki jumlah penduduk 13.020 jiwa, kepadatan sekitar 3.535 jiwa/km², serta terdiri atas 15 RW dan 78 RT [10]. Kelurahan Ngaglik merupakan satu-satunya kelurahan di Kecamatan Batu yang belum memiliki TPS maupun TPS3R. Kondisi ini disebabkan oleh tingginya kepadatan permukiman serta dominasi kawasan agrowisata sehingga hampir tidak tersedia lahan yang memadai, di samping adanya penolakan masyarakat terhadap pembangunan TPS3R di sekitar kawasan permukiman. Akibatnya, sebagian besar sampah masih langsung diangkut menuju Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), meskipun kelurahan telah memiliki beberapa fasilitas pendukung seperti gudang penyimpanan dan mesin pencacah plastik yang belum dimanfaatkan secara optimal sebagai fasilitas pemulihan material.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan model proyeksi timbulan sampah menggunakan pendekatan statistik maupun *machine learning* sebagai dasar perencanaan infrastruktur persampahan [7], [5], [11]. Penelitian lain membahas karakterisasi sampah [9], [12], pengembangan *Material Recovery Facility* [13], [14], [15], serta penerapan ekonomi sirkular dalam pengelolaan sampah perkotaan [2], [16]. Namun, penelitian yang mengintegrasikan proyeksi timbulan sampah jangka panjang, analisis potensi *material recovery*, analisis neraca massa, serta perencanaan teknis Bank Sampah Unit (BSU) berbasis optimalisasi fasilitas eksisting pada skala kelurahan masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menyusun perencanaan teknis Bank Sampah Unit (BSU) dengan konsep *Material Recovery Station* (MRS) melalui pemanfaatan fasilitas eksisting di Kelurahan Ngaglik sebagai solusi yang lebih realistis dibandingkan pembangunan TPS3R baru. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan pemulihan material, mengurangi beban sampah menuju TPA, serta mendukung implementasi ekonomi sirkular di tingkat kelurahan.

2. Metode Penelitian

Wilayah Studi

Penelitian ini dilaksanakan selama 45 hari pada Juni–Juli 2026 bertepatan dengan pelaksanaan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Negeri Malang di Kelurahan Ngaglik, Kecamatan Batu, Kota Batu, Provinsi Jawa Timur. Kelurahan Ngaglik dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan kawasan dengan kepadatan penduduk tertinggi di Kecamatan Batu serta memiliki aktivitas permukiman, perdagangan, dan pariwisata yang tinggi sehingga berpotensi menghasilkan timbulan sampah yang besar. Wilayah ini memiliki luas 3,68 km² yang terbagi menjadi 15 RW dan 78 RT, dengan jumlah penduduk 13.020 jiwa dan kepadatan 3.535 jiwa/km² berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kota Batu Tahun 2025. Hasil observasi menunjukkan bahwa pengelolaan sampah masih didominasi sistem kumpul–angkut–buang tanpa pemilahan dari sumber, sementara fasilitas berupa gudang penyimpanan, mesin pencacah plastik, dan insinerator belum dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada penyusunan perencanaan teknis Bank Sampah Unit (BSU) melalui optimalisasi fasilitas eksisting dengan pendekatan *Material Recovery Station* (MRS).



Gambar 1. Wilayah Studi Kelurahan Ngaglik, Kota Batu
Sumber: Google Maps (2026)

Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui survei lapangan selama kegiatan KKN yang meliputi observasi kondisi eksisting pengelolaan sampah, inventarisasi fasilitas persampahan, pengukuran dimensi bangunan, dokumentasi lapangan, serta wawancara dengan perangkat kelurahan, ketua RW, dan pengelola persampahan untuk memperoleh informasi mengenai sistem operasional yang diterapkan.

Data sekunder diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Batu, Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kota Batu, Monografi Kelurahan Ngaglik, Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2021, serta 16 artikel ilmiah nasional dan internasional yang membahas proyeksi timbulan sampah, ekonomi sirkular, *Material Recovery Facility* (MRF), dan Bank Sampah sebagai dasar penyusunan model perencanaan teknis.

Tabel 1. Jenis dan Sumber Data Penelitian

Data	Jenis	Sumber	Tujuan Analisis
Jumlah penduduk	Sekunder	BPS Kota Batu	Proyeksi penduduk
Laju pertumbuhan penduduk	Sekunder	BPS Kota Batu	Proyeksi penduduk
Timbulan sampah	Sekunder	SIPSN KLHK	Proyeksi timbulan sampah
Komposisi sampah	Sekunder	SIPSN KLHK	Analisis potensi material
Gudang eksisting	Primer	Survei lapangan	Perencanaan fasilitas
Mesin pencacah	Primer	Survei lapangan	Optimalisasi fasilitas
Insinerator	Primer	Survei lapangan	Optimalisasi fasilitas
Dimensi bangunan	Primer	Pengukuran lapangan	Perencanaan tata letak
Sistem operasional eksisting	Primer	Wawancara	Penyusunan sistem operasional
Regulasi persampahan	Sekunder	Peraturan pemerintah	Penentuan kriteria perencanaan
Literatur ilmiah	Sekunder	16 artikel ilmiah	Pengembangan metode perencanaan

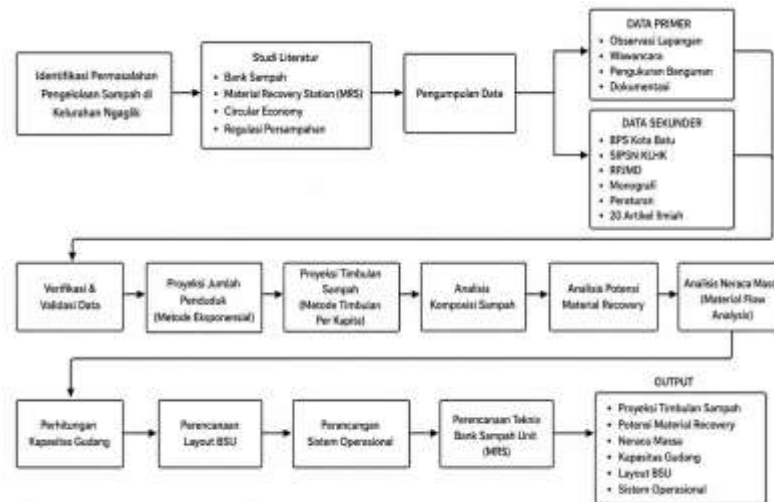
Sumber: Diolah oleh penulis berdasarkan BPS Kota Batu (2026), SIPSN KLHK (2025), Monografi Kelurahan Ngaglik (2025), dan hasil survei lapangan (2026).

Kerangka Penelitian

Penelitian dilakukan secara bertahap mulai dari identifikasi permasalahan hingga penyusunan desain teknis Bank Sampah Unit (BSU). Tahap awal meliputi pengumpulan data primer dan sekunder sebagai dasar analisis. Selanjutnya dilakukan proyeksi jumlah penduduk untuk memperkirakan perkembangan

populasi selama periode perencanaan tahun 2027–2037, yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam menghitung proyeksi timbulan sampah harian.

Tahap berikutnya adalah analisis komposisi sampah untuk menentukan potensi material yang dapat dipulihkan (*material recovery potential*). Hasil analisis tersebut digunakan dalam penyusunan neraca massa (*mass balance*) guna menggambarkan distribusi aliran material mulai dari sumber, proses pemilahan, penyimpanan, hingga residu yang dikirim ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Seluruh hasil analisis kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas penyimpanan, kebutuhan fasilitas, tata letak bangunan (*layout*), serta sistem operasional Bank Sampah Unit berbasis konsep *Material Recovery Station* (MRS).



Gambar 2. Kerangka Penelitian

Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif untuk menyusun perencanaan teknis Bank Sampah Unit (BSU) berdasarkan kondisi eksisting dan kebutuhan pelayanan pada masa mendatang. Proyeksi jumlah penduduk dihitung menggunakan metode eksponensial sebagaimana Persamaan (1) (SNI 19-3983-1995).

$$P_t = P_0 e^{rt} \quad (1)$$

dengan

P_t = jumlah penduduk pada tahun ke- t (jiwa)

P_0 = jumlah penduduk tahun dasar (jiwa)

r = laju pertumbuhan penduduk (% per tahun)

t = Jumlah tahun

e = bilangan eksponensial (2,71828)

Proyeksi timbulan sampah dihitung menggunakan metode timbulan per kapita sesuai SNI 19-3983-1995 tentang Spesifikasi Timbulan Sampah untuk Kota Kecil dan Kota Sedang, sebagaimana Persamaan (2).

$$Q = P \times q \quad (2)$$

dengan

Q = Timbulan sampah harian (kg/hari)

P = Jumlah penduduk (jiwa)

q = Timbulan sampah per kapita (kg/orang/hari).

Potensi setiap jenis material dihitung berdasarkan persentase komposisi sampah menggunakan pendekatan analisis komposisi sebagaimana diterapkan dalam SNI 19-3964-1994, sebagaimana Persamaan (3).

$$Q_i = Q \times C_i \quad (3)$$

dengan Q_i = berat material ke- i (kg/hari) dan C_i = persentase komposisi material (%).

Material yang berpotensi dipulihkan dihitung menggunakan target *recovery rate* sebesar 30% sesuai target pengurangan sampah nasional dalam Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017 sebagaimana Persamaan (4).

$$R_i = Q_i \times RR \quad (4)$$

dengan R_i = berat material yang berhasil dipulihkan (kg/hari) dan RR = *recovery rate*.

Selanjutnya dilakukan analisis neraca massa (*mass balance*) untuk menggambarkan distribusi aliran material mulai dari sumber sampah, proses pemilahan, pencacahan, penyimpanan, penjualan kepada pengepul, hingga residu yang dikirim ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Analisis ini digunakan untuk mengetahui besarnya material yang dapat didaur ulang dan jumlah residu yang masih memerlukan penanganan akhir. Kebutuhan kapasitas penyimpanan dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$V = \frac{(R_i \times t)}{\rho} \quad (5)$$

Dengan V = kebutuhan volume ruang penyimpanan (m^3); R_i = berat material hasil pemulihan (kg); t = lama penyimpanan (hari); dan ρ = densitas material (kg/m^3).

Seluruh hasil analisis kemudian diintegrasikan ke dalam penyusunan perencanaan teknis BSU yang meliputi kapasitas fasilitas, kebutuhan ruang, tata letak (*layout*), sistem operasional, dan optimalisasi fasilitas eksisting menjadi *Material Recovery Station* (MRS)

Tabel 2. Metode Analisis yang Digunakan dalam Penelitian

Analisis	Data Masukan	Metode	Keluaran
Proyeksi penduduk	Jumlah penduduk dan laju pertumbuhan	Metode geometrik	Proyeksi jumlah penduduk tahun 2027–2037
Proyeksi timbulan sampah	Proyeksi jumlah penduduk	Metode timbulan per kapita	Timbulan sampah harian
Analisis komposisi sampah	Data komposisi sampah SIPSN	Analisis persentase	Jumlah setiap fraksi sampah
Analisis potensi pemulihan material	Komposisi sampah	Analisis <i>recovery rate</i>	Potensi material yang dapat didaur ulang
Analisis neraca massa	Timbulan sampah dan potensi pemulihan	Analisis aliran material (<i>material flow analysis</i>)	Distribusi aliran sampah dan residu
Analisis kapasitas penyimpanan	Material hasil pemulihan dan densitas material	Perhitungan volume penyimpanan	Kebutuhan kapasitas gudang
Perencanaan teknis BSU	Seluruh hasil analisis	Perencanaan teknis	Tata letak fasilitas, kapasitas, dan sistem operasional BSU

Sumber: Diolah oleh penulis berdasarkan SNI 19-3964-1994, SNI 19-3983-1995, Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2021, serta berbagai literatur terkait.

3. Hasil dan Pembahasan

Proyeksi Penduduk

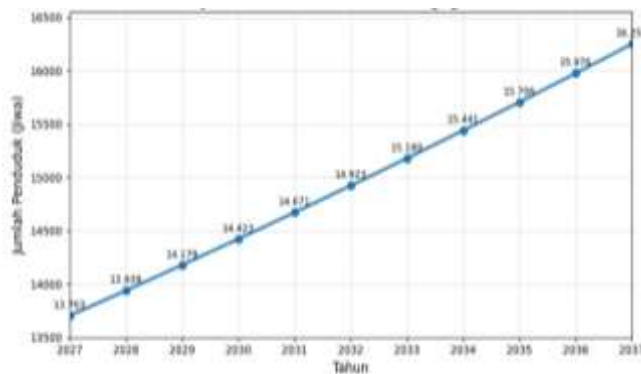
Proyeksi jumlah penduduk Kelurahan Ngaglik dilakukan menggunakan metode eksponensial karena menghasilkan nilai standar deviasi paling kecil, yaitu 339,273, dibandingkan metode aritmatik (340,340), geometrik (340,348), dan *least square* (4.733,978), sehingga dinilai paling representatif dalam menggambarkan pertumbuhan penduduk. Perhitungan menggunakan jumlah penduduk tahun dasar 2024 sebesar 13.020 jiwa dengan laju pertumbuhan 1,71% per tahun untuk periode 2027–2037 sebagai dasar perencanaan kapasitas Bank Sampah Unit (BSU).

Hasil proyeksi menunjukkan jumlah penduduk meningkat dari 13.703 jiwa pada tahun 2027 menjadi 16.251 jiwa pada tahun 2037 atau bertambah rata-rata ± 250 jiwa per tahun. Peningkatan ini berimplikasi pada bertambahnya timbulan sampah, kebutuhan kapasitas penyimpanan, sarana operasional, dan kapasitas *Material Recovery Station* (MRS). Oleh karena itu, perencanaan teknis BSU disusun berdasarkan kondisi penduduk pada akhir umur rencana agar mampu mengakomodasi peningkatan kebutuhan pelayanan. Hasil proyeksi disajikan pada **Tabel 3** sedangkan tren pertumbuhannya ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Tabel 3. Proyeksi Jumlah Penduduk Kelurahan Ngaglik Tahun 2027–2037

Tahun	Penduduk (Jiwa)
2027	13.703
2028	13.939
2029	14.179
2030	14.423
2031	14.671

Tahun	Penduduk (Jiwa)
2032	14.923
2033	15.180
2034	15.441
2035	15.706
2036	15.976
2037	16.251



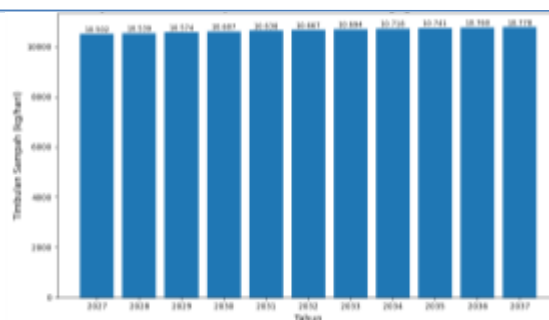
Gambar 3. Grafik Tren Proyeksi Penduduk Kelurahan Ngaglik Tahun 2027–2037

Proyeksi Timbulan Sampah

Proyeksi timbulan sampah Kelurahan Ngaglik dihitung berdasarkan hasil proyeksi penduduk menggunakan metode eksponensial dengan mengacu pada SNI 19-3983-1995 untuk timbulan sampah domestik serta referensi timbulan non-domestik pada fasilitas peribadatan dan pendidikan. Analisis dilakukan untuk periode 2027–2037 sebagai dasar penentuan kapasitas Bank Sampah Unit (BSU) dan Material Recovery Station (MRS). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa timbulan sampah domestik terlayani meningkat dari 10.502 kg/hari pada tahun 2027 menjadi 10.778 kg/hari pada tahun 2037, sedangkan target pengurangan sampah meningkat dari 1.501 kg/hari menjadi 2.839 kg/hari. Peningkatan tersebut menunjukkan perlunya penguatan kapasitas pengelolaan sampah agar mampu mengurangi beban sampah yang dikirim ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Hasil proyeksi timbulan sampah domestik disajikan pada **Tabel 4**, sedangkan tren peningkatannya ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Tabel 4. Proyeksi Timbulan Sampah Domestik Kelurahan Ngaglik Tahun 2027–2037

Tahun	Penduduk (Jiwa)	Timbulan Terlayani (kg/hari)	Target Pengurangan (kg/hari)
2027	13.703	10.502	1.501
2028	13.939	10.539	1.618
2029	14.179	10.574	1.738
2030	14.423	10.607	1.862
2031	14.671	10.638	1.989
2032	14.923	10.667	2.121
2033	15.180	10.694	2.256
2034	15.441	10.718	2.396
2035	15.706	10.741	2.539
2036	15.976	10.760	2.688
2037	16.251	10.778	2.839

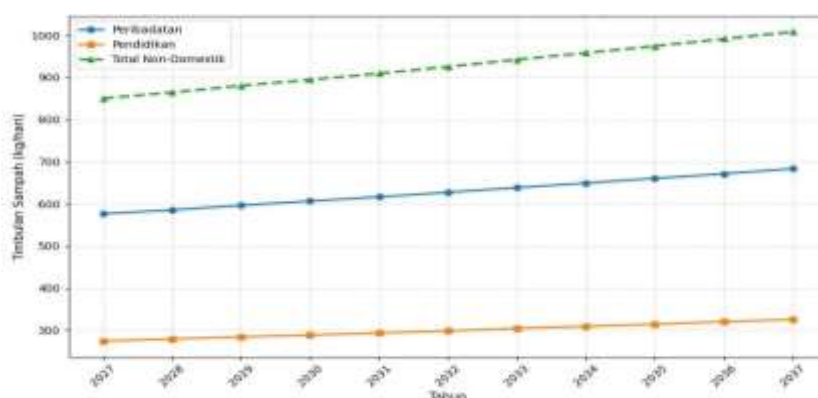


Gambar 4. Grafik Proyeksi Timbunan Sampah Domestik Tahun 2027–2037

Selain sektor domestik, timbunan sampah juga berasal dari fasilitas peribadatan dan pendidikan. Hasil proyeksi menunjukkan timbunan sampah peribadatan meningkat dari 576 kg/hari menjadi 683 kg/hari, sedangkan sektor pendidikan meningkat dari 274 kg/hari menjadi 325 kg/hari selama periode perencanaan. Meskipun kontribusinya lebih kecil dibandingkan sektor domestik, kedua sektor tersebut tetap memiliki potensi menghasilkan material yang dapat dipulihkan melalui sistem BSU. Hasil proyeksi timbunan sampah non-domestik disajikan pada **Tabel 5** dan **Gambar 5**.

Tabel 5. Proyeksi Timbunan Sampah Non-Domestik Kelurahan Ngaglik Tahun 2027–2037

Tahun	Peribadatan (kg/hari)	Pendidikan (kg/hari)	Total Non-Domestik (kg/hari)
2027	576	274	850
2028	585	279	864
2029	596	284	880
2030	606	288	894
2031	616	293	909
2032	627	298	925
2033	638	304	942
2034	649	309	958
2035	660	314	974
2036	671	320	991
2037	683	325	1.008

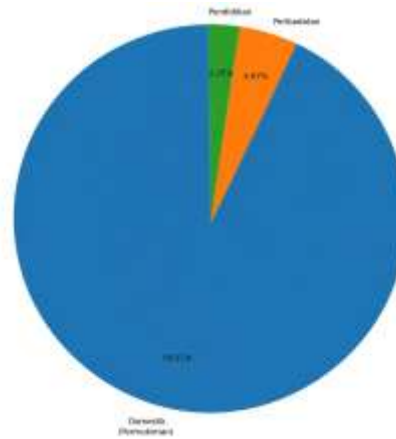


Gambar 5. Grafik Proyeksi Timbunan Sampah Non-Domestik Tahun 2027–2037

Berdasarkan rekapitulasi seluruh sumber timbunan, total timbunan sampah Kelurahan Ngaglik pada tahun 2037 diproyeksikan mencapai 14.625 kg/hari atau sekitar 79 m³/hari, yang didominasi oleh sektor domestik sebesar 13.617 kg/hari (93,11%), sedangkan sektor peribadatan dan pendidikan masing-masing menyumbang 683 kg/hari (4,67%) dan 325 kg/hari (2,22%). Dominasi sektor domestik menunjukkan bahwa keberhasilan BSU sangat bergantung pada pemilahan sampah sejak sumber. Rekapitulasi timbunan disajikan pada **Tabel 6** dan **Gambar 6**, yang selanjutnya menjadi dasar analisis komposisi sampah, potensi *material recovery*, neraca massa, dan penentuan kapasitas fasilitas BSU.

Tabel 6. Rekapitulasi Timbunan Sampah Kelurahan Ngaglik pada Akhir Tahun Perencanaan (2037)

Sumber Timbunan	Volume (m ³ /hari)	Berat (kg/hari)	Persentase (%)
Domestik (Permukiman)	55	13.617	93,11
Peribadatan	22	683	4,67
Pendidikan	2	325	2,22
Total	79	14.625	100,00



Gambar 6. Grafik Kontribusi Timbunan Sampah Berdasarkan Sumber Tahun 2037

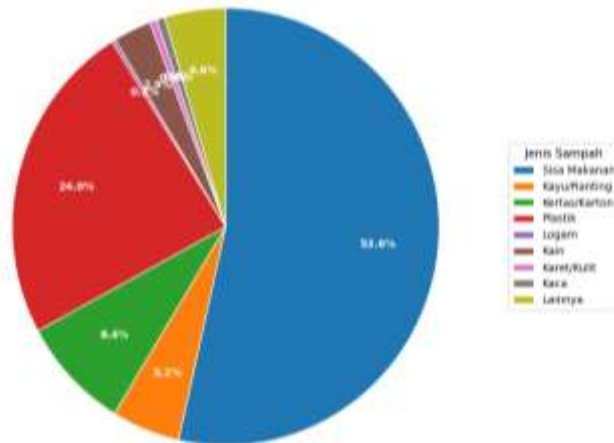
Komposisi Sampah

Komposisi sampah Kelurahan Ngaglik disusun berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kota Batu Tahun 2025 untuk sektor domestik, sedangkan sektor non-domestik (peribadatan dan pendidikan) mengacu pada [9]. Analisis dilakukan menggunakan total timbunan sampah tahun 2037 untuk mengidentifikasi material yang berpotensi dipulihkan melalui Bank Sampah Unit (BSU) dan *Material Recovery Station* (MRS). Hasil analisis menunjukkan bahwa sampah domestik didominasi oleh sisa makanan sebesar 7.292 kg/hari (53,55%), diikuti plastik 3.264 kg/hari (23,97%), kertas/karton 1.141 kg/hari (8,38%), kayu/ranting 704 kg/hari (5,17%), serta fraksi lainnya dalam proporsi lebih kecil. Dominasi fraksi organik menunjukkan tingginya kontribusi aktivitas rumah tangga, sedangkan fraksi anorganik memiliki potensi ekonomi yang besar untuk dipulihkan melalui sistem BSU. Rincian komposisi sampah domestik disajikan pada **Tabel 7**, sedangkan distribusinya ditunjukkan pada **Gambar 7**.

Tabel 7. Komposisi Timbunan Sampah Domestik Kelurahan Ngaglik Tahun 2037

Jenis Sampah	Komposisi (%)	Berat (kg/hari)
Sisa Makanan	53,55	7.292
Kayu/Ranting	5,17	704
Kertas/Karton	8,38	1.141
Plastik	23,97	3.264
Logam	0,28	38
Kain	2,87	391
Karet/Kulit	0,53	72
Kaca	0,63	86
Lainnya	4,62	629
Total	100,00	13.617

Berdasarkan **Tabel 7**, material anorganik berupa plastik, kertas/karton, logam, dan kaca mencapai sekitar 33,26% dari total timbunan sampah domestik sehingga berpotensi dipulihkan melalui BSU dan mengurangi beban sampah menuju TPA Tlekung.



Gambar 7. Diagram Lingkaran Komposisi Sampah Domestik Kelurahan Ngaglik Tahun 2037

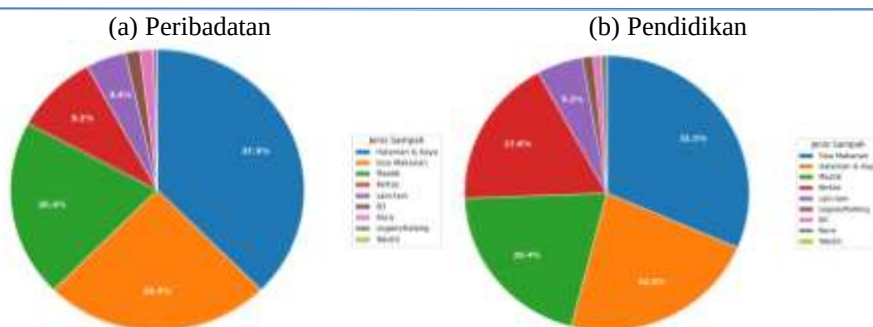
Selain sektor domestik, sampah juga berasal dari sektor peribadatan dan pendidikan dengan karakteristik yang dipengaruhi aktivitas masing-masing fasilitas. Pada sektor peribadatan, komposisi sampah didominasi halaman dan kayu sebesar 256 kg/hari, diikuti sisa makanan 170 kg/hari dan plastik 139 kg/hari, sedangkan sektor pendidikan didominasi sisa makanan sebesar 102 kg/hari, halaman dan kayu 73 kg/hari, plastik 66 kg/hari, dan kertas 57 kg/hari. Kedua sektor tersebut tetap memiliki potensi pemulihan material, terutama plastik dan kertas, melalui sistem BSU. Rincian komposisi disajikan pada **Tabel 8** dan **Tabel 9**, sedangkan perbandingan komposisinya ditunjukkan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**.

Tabel 8. Komposisi Timbulan Sampah Non-Domestik Sektor Peribadatan Tahun 2037

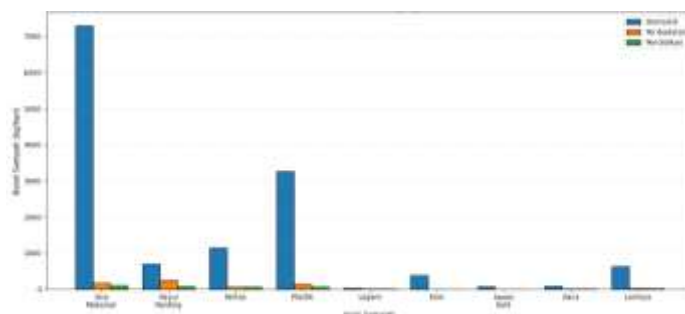
Jenis Sampah	Komposisi (%)	Berat (kg/hari)
Halaman dan Kayu	37,50	256
Sisa Makanan	24,90	170
Plastik	20,30	139
Kertas	9,20	63
Lain-lain	4,40	30
B3	1,60	11
Kaca	1,50	10
Logam/Kaleng	0,50	3
Tekstil	0,00	0
Total	100,00	683

Tabel 9. Komposisi Timbulan Sampah Non-Domestik Sektor Pendidikan Tahun 2037

Jenis Sampah	Komposisi (%)	Berat (kg/hari)
Sisa Makanan	31,50	102
Halaman dan Kayu	22,40	73
Plastik	20,40	66
Kertas	17,50	57
Lain-lain	5,13	17
Logam/Kaleng	1,35	4
B3	1,00	3
Kaca	0,70	2
Tekstil	0,02	0
Total	100,00	325



Gambar 8. Diagram Lingkaran Komposisi Sampah Non-Domestik Tahun 2037. (a) Peribadatan dan (b) Pendidikan



Gambar 9. Diagram Batang Perbandingan Komposisi Sampah Domestik, Peribadatan, dan Pendidikan Tahun 2037

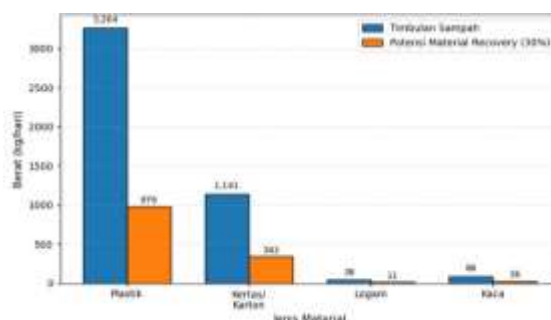
Potensi Material Recovery

Potensi *material recovery* dianalisis terhadap fraksi sampah yang memiliki nilai ekonomi, yaitu plastik, kertas/karton, logam, dan kaca, dengan mengacu pada target pengurangan sampah 30% sesuai Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017. Perhitungan menggunakan komposisi sampah domestik tahun 2037 dengan asumsi target pengurangan diterapkan pada setiap jenis material. Hasil analisis menunjukkan bahwa total potensi *material recovery* mencapai 1.358 kg/hari, terdiri atas plastik 979 kg/hari, kertas/karton 342 kg/hari, kaca 26 kg/hari, dan logam 11 kg/hari. Dominasi plastik menunjukkan bahwa pemilahan di sumber melalui BSU berpotensi memberikan kontribusi terbesar terhadap pengurangan sampah sekaligus meningkatkan nilai ekonomi melalui penjualan material daur ulang. Hasil perhitungan disajikan pada **Tabel 10**, sedangkan perbandingan timbulan material dan potensi pemulihannya ditunjukkan pada **Gambar 10**.

Tabel 10. Potensi Material Recovery Harian Berdasarkan Jenis Material Tahun 2037

Jenis Material	Timbulan (kg/hari)	Target Pengurangan 30% (kg/hari)
Plastik	3.264	979
Kertas/Karton	1.141	342
Logam	38	11
Kaca	86	26
Total	4.529	1.358

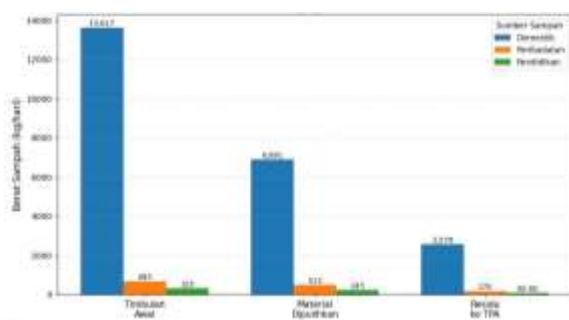
Sumber: Hasil Perhitungan berdasarkan SIPSN Kota Batu (2025) dan Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017.



Gambar 10. Perbandingan Timbulan Sampah dan Potensi Material Recovery Berdasarkan Jenis Material Tahun 2037

Neraca Massa (*Mass Balance*)

Analisis neraca massa (*mass balance*) dilakukan menggunakan pendekatan *Material Flow Analysis* (MFA) untuk menggambarkan aliran sampah mulai dari sumber hingga tahapan pengelolaan di Bank Sampah Unit (BSU), TPS 3R, *Material Recovery Station* (MRS)/TPST, dan residu yang berakhir di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Perhitungan dilakukan berdasarkan kondisi akhir tahun perencanaan (2037) menggunakan komposisi sampah domestik dan non-domestik serta *recovery factor* setiap jenis material. Hasil analisis menunjukkan bahwa total sampah yang masuk ke sistem mencapai 14.625 kg/hari, terdiri atas sampah domestik 13.617 kg/hari, peribadatan 683 kg/hari, dan pendidikan 325 kg/hari. Sampah domestik menjadi kontributor terbesar terhadap aliran material, sedangkan sampah non-domestik sebagian besar diolah pada TPST sebelum residunya dikirim ke TPA. Analisis ini menjadi dasar dalam menentukan kapasitas operasional BSU, MRS, TPST, serta estimasi residu yang harus ditangani oleh TPA Tlekung. Diagram aliran material disajikan pada **Gambar 11**, sedangkan hasil perhitungan neraca massa ditunjukkan pada **Tabel 11**.



Gambar 11. Diagram Neraca Massa (*Material Flow Analysis*) Sistem Pengelolaan Sampah Kelurahan Ngaglik Tahun 2037

Tabel 11. Neraca Massa Operasional Harian Sistem Pengelolaan Sampah Kelurahan Ngaglik Tahun 2037

Komponen	Domestik (kg/hari)	Peribadatan (kg/hari)	Pendidikan (kg/hari)	Total (kg/hari)
Timbulan sampah awal	13.617	683	325	14.625
Material berhasil dipulihkan	6.891	512,59	243,03	7.646,62
Residu menuju TPA	2.579	169,95	82,00	2.830,95

Berdasarkan **Tabel 11**, dari total timbulan sampah 14.625 kg/hari, sebanyak 7.646,62 kg/hari (52,28%) berhasil dipulihkan melalui proses pemilahan, daur ulang, dan pengolahan organik pada BSU, TPS 3R, dan TPST, sedangkan 2.830,95 kg/hari (19,36%) masih menjadi residu yang harus diangkut ke TPA Tlekung. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan sistem pengelolaan sampah terpadu berbasis BSU dan MRS mampu menekan beban sampah menuju TPA, meskipun fraksi organik, terutama sisa makanan dan kayu/ranting, masih mendominasi residu sehingga pengembangan pengolahan organik seperti komposting atau budidaya maggot diperlukan untuk meningkatkan *recovery rate* dan mendukung penerapan ekonomi sirkular di Kelurahan Ngaglik.

Perencanaan Kapasitas Penyimpanan

Perencanaan kapasitas penyimpanan dilakukan untuk menentukan kebutuhan ruang penyimpanan material hasil pemilahan sebelum didistribusikan kepada pengepul atau Bank Sampah Induk. Perhitungan didasarkan pada massa material hasil *recovery*, *recovery factor* (RF) setiap material, serta waktu penyimpanan selama 14 hari sesuai pola operasional Bank Sampah Unit (BSU). Berdasarkan hasil neraca massa tahun 2037, total material anorganik yang masuk ke sistem penyimpanan diperkirakan mencapai 3.040 kg/hari, terdiri atas plastik, kertas/karton, logam, dan kaca. Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan kapasitas penyimpanan selama satu siklus mencapai 42.560 kg (42,56 ton), dengan plastik sebagai kontributor terbesar sebesar 29.932 kg (70,33%), diikuti kertas/karton 11.270 kg (26,48%), kaca 910 kg (2,14%), dan logam 448 kg (1,05%).

Besarnya proporsi plastik menunjukkan bahwa efisiensi ruang penyimpanan sangat dipengaruhi oleh pengelolaan material tersebut, sehingga pemanfaatan mesin pencacah plastik eksisting menjadi penting untuk mengurangi volume penyimpanan. Kapasitas ini selanjutnya menjadi dasar penentuan dimensi

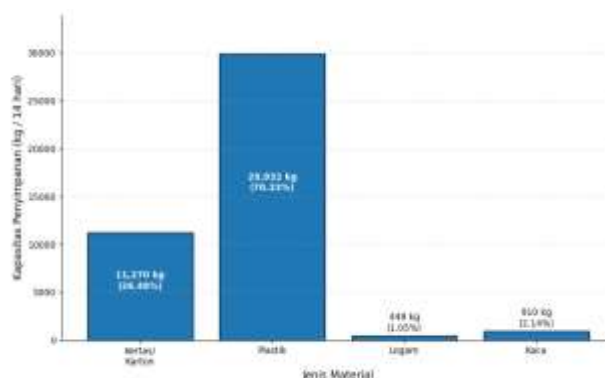
gudang, pembagian ruang berdasarkan jenis material, serta penerapan *material flow system*, yaitu material yang telah dipilah segera dikemas dan didistribusikan secara berkala untuk mencegah penumpukan di gudang.

Tabel 12. Perhitungan Kebutuhan Kapasitas Penyimpanan Material Hasil Recovery Tahun 2037

Jenis Material	Timbulan (kg/hari)	Recovery Factor (%)	Material Recovery (kg/hari)	Kapasitas Penyimpanan 14 Hari (kg)	Kontribusi (%)
Kertas/Karton	1.150	70	805	11.270	26,48
Plastik	3.289	65	2.138	29.932	70,33
Logam	38	85	32	448	1,05
Kaca	86	75	65	910	2,14
Total	4.563	—	3.040	42.560	100,00

Sumber: Hasil analisis penulis (2026).

Berdasarkan **Tabel 12**, material plastik menjadi fraksi yang memerlukan kapasitas penyimpanan terbesar (70,33%), diikuti kertas/karton (26,48%), sedangkan logam dan kaca memberikan kontribusi relatif kecil. Kondisi ini menunjukkan bahwa optimalisasi pencacahan plastik berperan penting dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan ruang penyimpanan.



Gambar 12. Grafik Kebutuhan Kapasitas Penyimpanan Material Hasil Recovery Tahun 2037

Kebutuhan Sarana dan Prasarana

Perencanaan sarana dan prasarana Bank Sampah Unit (BSU) disusun berdasarkan hasil proyeksi timbulan sampah, potensi *material recovery*, neraca massa, dan kebutuhan kapasitas penyimpanan pada akhir tahun perencanaan (2037). Fasilitas dirancang mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Sampah melalui Bank Sampah dengan mengoptimalkan fasilitas eksisting menjadi Material Recovery Station (MRS) untuk meminimalkan investasi pembangunan baru. Berdasarkan hasil analisis, material hasil *recovery* yang ditangani mencapai 3.040 kg/hari dengan kebutuhan kapasitas penyimpanan 42.560 kg selama satu siklus penyimpanan 14 hari. Optimalisasi dilakukan pada dua gudang eksisting seluas 31,97 m² dan area operasional terbuka seluas 53,27 m², sehingga total area MRS mencapai 85,24 m². Area operasional digunakan untuk penerimaan, penimbangan, pemilahan, dan bongkar muat, sedangkan gudang dimanfaatkan sebagai penyimpanan sementara material sebelum didistribusikan kepada pengepul atau Bank Sampah Induk. Operasional BSU didukung oleh timbangan digital, rak penyimpanan, karung pemilah, perangkat administrasi, dua unit mesin pencacah plastik, APD, dan APAR. Pemanfaatan mesin pencacah menjadi penting karena plastik merupakan material dominan hasil *recovery* sebesar 2.138 kg/hari (70,33%), sehingga pencacahan mampu mengurangi volume penyimpanan dan meningkatkan nilai jual material.

Tabel 13. Kebutuhan Sarana dan Prasarana Bank Sampah Unit (BSU) Kelurahan Ngaglik Tahun 2037

No	Sarana/Prasarana	Spesifikasi	Jumlah	Fungsi
1	Gudang penyimpanan	Bangunan tertutup	2 unit (31,97 m ²)	Penyimpanan sementara material hasil <i>recovery</i>
2	Area operasional	Area terbuka	53,27 m ²	Penerimaan, penimbangan, pemilahan, dan bongkar muat
3	Timbangan digital	Kapasitas ≥ 100 kg	1 unit	Penimbangan material hasil pemilahan
4	Mesin pencacah plastik	Mesin pencacah (eksisting)	2 unit	Mengurangi volume plastik dan meningkatkan nilai jual
5	Insinerator	Fasilitas eksisting	1 unit	Pengolahan residu yang tidak dapat dimanfaatkan
6	Rak penyimpanan	Rak besi bertingkat	Sesuai kebutuhan	Penyimpanan material berdasarkan jenis
7	Karung pemilah	Karung polypropylene	Sesuai kebutuhan	Pewadahan material hasil pemilahan
8	Perangkat administrasi	Laptop dan printer	1 set	Pencatatan transaksi dan administrasi BSU
9	APD	Sarung tangan, masker, sepatu boot	Sesuai jumlah petugas	Keselamatan kerja petugas
10	APAR	APAR Dry Chemical Powder	1 unit	Penanggulangan kebakaran

Sumber: Hasil analisis kebutuhan fasilitas berdasarkan proyeksi timbulan sampah, analisis material recovery, neraca massa, dan kondisi eksisting Tahun 2037.

Berdasarkan **Tabel 13**, kebutuhan fasilitas didominasi oleh sarana pemilahan dan penyimpanan material hasil *recovery*. Optimalisasi fasilitas eksisting memungkinkan pengembangan BSU tanpa pembangunan gedung baru sehingga lebih efisien dari sisi investasi, sedangkan pemanfaatan mesin pencacah plastik mendukung pengelolaan material dominan secara lebih efektif dan memperkuat penerapan konsep ekonomi sirkular di Kelurahan Ngaglik.

Desain Tata Letak BSU

Desain Bank Sampah Unit (BSU) Kelurahan Ngaglik disusun berdasarkan hasil analisis kapasitas fasilitas, kebutuhan ruang, dan aliran material dengan menerapkan konsep Material Recovery Station (MRS) serta one-way workflow agar proses penerimaan, penimbangan, pemilahan, pencacahan plastik, penyimpanan, dan distribusi material hasil *recovery* berlangsung efisien. Perencanaan memanfaatkan fasilitas eksisting di lingkungan Kantor Kelurahan Ngaglik seluas 85,24 m², yang terdiri atas area operasional terbuka 53,27 m² untuk penerimaan, penimbangan, dan bongkar muat serta dua gudang seluas 31,97 m² sebagai area pemilahan, pencacahan plastik, dan penyimpanan material. Sistem BSU dirancang menangani 3.040 kg/hari material hasil *recovery* dengan kapasitas penyimpanan 42.560 kg untuk siklus 14 hari. Untuk menghindari penumpukan material, operasional menerapkan material flow system, yaitu material yang telah dipilah segera diproses, dikemas, dan didistribusikan secara berkala kepada pengepul atau Bank Sampah Induk, sedangkan residu yang tidak memiliki nilai ekonomi diangkut oleh sistem persampahan Pemerintah Kota Batu menuju TPA tanpa memanfaatkan insinerator eksisting. Tata letak ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan pemanfaatan fasilitas yang tersedia, serta mendukung implementasi ekonomi sirkular di Kelurahan Ngaglik.



Gambar 13. Layout Teknis Bank Sampah Unit (BSU) Kelurahan Ngaglik Tahun 2037

Sistem Operasional BSU

Sistem operasional Bank Sampah Unit (BSU) Kelurahan Ngaglik menerapkan prinsip ekonomi sirkular melalui konsep Material Recovery Station (MRS) dengan one-way workflow yang meliputi pemilahan, pengumpulan, pengolahan, penyimpanan, dan pemasaran material hasil *recovery*. Masyarakat memisahkan plastik, kertas/karton, logam, dan kaca di tingkat rumah tangga, kemudian menyerahkannya ke BSU untuk diperiksa, ditimbang, dan dicatat pada buku tabungan serta sistem administrasi digital. Material selanjutnya dipilah berdasarkan jenis; plastik dicacah menggunakan mesin pencacah eksisting, sedangkan material lain dikemas dan disimpan sementara. Setelah kapasitas penyimpanan terpenuhi, material dipasarkan kepada Bank Sampah Induk atau mitra pengepul, sedangkan residu diangkut ke TPA. Operasional dikelola secara partisipatif oleh pengurus BSU bersama pemerintah kelurahan, PKK, Karang Taruna, dan kader lingkungan. Sistem ini diharapkan meningkatkan efektivitas *material recovery*, transparansi administrasi, mengurangi sampah ke TPA, serta mendukung penerapan ekonomi sirkular di Kelurahan Ngaglik.



Gambar 14. Diagram Alir Sistem Operasional Bank Sampah Unit Kelurahan Ngaglik

4. Kesimpulan

Perencanaan teknis Bank Sampah Unit (BSU) berbasis *Material Recovery Station* (MRS) di Kelurahan Ngaglik menunjukkan bahwa proyeksi jumlah penduduk mencapai 16.251 jiwa pada tahun 2037 menghasilkan timbunan sampah sebesar 14.625 kg/hari. Sistem yang dirancang mampu memulihkan 7.646,62 kg/hari (52,28%) material dan menekan residu menuju TPA menjadi 2.830,95 kg/hari (19,36%), dengan dukungan fasilitas eksisting seluas 85,24 m² dan kapasitas penyimpanan 42.560 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa optimalisasi fasilitas eksisting menjadi MRS merupakan alternatif yang layak untuk meningkatkan pemulihan material, mengurangi beban TPA, dan mendukung implementasi ekonomi sirkular di tingkat kelurahan.

5. Referensi

- [1] S. Hemidat *et al.*, "Solid Waste Management in the Context of a Circular Economy in the MENA Region," *Sustainability*, vol. 14, no. 1, p. 480, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14010480.
- [2] T. H. T. Nguyen, T.-T. T. Nguyen, N.-H. Ha, K. L. P. Nguyen, and T.-K. L. Bui, "Toward a circular economy for better municipal solid waste management in Can Gio district, Ho Chi Minh city," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 38, p. 101480, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.scp.2024.101480.
- [3] R. E. V. Sesay and P. Fang, "Circular Economy in Municipal Solid Waste Management: Innovations and Challenges for Urban Sustainability," *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)*, vol. 16, no. 02, pp. 35–65, 2025, doi: 10.4236/jep.2025.162003.

- [4] E. Teiseh, G. Kounou Ndongo, D. M. Bagley, and J. Larson, "Achievements of Canada's municipal solid waste management: how a policy and technology synergy can inform a new municipal solid waste management framework for Cameroon," *Discov. Sustain.*, vol. 6, no. 1, p. 989, Sep. 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01748-y.
- [5] T. F. Adu, L. D. Mensah, M. A. D. Rockson, and F. Kemausuor, "Forecasting municipal solid waste generation and composition using machine learning and GIS techniques: A case study of Cape Coast, Ghana," *Clean. Waste Syst.*, vol. 10, p. 100218, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.clwas.2025.100218.
- [6] F. Alam, M. Salam, D. Bo, V. Vambol, W. Ullah, and N. Riaz, "Assessing municipal solid waste generation, management practices, and health impacts: towards sustainable waste management and environmental protection," *Environ. Dev. Sustain.*, Mar. 2025, doi: 10.1007/s10668-025-06077-8.
- [7] X. Liu, W. Zhi, and A. Akhundzada, "Enhancing performance prediction of municipal solid waste generation: a strategic management," *Front. Environ. Sci.*, vol. 13, Apr. 2025, doi: 10.3389/fenvs.2025.1553121.
- [8] BPS Kota Batu, *Kota Batu Dalam Angka 2026*, vol. 24. Batu: Badan Pusat Statistik Kota Batu, 2026. [Online]. Available: <https://batukota.bps.go.id/id/publication/2026/02/27/61013bb5ba7945fbe2230be4/kota-batu-dalam-angka-2026.html>
- [9] F. Hidayat, D. N. Martono, and U. S. Hamzah, "Quantification and characterization of household waste in Dumai Timur District, Dumai City, Riau, Indonesia as a measure towards circular economy.," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1094, no. 1, p. 012001, Sep. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1094/1/012001.
- [10] Badan Pusat Statistik Kota Batu, *Kecamatan Batu Dalam Angka 2025*. Batu: Badan Pusat Statistik Kota Batu, 2025. [Online]. Available: <https://batukota.bps.go.id/id/publication/2025/09/26/389b8fa6c619aa02e27092a5/kecamatan-batu-dalam-angka-2025.html>
- [11] S. Alam, M. Rokonzaman, K. S. Rahman, and W. S. Tan, "A comparative analysis of forecasting algorithms for predicting municipal solid waste generation in Chittagong City," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 14, pp. 14213–14224, Oct. 2025, doi: 10.1007/s13762-025-06488-0.
- [12] E. Sembiring, A. H. Ramadan, and M. Farid, "Implications of shorter sampling durations on the analysis of municipal solid waste generation and composition," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 28, no. 1, pp. 133–140, Jan. 2026, doi: 10.1007/s10163-025-02401-6.
- [13] C. D. Herath and R. Noordeen, "An Investigation of effective community driven material recovery facility (MRF) in urban waste management – a case study of MRF in Wattala," in *16th International Research Conference - FARU 2023*, Faculty of Architecture Research Unit, Dec. 2023, pp. 15–22. doi: 10.31705/FARU.2023.3.
- [14] I. K. Maun, K. Tyagi, N. Kumar, B. Namazi, J. Mynderse, and D. Gruzowski, "Transforming Materials Recovery Facility using A.I.-Driven Smart Modular System," in *Proceedings of the 2025 REMADE® Circular Economy Technology Summit & Conference*, REMADE Institute, 2025. doi: 10.65569/PTWV8472.
- [15] D. Blasenbauer, A.-M. Lipp, A. Curtis, A. Gassner, L. Höflechner, and A. Nagl, "Prospective retrofit assessment of an existing material recovery facility: Industrial-scale evaluation of sensor-based sorting for paper and plastic recovery from mixed municipal solid waste," *Clean. Waste Syst.*, vol. 14, p. 100527, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.clwas.2026.100527.
- [16] R. Thiagarajan *et al.*, "Techno-economics of hydrocarbon fuel production and recyclables recovery from landfill-destined municipal solid waste: AI-enhanced materials recovery facility design," *J. Clean. Prod.*, vol. 525, p. 146643, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.146643.