

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

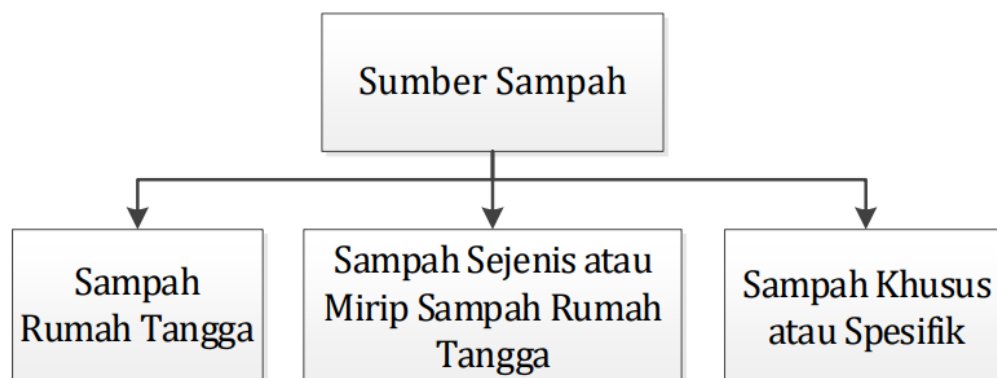
2.1.1 Persampahan

Sampah merupakan permasalahan universal yang dihadapi oleh hampir seluruh negara, termasuk Indonesia. Definisi sampah menurut Undang-Undang No. 18 Tahun 2008 adalah sisa kegiatan sehari-hari manusia atau proses alam yang berbentuk padat. Sampah dapat berasal dari berbagai sumber seperti rumah tangga, pasar, pusat perniagaan, perkantoran, perhotelan, dan fasilitas publik lainnya. Data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) tahun 2021 menunjukkan bahwa rumah tangga menjadi penyumbang sampah terbesar, yakni sebesar 40,8%. Hal ini dikarenakan sebagian besar aktivitas masyarakat terjadi di lingkungan rumah. Sumber terbesar kedua adalah pusat perniagaan (18,2%), disusul pasar tradisional (17,3%).

Menurut SNI 8632:2018 tentang Tata Cara Perencanaan Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan, sampah didefinisikan sebagai limbah padat yang terdiri atas bahan organik dan anorganik yang sudah tidak memiliki nilai guna, sehingga memerlukan pengelolaan untuk mencegah dampak negatif terhadap lingkungan. Hasibuan (2016) menambahkan bahwa sampah rumah tangga merupakan buangan dari aktivitas sehari-hari dalam rumah tangga yang tidak termasuk tinja dan sampah spesifik. Sementara itu, sampah sejenis rumah tangga berasal dari aktivitas kawasan industri, komersial, sosial, dan fasilitas umum yang menghasilkan sampah serupa dengan rumah tangga.

2.1.2 Sumber Sampah

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No.14 Tahun 2021, sumber sampah diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama yaitu sampah rumah tangga, sampah sejenis sampah rumah tangga, dan sampah spesifik.



Gambar 2.1 Sumber Sampah

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No 14, 2021

Sampah rumah tangga dihasilkan dari aktivitas domestik sehari-hari dan tidak termasuk limbah spesifik maupun tinja. Sementara itu, sampah spesifik merupakan limbah yang karena sifat, volume, atau konsentrasinya, memerlukan perlakuan khusus dalam penanganannya (PP RI No. 27 Tahun 2020). Secara umum, sampah rumah tangga terdiri atas sampah organik seperti sisa makanan, daun kering, dan potongan kayu kecil, serta sampah anorganik seperti plastik, kaca, dan logam ringan. Beberapa jenis limbah rumah tangga juga dikategorikan sebagai limbah B3, seperti baterai bekas dan lampu neon yang mengandung merkuri.

2.1.3 Komposisi Sampah

Komposisi sampah mengacu pada kandungan jenis material dalam sampah yang dihasilkan oleh masyarakat. Klasifikasi ini umumnya dibedakan menjadi sampah organik dan anorganik. Pengelompokan tersebut berguna untuk mempermudah strategi pengolahan, baik melalui proses daur ulang, komposting, maupun teknologi pengolahan lainnya. Beberapa faktor turut mempengaruhi variasi komposisi sampah di suatu wilayah, antara lain kondisi iklim, frekuensi pengumpulan sampah, musim, tingkat sosial ekonomi, pendapatan per kapita, dan jenis kemasan produk yang digunakan masyarakat (Damanhuri & Padmi, 2010).

Daerah dengan kelembaban tinggi cenderung menghasilkan sampah yang mengandung kadar air lebih besar. Selain itu, intensitas pengumpulan sampah yang rendah memungkinkan terjadinya penumpukan dan pembusukan pada sampah organik. Musim juga memengaruhi jenis sampah yang dihasilkan, seperti

meningkatnya volume sampah organik selama musim buah. Faktor sosial ekonomi turut berperan, di mana masyarakat dengan penghasilan tinggi lebih banyak menghasilkan sampah dari bahan kemasan seperti logam dan kertas, sementara masyarakat berpenghasilan rendah menghasilkan sampah yang lebih homogen dan dalam jumlah lebih sedikit. Tabel 2.1 menampilkan variasi tipikal komposisi sampah berdasarkan tingkat pendapatan. Informasi ini menjadi acuan penting dalam perencanaan pengelolaan sampah yang berbasis karakteristik lokal.

Tabel 2.1 Tipikal Komposisi Sampah Pemukiman (% berat basah)

Komposisi	Permukiman Low income	Permukiman Middle income	Permukiman High income
Kertas	1-10	15-40	15-40
Kaca, keramik	1-10	1-10	4-10
Logam	1-5	1-5	3-13
Plastik	1-5	2-6	2-10
Kulit, karet	1-5	-	-
Kayu	1-5	-	-
Tekstil	1-5	2-10	2-10
Sisa makanan	40-85	20-65	20-50
Lain-lain	1-40	1-30	1-20

Sumber: Damanhuri & Padmi, 2010.

2.1.4 Timbulan Sampah

Timbulan sampah didefinisikan sebagai total volume atau berat sampah yang dihasilkan per individu per hari, atau berdasarkan luas bangunan (SNI 8632:2018). Kementerian Pekerjaan Umum (2013) juga menekankan pentingnya data timbulan sampah dalam menentukan rute pengangkutan, kebutuhan fasilitas daur ulang, ukuran Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), serta pemilihan jenis alat pengumpul dan pengangkut yang sesuai. Oleh karena itu, klasifikasi kota berdasarkan skala penduduk dan aktivitas menjadi salah satu dasar dalam penentuan volume dan berat timbulan sampah, sebagaimana tercantum dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Timbulan Sampah Berdasarkan Klasifikasi Kota

No	Klasifikasi Kota	Volume (l/orang.hari)	Berat (kg/orang.hari)
1	Kota Kecil/Sedang	2,75 – 3,00	0,60 – 0,75
2	Kota Besar/Metropolitan	3,00 – 3,60	0,65 – 0,80

Sumber: SNI 8632:2018 Tentang Tata Cara Pengelolaan Sampah Perkotaan, 2018.

Timbulan sampah juga dapat ditentukan menurut jenis sumbernya. SNI 19-3983-1995 menyediakan parameter kuantitatif yang merinci estimasi timbulan sampah berdasarkan jenis bangunan atau fasilitas pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Besaran Timbulan Sampah

No	Komponen Sumber Sampah	Satuan	Volume (liter)	Berat (kg)
1	Rumah Permanen	Per orang/hari	2,25-2,50	0,350-0,400
2	Rumah Semi Permanen	Per orang/hari	2,00-2,25	0,300-0,350
3	Rumah Non Permanen	Per orang/hari	1,75-2,00	0,250-0,300
4	Kantor	Per pegawai/hari	0,50-0,75	0,025-0,100
5	Toko/ruko	Per petugas/hari	2,50-3,00	0,150-0,350
6	Sekolah	Per murid/hari	0,10-0,15	0,010-0,020
7	Jalan arteri sekunder	Per meter/hari	0,10-0,15	0,020-0,100
8	Jalan kolektor sekunder	Per meter/hari	0,10-0,15	0,010-0,050
9	Jalan lokal	Per meter/hari	0,05-0,10	0,005-0,025
10	Pasar	Per meter ² /hari	0,20-0,60	0,1-0,3

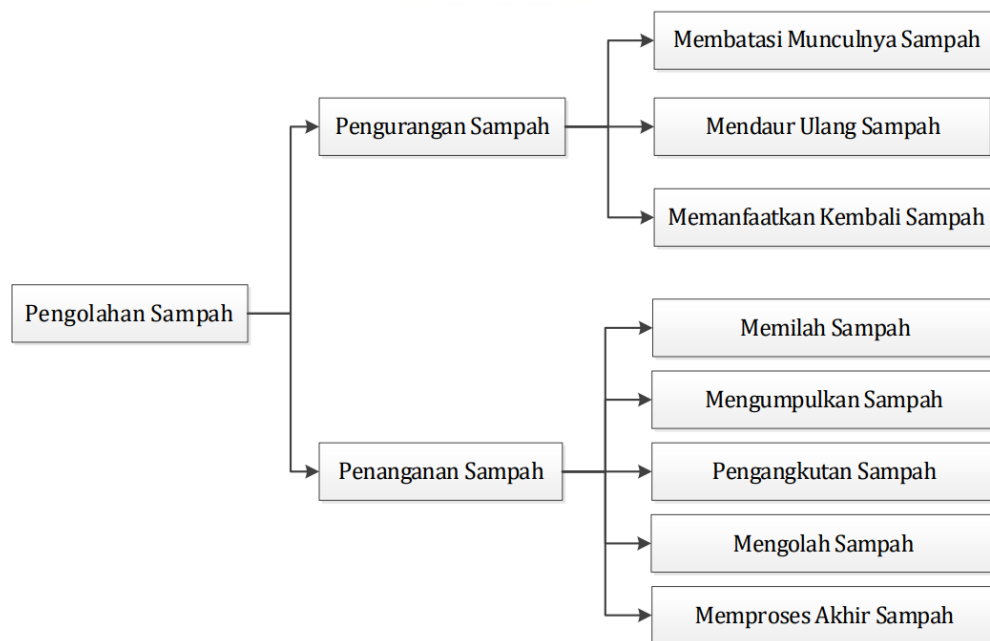
Sumber: SNI 19-3983-1995.

2.1.5 Pengelolaan Sampah

Pengelolaan sampah di Indonesia mencakup dua pendekatan utama, yaitu pengurangan dan penanganan sampah. Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 27 Tahun 2020, pengurangan sampah dilakukan melalui tiga metode utama: membatasi timbulan, mendaur ulang, serta menggunakan kembali sampah yang masih memiliki nilai guna. Dalam hal ini, pemerintah daerah berperan penting dalam memberikan dukungan berupa penyediaan teknologi pengolahan ramah lingkungan, pemberian label produk ramah lingkungan, serta memfasilitasi kegiatan masyarakat dalam pengurangan dan daur ulang sampah. Peran masyarakat didalam pengolahan sampah dapat diwujudkan dalam bentuk (Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No.14, 2021):

- Masyarakat diharapkan mampu mengurangi jumlah sampah yang dihasilkan,
- Menggunakan kembali sampah yang dapat digunakan (misalnya katong plastik dapat digunakan kembali didalam membungkus belanjaan ketika berbelanja),
- Mendaur ulang sampah atau memanfaatkan sampah yang dapat diurai oleh alam, misalnya mengolah sampah organik menjadi pupuk, memanfaatkan botol menjadi tempad hidroponik.

Sementara itu, penanganan sampah dilakukan melalui lima tahapan utama: pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pemrosesan akhir (Permen LHK No. 6 Tahun 2022). Gambar 2.2 menjelaskan alur pengelolaan ini secara visual. Sistem yang baik akan meminimalkan residu sampah yang harus dibuang ke TPA serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan kembali material yang masih bernilai.



Gambar 2. 2 Cara Pengelolaan Sampah

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No.06, 2022.

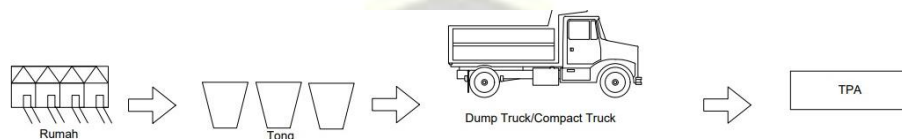
2.1.6 Pengangkutan Sampah

Pengangkutan merupakan salah satu tahapan penting dalam sistem pengelolaan sampah, dengan fungsi utama memindahkan sampah dari sumber atau tempat pemindahan menuju Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) (Damanhuri & Padmi, 2019). Dalam pelaksanaannya, pengangkutan menjadi kegiatan yang krusial dan memerlukan perencanaan yang cermat, terutama dalam beberapa aspek berikut:

1. Pola pengangkutan yang diterapkan;
2. Jenis alat dan sarana yang digunakan;
3. Rute perjalanan yang dilalui kendaraan pengangkut;
4. Prosedur operasional di lapangan;
5. Estimasi pembiayaan yang dibutuhkan.

Kelima aspek tersebut sangat mempengaruhi efisiensi dan efektivitas pelaksanaan pengangkutan. Perencanaan yang optimal dapat menekan pemborosan biaya serta emisi, sekaligus mempercepat proses pengangkutan. Standar Nasional Indonesia (SNI) 8632:2018 tentang Tata Cara Perencanaan Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan menguraikan pola pengangkutan sampah yang umum digunakan.

1) Pola pengangkutan sampah secara individual (door to door)

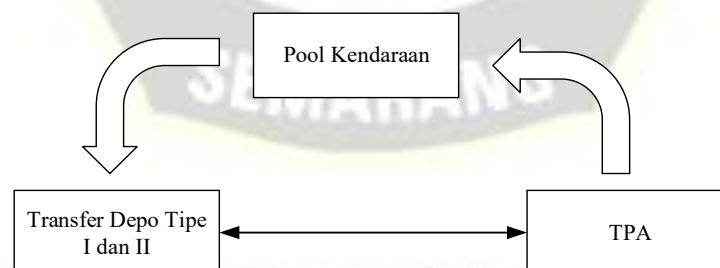


Gambar 2.3 Pola Pengangkutan Sampah Sistem Individual Langsung

Sumber: SNI 8632:2018

Gambar 2.3 menunjukkan sistem individual atau *door to door*, di mana truk pengangkut berangkat dari pool dan menuju langsung ke titik sumber timbunan, seperti rumah tangga, untuk mengangkut sampah secara langsung. Proses ini terus dilakukan hingga kapasitas truk terpenuhi. Setelah itu, truk mengarah ke TPA untuk menurunkan muatan. Selanjutnya, truk kembali beroperasi ke titik timbunan berikutnya sampai seluruh ritasi yang direncanakan tercapai sesuai ketentuan.

2) Pola pengangkutan sampah melalui sistem transfer depo tipe I dan II



Gambar 2.4 Pola Pengangkutan Sistem Transfer Depo Tipe I dan II

Sumber: SNI 8632:2018

Gambar 2.4 menunjukkan pola lainnya adalah sistem transfer depo, yang memanfaatkan lokasi pemindahan sementara (depo tipe I dan II), di mana kendaraan memindahkan sampah dari depo ke TPA dengan ritasi berulang. Pemilahan sampah, khususnya untuk sampah kering yang bernilai ekonomi, diintegrasikan dalam jadwal pengangkutan. Dalam praktiknya, terdapat persyaratan

teknis yang harus dipenuhi oleh kendaraan pengangkut, di antaranya adalah penggunaan penutup pada bak kendaraan, tinggi bak maksimal 1,6 meter, adanya alat bantu pemuatan, kesesuaian kapasitas kendaraan dengan kondisi jalan, serta sistem pencegah kebocoran air lindi. Jenis kendaraan yang umum digunakan meliputi truk berbagai ukuran, dump truck, arm roll truck, dan kendaraan penyapu jalan.

2.1.6.1 Metodologi Pengangkutan Sampah

Pengangkutan sampah yang dilakukan melalui Tempat Penampungan Sementara (TPS), dikenal sebagai sistem tidak langsung dari sumbernya. Sistem ini merujuk pada metode yang umum diterapkan di negara-negara maju. Pengangkutan dalam sistem ini dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu *Hauled Container System* (HCS) atau sistem kontainer angkat, dan *Stationary Container System* (SCS) atau sistem kontainer tetap.

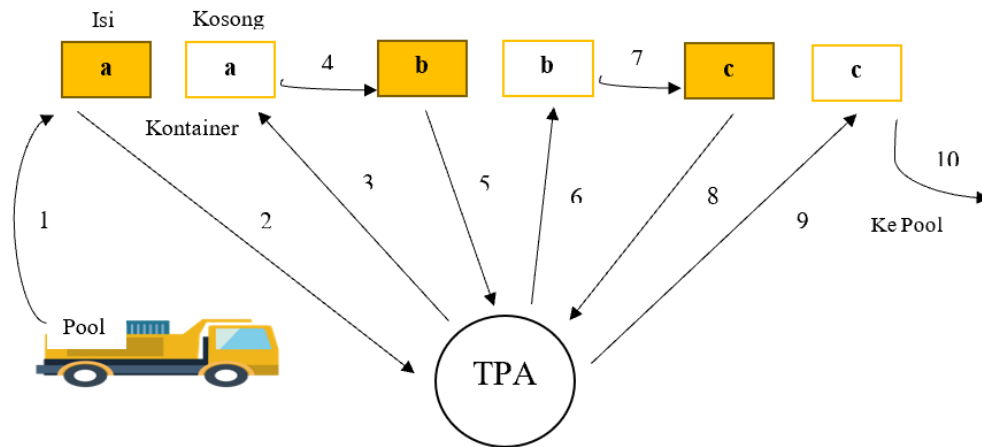
1. *Hauled Container System* (HCS) / Sistem Kontainer Angkat

HCS merupakan metode pengangkutan di mana wadah atau kontainer sampah dapat dipindahkan atau diangkut sepenuhnya ke fasilitas pengolahan atau ke TPA. Sistem ini umum digunakan di kawasan komersial dan dilaksanakan dengan dua cara:

- Kontainer yang telah penuh diangkut ke lokasi pembongkaran, dikosongkan, lalu dikembalikan ke lokasi semula;
- Kontainer penuh diangkut, kemudian diganti dengan kontainer kosong yang telah disiapkan di kendaraan.

Berdasarkan metode ini, terdapat tiga pola pengangkutan yang ditampilkan melalui visualisasi sebagai berikut:

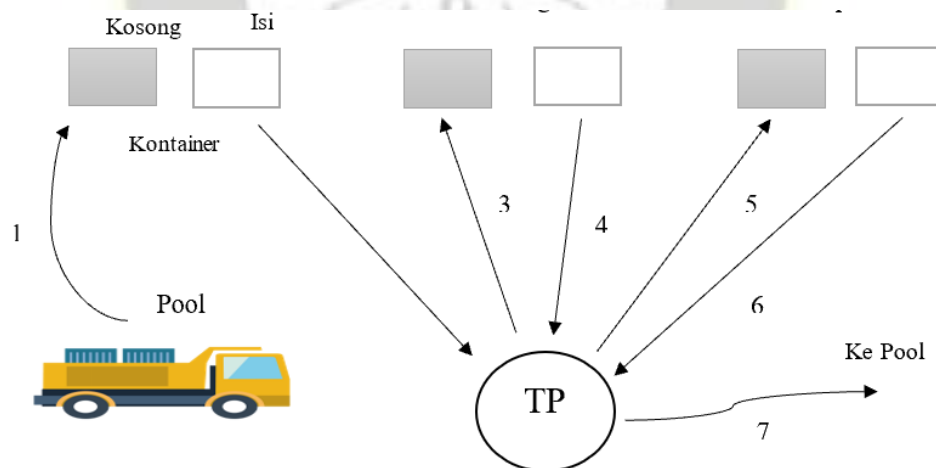
- a) Pola HCS cara satu yaitu truk tanpa kontainer dari pool, mengambil kontainer penuh dari TPS, membawanya ke TPA, lalu mengembalikan kontainer kosong ke lokasi semula sebelum melanjutkan ke TPS lain yang disajikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pola Pengangkutan HCS Cara 1

Sumber: Eri Damanhuri dan Tri Padmi, 2019

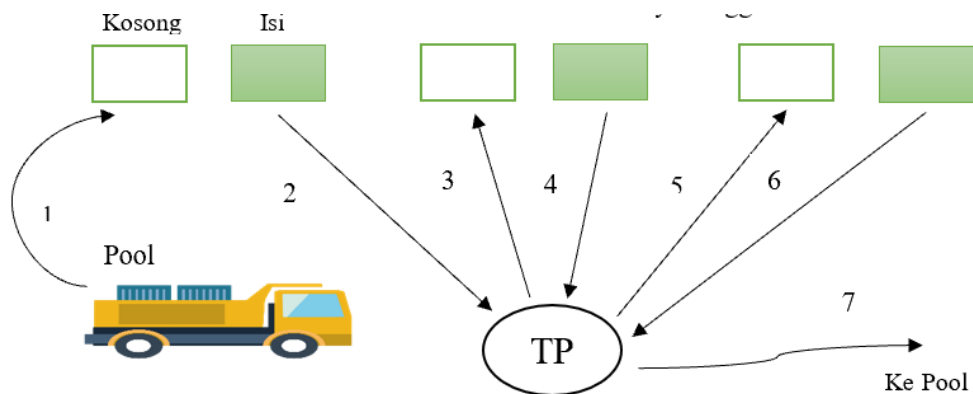
- b) Pola HCS cara dua yaitu truk tanpa kontainer dari pool, mengambil kontainer penuh dari TPS dan membawanya ke TPA. Kontainer kosong tidak dikembalikan ke TPS awal, melainkan langsung dibawa ke TPS kedua, dan baru dikembalikan ke TPS awal setelah ritasi terakhir. Pola HCS cara dua disajikan pada Gambar 2.5



Gambar 2.6 Pola Pengangkutan HCS Cara 2

Sumber: Eri Damanhuri dan Tri Padmi, 2019

- c) Pola HCS cara ketiga yaitu truk membawa kontainer kosong dari garasi ke TPS, menukar dengan kontainer penuh, dan membawanya ke TPA. Proses ini berulang untuk TPS berikutnya hingga ritasi terakhir selesai, lalu membawa kontainer kosong dari TPA kembali ke garasi yang disajikan pada Gambar 2.7.



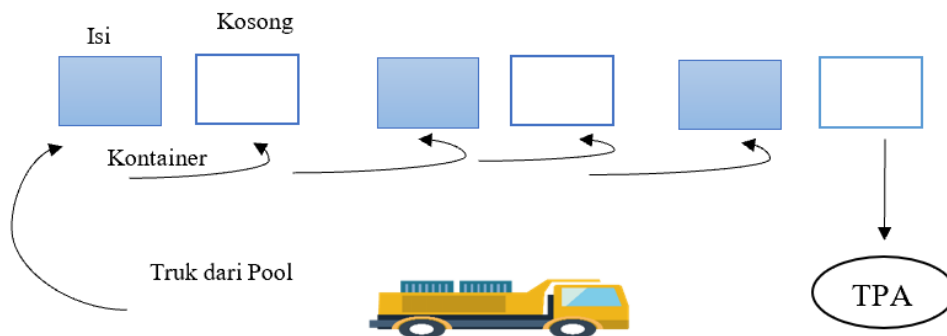
Gambar 2. 7 Pola Pengangkutan HCS Cara 3

Sumber: Eri Damanhuri dan Tri Padmi, 2019

2. *Stationary Container System* (SCS) / Sistem Kontainer Tetap

SCS ialah sistem pengangkutan dengan wadah yang bersifat statis atau tidak dipindahkan dari lokasinya. Sampah dipindahkan dari kontainer statis ke dalam truk *compactor*, yang kemudian membawanya ke TPA. Sistem ini umumnya diterapkan di kawasan permukiman. Ciri utama dari SCS adalah hanya terdapat satu kontainer statis yang melayani beberapa titik pembuangan. Proses pengangkutannya dilakukan dengan urutan sebagai berikut, sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 2.8.

- Truk berangkat dari garasi menuju lokasi wadah pertama;
- Sampah dipindahkan ke dalam truk *compactor*, lalu kontainer kosong dikembalikan ke tempatnya;
- Truk melanjutkan ke lokasi wadah berikutnya hingga penuh, kemudian menuju TPA. Proses ini diulang hingga seluruh ritasi harian selesai.



Gambar 2. 8 Pola Pengangkutan SCS

Sumber: Eri Damanhuri dan Tri Padmi, 2019

2.1.6.2 Sarana Pengangkutan

Pemilihan sarana transportasi untuk sampah di level kota perlu memenuhi standar teknis agar pengelolaan berjalan efektif. Kendaraan terbuka wajib dilengkapi penutup seperti jaring pelindung. Tinggi bak maksimal 1,6 meter dan idealnya dilengkapi alat pengungkit untuk mempercepat proses muat-bongkar. Kapasitas kendaraan harus disesuaikan dengan kelas jalan, serta dilengkapi penampung air lindi untuk mencegah pencemaran lingkungan. Menurut Permen PU No. 3 Tahun 2013, beberapa jenis kendaraan yang digunakan antara lain:

a. *Dump Truck*

Truk ini dilengkapi sistem hidrolik dengan kapasitas 6–14 m³. Efisien jika digunakan tiga kali ritasi harian dan melibatkan tiga pekerja. Penggunaan terpal penutup sangat dianjurkan untuk mencegah tercecernya sampah dan mengurangi gangguan visual terhadap lingkungan. Kelebihan jenis kendaraan ini adalah tidak diperlukannya banyak tenaga saat bongkar dan pengoperasiannya lebih efektif dan efisien dibanding dengan truk biasa. Namun demikian, kendaraan ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain pemeliharaan yang cenderung lebih sulit, kurang higienis, estetika kurang, lebih mudah berkarat, seperti bak terbuka: sulit untuk pemuatan.

b. *Amroll Truck*

Truk ini juga dilengkapi sistem hidrolik, namun pengisian tetap dilakukan secara manual. Kapasitasnya berkisar antara 6 m³, 8 m³, hingga 10 m³, agar efisien, ritasi minimal lima kali per hari dengan maksimal satu pekerja, serta kontainer dilengkapi tutup dan penampung air lindi. Kelebihan kendaraan ini adalah praktis dalam pengoperasiannya, tidak memerlukan banyak tenaga kerja, lebih sehat dan bersih serta fleksibel penempatannya. Kendati demikian, amroll truck memiliki kekurangan dalam hal biaya investasi dan perawatan yang relatif mahal. Selain itu, sistem hidrolik yang digunakan juga cukup rentan mengalami kerusakan, serta dibutuhkan area khusus untuk penempatan dan proses bongkar muat kontainer.

c. *Compactor Truck*

Truk ini dirancang khusus untuk sampah dengan kapasitas 6–10 m³, dan ritasi minimal tiga kali per hari. Kelebihan dari kendaraan ini adalah karena truk ini didesain untuk sampah, maka lebih banyak volume sampah yang terangkut, lebih higienis dan estetika, praktis dalam beroperasi, serta tidak memerlukan tenaga kerja yang banyak. Namun, kekurangan utama dari compactor truck terletak pada tingginya biaya investasi awal serta pemeliharaan. Penggunaan kendaraan ini juga kurang optimal untuk sistem pengangkutan sampah dari pintu ke pintu, karena waktu pengumpulannya relatif lebih lama dibanding jenis truk lainnya.

Pemilihan kendaraan juga mempertimbangkan beberapa aspek, antara lain biaya investasi, kondisi jalan, karakteristik sampah, kebutuhan sanitasi, dan kemampuan pemeliharaan (Permen PU No. 3 Tahun 2013). Peralatan yang baik dapat memperpanjang masa pakai, menekan biaya operasional, serta meminimalkan dampak negatif terhadap kesehatan dan estetika lingkungan. Penentuan kebutuhan alat angkut dan tenaga kerja harus didasarkan pada data representatif, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Kriteria Penentuan Jumlah Alat Angkut dan Pekerja

Jenis Alat	Metode Bongkar Muat	Faktor Pemasatan	Waktu untuk Mengangkat, Mengosongkan dan Meletakkan Kontainer (jam/trip)	Waktu untuk Mengosongkan Kontainer (jam/trip)	Waktu Dislokasi (jam/trip)
<i>HCS</i>					
-Hoist truck	Mekanis	2,0-4,0	0,067	0,008-0,05	0,053
-Tilt-frame	Mekanis	2,0-2,5	0,4		0,127
-Tlit-frame	Mekanis	2,0-2,5	0,4		0,133
<i>SCS</i>					
-Compactor					
Compactor					
	Mekanis				0,1
	Mekanis				0,1

Sumber: Permen PU No. 3 Tahun 2013

2.1.6.3 Optimasi Rute Pengangkutan Sampah

Pengangkutan merupakan komponen penting dalam sistem pengelolaan sampah kota, karena berperan besar dalam menentukan efisiensi dan efektivitas operasional secara keseluruhan. Tidak kurang dari 60% total biaya pengelolaan sampah hanya pada proses pengangkutan, sehingga upaya optimasi rute sangat diperlukan untuk menekan biaya operasional, mempercepat waktu tempuh, dan mengurangi konsumsi bahan bakar (Ramadan, 2019).

Optimasi rute pengangkutan bertujuan untuk menentukan jalur terbaik dari Tempat Penampungan Sementara (TPS) menuju Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), dengan memperhitungkan sejumlah faktor penting seperti jarak tempuh, waktu perjalanan, kapasitas kendaraan, serta jumlah titik layanan yang harus dilalui. Pemanfaatan teknologi, khususnya Sistem Informasi Geografis (SIG), telah terbukti efektif dalam merancang rute yang efisien. Dengan SIG, data spasial seperti lokasi TPS, TPA, serta kondisi jaringan jalan dapat dianalisis secara komprehensif untuk menghasilkan jalur pengangkutan yang optimal.

Studi kasus di Kabupaten Bengkayang menunjukkan bahwa integrasi SIG dalam perencanaan rute pengangkutan sampah dapat meningkatkan efisiensi operasional serta memperbaiki distribusi layanan pengangkutan secara keseluruhan (Putra, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi berbasis spasial merupakan pendekatan yang relevan dan esensial dalam pengelolaan sampah modern.

2.1.7 Dampak Pengangkutan Sampah yang Tidak Optimal

Pengangkutan sampah yang tidak optimal masih menjadi tantangan besar dalam sistem pengelolaan sampah di banyak daerah. Salah satu dampak paling nyata adalah masih adanya sisa-sisa sampah yang tidak terangkut ke TPA. Kondisi ini terlihat jelas di Kecamatan Kadia, Kota Kendari, di mana hanya sekitar 65,6% sampah yang berhasil diangkut dari total timbulan harian, sehingga menyisakan potensi gangguan kesehatan masyarakat akibat akumulasi sampah di lingkungan (Saribunga et al., 2025).

Selain itu, rendahnya ritasi atau jumlah perjalanan truk pengangkut per hari juga menyebabkan inefisiensi dan tingginya biaya operasional. Misalnya, di Kabupaten Subang, armada pengangkut hanya melakukan satu ritasi per hari, sehingga lebih dari 24,8 ton sampah tidak terangkut setiap harinya (Pratama & Sururi, 2024). Hal ini menunjukkan perlunya perencanaan ulang sistem pengangkutan yang mempertimbangkan peningkatan frekuensi ritasi.

Pengangkutan yang tidak optimal juga berdampak terhadap berkurangnya waktu operasional petugas. Jika rute pengangkutan tidak dirancang dengan baik, waktu tempuh menjadi lebih lama dan menyebabkan penyisiran sampah menjadi tidak maksimal (Herdianto, 2024). Hal ini pada akhirnya dapat menurunkan kinerja dan layanan pengelolaan sampah secara keseluruhan. Dampak lainnya adalah meningkatnya praktik pembuangan sampah sembarangan. Hal ini meningkatkan risiko pencemaran lingkungan, memperburuk estetika kota, dan dapat memicu banjir serta masalah kesehatan (Rana et al., 2024).

2.1.8 Evaluasi

Evaluasi merupakan langkah penting dalam menilai efektivitas dan efisiensi kebijakan pengangkutan sampah. Tujuan dari evaluasi antara lain untuk menentukan tingkat kinerja sistem, mengukur efisiensi pengangkutan, menghitung pengeluaran operasional, serta menilai dampak kebijakan yang diterapkan. Contoh penerapan evaluasi ditunjukkan oleh Herdianto (2024) dalam studi di Kabupaten Jember, di mana evaluasi 12 dump truck menunjukkan bahwa volume sampah yang terangkut masih di bawah kapasitas yang seharusnya. Dalam kasus lain di Kecamatan Kadia, Kota Kendari, Saribunga et al. (2025) menyatakan bahwa keterbatasan armada dan kapasitas kendaraan menjadi faktor utama pengangkutan yang tidak optimal, sehingga perlu penambahan armada dan pembaruan sistem angkut.

Evaluasi juga dilakukan oleh Pratama dan Sururi (2024) di Kabupaten Subang, yang menyimpulkan bahwa penggunaan dump truck dan armroll hanya satu kali ritasi per hari menyebabkan sisa timbulan sampah tidak tertangani secara maksimal. Penyesuaian sistem pengangkutan, optimalisasi rute, serta investasi

kendaraan tambahan menjadi rekomendasi utama dari evaluasi tersebut. Evaluasi sistem pengangkutan sebaiknya mencakup beberapa indikator utama, seperti:

1. Rasio antara jumlah sampah yang diangkut dengan timbulan harian.
2. Ritasi armada per hari.
3. Efisiensi operasional per jenis kendaraan.
4. Biaya per kilometer dan per ton sampah.
5. Rute dan waktu tempuh kendaraan.

Melalui evaluasi yang komprehensif, penyimpangan antara rencana dan pelaksanaan dapat diketahui, serta menjadi dasar untuk penyusunan kebijakan pengangkutan yang lebih efektif ke depan (Rana et al., 2024).

2.2 Metode Analisis Jaringan

Metode Network Analysis atau analisis jaringan merupakan pendekatan dalam Sistem Informasi Geografis (SIG) yang digunakan untuk menganalisis jaringan spasial seperti sistem transportasi jalan. Dalam konteks pengelolaan sampah, metode ini digunakan untuk mengidentifikasi rute paling efisien dari Tempat Penampungan Sementara (TPS) ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Efisiensi yang dimaksud meliputi jarak terpendek, waktu tempuh tercepat, serta konsumsi bahan bakar terendah. Dengan mengoptimalkan jalur pengangkutan, pemerintah daerah dapat menekan biaya operasional, meningkatkan ritasi pengangkutan, serta meminimalkan dampak lingkungan akibat emisi kendaraan (Ansari et al., 2018).

Salah satu teknik utama dalam Network Analysis adalah pencarian jalur terpendek (shortest path) yang biasanya dihitung menggunakan algoritma seperti Dijkstra. Algoritma ini bekerja dengan mencari jalur paling minimal berdasarkan bobot tertentu—seperti panjang jalan, waktu tempuh, atau biaya—yang diberikan pada masing-masing segmen jaringan. Penerapan teknik ini dalam pengangkutan sampah telah terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi dan performa layanan pengelolaan sampah di berbagai kota, termasuk di negara berkembang (Hameed et al., 2024). Oleh karena itu, Network Analysis menjadi komponen kunci dalam perencanaan sistem transportasi pengangkutan sampah yang berbasis data spasial.

2.2.1 Langkah-langkah Shortest Path

Pelaksanaan metode shortest path dalam QGIS diawali dengan proses penyiapan data spasial. Data jaringan jalan yang digunakan harus berbentuk vektor (biasanya tipe polyline) dan dilengkapi atribut panjang atau waktu sebagai bobot untuk perhitungan. Data ini dapat berasal dari sumber resmi seperti BAPPEDA atau OpenStreetMap dan harus dilakukan proses geoprocessing agar dapat digunakan sebagai jaringan analisis. Tahap ini mencakup pengecekan topologi, pemutusan ruas jalan yang tidak tersambung, serta pemberian nilai bobot pada masing-masing ruas jalan.

Setelah jaringan siap, langkah berikutnya adalah menginstal dan mengaktifkan plugin seperti Road Graph atau QNEAT3, yang tersedia secara gratis di QGIS. Pengguna kemudian menentukan titik awal (misalnya lokasi TPS) dan titik tujuan (lokasi TPA). Sistem akan menghitung rute terpendek berdasarkan parameter bobot yang dipilih, seperti jarak atau waktu tempuh. Hasilnya divisualisasikan dalam bentuk peta rute optimal, dan dapat disimpan atau digunakan untuk keperluan analisis lanjutan atau pengambilan keputusan operasional. Studi oleh Hameed et al. (2024) menunjukkan bahwa penerapan langkah-langkah ini mampu memangkas jarak tempuh harian pengangkutan sampah hingga lebih dari 25%, sekaligus mengurangi konsumsi bahan bakar dan waktu perjalanan.

2.2.2 Software QGIS

QGIS adalah perangkat lunak SIG berbasis open source yang saat ini banyak digunakan oleh akademisi, pemerintah, dan profesional di berbagai bidang, termasuk pengelolaan lingkungan. Salah satu keunggulan utama QGIS adalah kemampuannya dalam memproses data spasial untuk analisis jaringan dengan menggunakan berbagai plugin, seperti Road Graph, QNEAT3, dan pgRouting. Plugin-plugin ini memungkinkan pengguna untuk melakukan simulasi rute berdasarkan bobot yang ditentukan, serta mendukung penghitungan rute tercepat atau terpendek, penentuan titik optimal, dan pengembangan sistem pengangkutan yang efisien.

Studi oleh Smita (2021) menunjukkan bahwa penerapan QGIS dalam optimalisasi rute pengangkutan sampah di Kota Nagpur, India, berhasil mengurangi

jarak tempuh hingga 30% dibandingkan dengan rute konvensional. Hasil ini diperoleh dengan memanfaatkan analisis jaringan berbasis jarak yang diolah menggunakan plugin QNEAT3. Hal ini membuktikan bahwa QGIS merupakan perangkat lunak yang tidak hanya handal dalam visualisasi spasial, tetapi juga sangat efektif sebagai alat analisis pengambilan keputusan berbasis data geospasial. Dengan kemudahan akses, fleksibilitas penggunaan, serta dukungan komunitas global, QGIS menjadi solusi tepat dalam mendukung pengelolaan sampah kota yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2.3 Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)

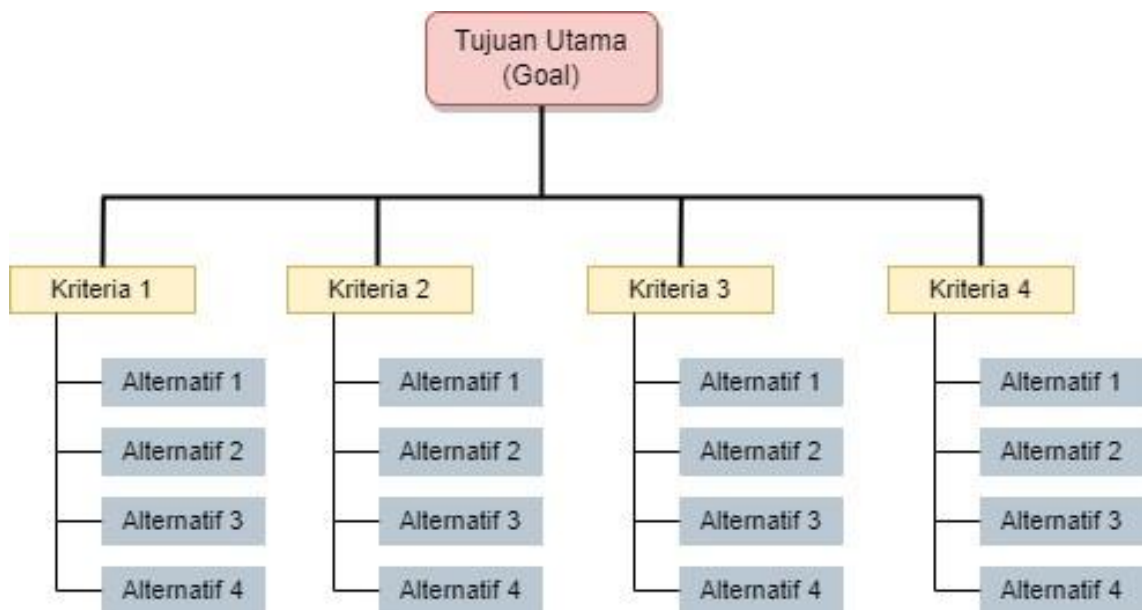
Metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) adalah teknik pengambilan keputusan multi-kriteria yang dikembangkan oleh Thomas L. Saaty. AHP merancang struktur hirarki dari masalah yang kompleks, dimulai dari tujuan utama, diikuti kriteria, sub-kriteria, hingga alternatif di tingkat akhir. Taherdoost (2017) menjelaskan bahwa struktur hirarki ini memungkinkan masalah yang kompleks dipecah menjadi beberapa level, sehingga memudahkan evaluasi dan perbandingan antar elemen secara sistematis

Metode AHP dipilih sebagai pendekatan dalam pengambilan keputusan karena menawarkan beberapa keunggulan (De Felice et al., 2016). Pertama, AHP mampu menyusun struktur keputusan secara hierarkis, mulai dari kriteria utama hingga sub-kriteria yang paling rinci. Kedua, metode ini memperhitungkan tingkat validitas hasil dengan mempertimbangkan batas toleransi inkonsistensi pada kriteria dan alternatif yang digunakan oleh pengambil keputusan. Ketiga, AHP juga menilai ketahanan hasil keputusan melalui analisis sensitivitas, sehingga dapat meningkatkan keandalan dalam proses penentuan alternatif terbaik.

2.3.1 Langkah-Langkah Metode AHP

Menurut Schmidt et. al, (2015), proses AHP secara umum terdiri dari enam tahapan sistematis yang dimulai dari definisi masalah hingga analisis sensitivitas.

1. Tahapan pertama adalah mendefinisikan tujuan utama serta kriteria dan alternatif keputusan dalam bentuk hirarki bertingkat. Struktur hierarki tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Struktur Hierarki AHP

Sumber: De Felice et. al, 2016

- Peneliti melakukan perbandingan berpasangan antar elemen pada tiap tingkat menggunakan skala Saaty (1–9), untuk menilai sejauh mana satu elemen lebih penting dibanding elemen lainnya yang dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Skala Penilaian Perbandingan Berpasangan

Intensitas Kepentingan	Keterangan
1	Kedua elemen sama penting
3	Elemen yang satu sedikit lebih penting dari elemen lainnya
5	Elemen yang satu lebih penting dari elemen lainnya
7	Elemen yang satu sangat penting dari elemen lainnya
9	Elemen yang satu mutlak sangat penting dari elemen lainnya
2, 4, 6, 8	Nilai-nilai antara dua nilai pertimbangan yang berdekatan
Kebalikan	Jika aktivitas i mendapat satu angka dibandingkan dengan aktivitas j, maka j memiliki nilai kebalikan dibandingkan i

Sumber: Schmidt et. al, 2015

- Nilai-nilai tersebut digunakan untuk membentuk matriks perbandingan berpasangan yang kemudian dinormalisasi dan dihitung *eigenvector*-nya untuk menetapkan bobot relatif tiap elemen (prioritas lokal).

4. Nilai bobot ini kemudian dapat dikalikan secara berlapis menuju ke tingkat bawah hirarki hingga diperoleh nilai bobot global untuk setiap alternatif,
5. Selama perhitungan, konsistensi evaluasi diuji dengan menghitung Consistency Index (CI) dan dibandingkan dengan Random Index (RI). Jika rasio CR ($CR = CI/RI$) melebihi ambang 0,1, maka perbandingan harus diperbaiki (kembali digunakan) hingga konsistensi tercapai ($CR \leq 0,1$).
6. Tahap terakhir adalah melakukan analisis sensitivitas untuk menilai stabilitas hasil jika bobot kriteria bervariasi. Hal ini penting untuk memverifikasi apakah peringkat alternatif tetap konsisten ketika terjadi perubahan bobot.

2.3.2 Pemilihan Kriteria dan Alternatif

Pemilihan kriteria dan alternatif dalam AHP didasarkan pada kajian pustaka dan masukan ahli, bukan bersifat subjektif. Sebagai contoh, penelitian di Khenifra, Maroko, menggunakan AHP dengan melibatkan kriteria teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial, termasuk pertimbangan biaya operasional serta kinerja SDM lapangan (Kammou et al., 2024). Sementara itu, studi di Songkhla, Thailand, yang memadukan GIS dan AHP untuk pemilihan lokasi TPA, menekankan pentingnya efisiensi operasional dan biaya sebagai salah satu kriteria utama pengambilan keputusan (Kamdar et al., 2019). Penelitian-penelitian ini memberikan dasar teoritis kuat bahwa kriteria seperti efisiensi waktu dan jarak, beban kerja SDM, serta biaya operasional memang relevan dan sering muncul dalam konteks pengangkutan dan pengelolaan sampah.

Dalam konteks nasional maupun internasional, sejumlah kajian juga menunjukkan bahwa efisiensi rute dan distribusi beban kerja petugas menjadi elemen penting dalam evaluasi transportasi sampah. Efisiensi jarak tempuh terbukti efektif menurunkan konsumsi bahan bakar dan waktu perjalanan, sedangkan pengaturan beban kerja SDM menunjukkan korelasi langsung dengan produktivitas dan keselamatan petugas lapangan (Abdelouhed et al., 2022). Biaya operasional, termasuk perawatan dan bahan bakar, juga kerap menjadi kategori utama dalam studi AHP baik untuk pengangkutan maupun pemilihan lokasi persampahan (Ramu et al., 2023).

2.3.3 Software Expert Choice

Expert Choice 2000 merupakan salah satu perangkat lunak yang dirancang untuk mendukung proses pengambilan keputusan berbasis metode AHP. Dengan fitur *pairwise comparison*, pengguna dapat melakukan perbandingan berpasangan antar kriteria secara sistematis. Perangkat lunak ini mempermudah proses pembobotan karena hasil perhitungan disusun secara otomatis dan konsistensi responden dapat langsung dianalisis. Hal ini tidak hanya mempercepat pengolahan data, tetapi juga meningkatkan keakuratan hasil analisis (Rezaei, 2015). Visualisasi data dalam bentuk grafik sensitivitas, seperti *performance*, *dynamic*, *gradient*, *head-to-head*, dan grafik dua dimensi, membantu pengambil keputusan memahami dampak perubahan bobot terhadap alternatif pilihan (Mazurek et al., 2021).

Salah satu keunggulan dari Expert Choice adalah kemampuannya dalam mendeteksi inkonsistensi pada input responden. Sistem secara otomatis akan menandai nilai perbandingan yang tidak logis atau melampaui ambang toleransi ketidakkonsistenan, sehingga responden dapat diminta untuk meninjau kembali pilihannya. Fitur ini sangat penting untuk menjaga validitas keputusan yang dihasilkan, terutama dalam kasus di mana jumlah kriteria dan alternatif yang dipertimbangkan cukup banyak. Dengan demikian, penggunaan Expert Choice dalam AHP memungkinkan penyusunan keputusan yang lebih rasional, terstruktur, dan dapat dipertanggungjawabkan secara kuantitatif (Rezaei, 2015; Mazurek et al., 2021).