JURNAL OPTIMALISASI
Teknik Industri
Journal homepage : http://jurnal.utu.ac.id/joptimalisasi
E - ISSN - 2502 - 0501
P - ISSN - 2477 - 5479

Evaluasi Kualitas Data Timbulan Sampah dengan Tahap *Define–Measure–Analyze* (DMA) dan Implikasinya terhadap Perencanaan Kapasitas Pengangkutan

Nissa Prasanti[1*], Andriansyah Hamid[2], Arrazy Elba Ridha[3]

[1,3] *Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Meulaboh, Indonesia*
[2] *Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia*

*Corresponding author: nissa@utu.ac.id

ARTICLE INFO

Received: 28-10-2026
Revision: 18-11-2026
Accepted: 21-11-2026

Keywords:
kualitas data
timbulan sampah
DMAIC

ABSTRACT

Data timbulan sampah merupakan masukan dasar perencanaan armada pengangkutan dan lahan pemrosesan akhir, tetapi kualitas data yang dilaporkan daerah jarang dievaluasi. Penelitian ini bertujuan mengukur kelengkapan dan tingkat cacat data timbulan sampah 23 kabupaten/kota di Provinsi Aceh tahun 2011–2024, menguji kekokohan hasilnya, dan mengilustrasikan dampaknya pada kebutuhan kapasitas. Data sekunder dari Portal Satu Data Aceh (BPS Aceh dan Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Aceh) dianalisis dengan tahap Define–Measure–Analyze (DMA) dari kerangka DMAIC; tahap Improve dan Control tidak dilaksanakan dan hanya disajikan sebagai rekomendasi tindak lanjut. Tiga jenis cacat didefinisikan (tidak melapor, skala menyimpang, lonjakan) dan diukur dengan DPMO dan level sigma, diuji pada 27 skenario, lalu dibandingkan dengan angka standar Permen LHK No. 6 Tahun 2022 dan SNI 8632:2018. Dari 322 catatan kabupaten/kota-tahun, 52% mengandung sedikitnya satu cacat (DPMO 252.324; level sigma sekitar 2,17 dengan geseran konvensional 1,5; rentang antar skenario 1,94–2,31). Pada 2023–2024, seluruh nilai 0 pada dataset BPS Aceh bernilai positif pada dataset DLHK Aceh sehingga dibaca sebagai data tidak terinput. Total timbulan provinsi naik 3,0 kali dari 2021 ke 2022, dan satuan dataset BPS Aceh tidak konsisten antar tahun. Pada 2023, 17 dari 23 daerah berada pada dua rasio tetap terhadap estimasi standar, konsisten dengan penurunan dari faktor standar. Kebutuhan armada provinsi bergeser dari 295 hingga 843 unit menurut pilihan data dan parameter; variabilitas densitas dan ritase berdampak sebanding dengan pilihan data timbulan. Satuan dataset BPS Aceh hanya dapat dikonfirmasi untuk 2024, sehingga temuan pada tahun lain bersifat indikatif.

1. PENDAHULUAN

Data timbulan sampah merupakan masukan dasar perencanaan sistem persampahan, mulai dari armada pengangkut hingga lahan pemrosesan akhir. Kebutuhan lahan urug, misalnya, dapat dianalisis berdasarkan timbulan sampah [1], sedangkan perencanaan armada pengumpulan telah dikaji dengan berbagai pendekatan pemodelan, antara lain model fuzzy untuk armada campuran [2]. Penyelenggaraan pengelolaan sampah rumah tangga menjadi kewenangan dan kewajiban pemerintah kabupaten/kota [3]–[5], sehingga perencanaan yang bertumpu pada data yang tidak akurat berisiko menghasilkan kapasitas yang kurang atau berlebih dengan biaya yang ditanggung daerah.

Timbulan sampah umumnya diprediksi dengan model, seperti jaringan saraf tiruan [6], model empiris laju timbulan rumah tangga [7], dan kerangka Bayesian multilevel [8]. Model-model tersebut bergantung pada ketersediaan data timbulan yang andal. Di Indonesia, laju timbulan umumnya berupa angka estimasi dari rujukan nasional [9], yaitu SNI 19-3983-1995 [10], SNI 8632:2018 [11], dan Permen LHK No. 6 Tahun 2022 tentang SIPSN [12], yang mengelompokkan laju timbulan menurut jumlah penduduk. Permen LHK menetapkan 0,4; 0,5; 0,6; dan 0,7 kg/orang/hari berturut-turut untuk kota kecil, sedang, besar, dan metropolitan (faktor Tier 1, tabel faktor estimasi pada Lampiran) [12], sebagaimana juga dirangkum dalam kebijakan ringkas Kementerian PPN/Bappenas [9]. Peraturan yang sama mendorong penggunaan faktor estimasi lokal (Tier 2) atau hasil sampling (Tier 3), dan membolehkan faktor Kementerian hanya bila faktor lokal tidak tersedia [12]. Kajian itu menemukan bahwa hanya 1 dari 13 kota/kabupaten yang diamati melakukan sampling timbulan dalam lima tahun terakhir, padahal SNI 8632:2018 mewajibkannya, dan menyimpulkan bahwa tersedianya angka standar justru memberi alasan untuk memakai estimasi [9]. Sampling selama satu minggu atau 8 hari memang menuntut sumber daya yang besar [13]. Hasil sampling di lima kota dan satu kabupaten juga menunjukkan bahwa laju timbulan tidak selalu sebanding dengan jumlah penduduk [9].

Secara internasional, keandalan estimasi timbulan per kapita di negara berkembang dinilai rendah karena keterbatasan jembatan timbang, rendahnya efisiensi pengumpulan, dan sistem kompilasi data yang tidak lengkap, sehingga perbandingan antar wilayah sulit dilakukan [14]. Gambaran global pengelolaan sampah padat hingga 2050 disajikan oleh Kaza dkk. [15], sedangkan pengelolaan sampah perkotaan di Indonesia telah dikaji antara lain dari sisi potensi gas TPA [16] dan perspektif budaya [17]. Studi yang memodelkan timbulan di Aceh memperlakukan data tersebut sebagai masukan: Sukirman dkk. [18] menganalisis pengaruh PDRB, jumlah penduduk, dan pendidikan terhadap volume timbulan di Aceh periode 2018–2020 dengan regresi data panel, tanpa mengevaluasi kualitas data timbulan itu sendiri. Studi pada ibu kota provinsi di Pulau Sumatera, dengan pengecualian Banda Aceh, menemukan kepadatan penduduk sebagai faktor sosio-demografi dan sosio-ekonomi yang paling berpengaruh terhadap timbulan [19]. Menurut kajian UJDIH BPK Perwakilan Aceh, SIPSN hanya menyediakan data timbulan untuk tujuh kabupaten/kota di Aceh dengan total 268.786,56 ton pada 2021 [20].

Dari sudut pandang Teknik Industri, pelaporan data timbulan dapat diperlakukan sebagai proses dengan keluaran yang kualitasnya dapat diukur: setiap pelaporan oleh satu kabupaten/kota pada satu tahun adalah satu unit, dan ketidaklengkapan, skala yang menyimpang, serta perubahan yang tidak wajar adalah cacat. Kualitas data publik dapat dinilai dengan kerangka pengukuran kualitas data terbuka [21] dan dimensi kualitas (meta)data [22], dan pada data dari administrasi terdesentralisasi seperti pemerintah kota, pelaporan yang kurang oleh sebagian pemasok data merupakan masalah yang dikenal [23]. Varian DMAIC telah diusulkan untuk lingkungan data besar [24], dan ukuran sigma serta DPMO dipakai untuk menilai kinerja laboratorium klinis [25]. Alasan memakai kerangka mutu industri pada data administrasi publik lokal ada tiga. Pertama, pelaporan tahunan oleh tiap kabupaten/kota berulang dan seragam bentuknya sehingga dapat diperlakukan sebagai proses dengan unit dan cacat yang dapat dihitung. Kedua, DMAIC menuntut cacat didefinisikan dan diukur sebelum penyebab dan perbaikan dibahas, urutan yang sesuai untuk data sekunder yang tidak dapat diaudit. Ketiga, DPMO menyatukan jenis cacat yang berbeda dalam satu ukuran yang dapat dibandingkan antar tahun dan daerah. Penerapan Lean, Six Sigma, dan Lean Six Sigma pada sektor administrasi publik telah ditinjau secara sistematis atas 56 artikel terbitan 2004–2020 [26], dan pejabat sektor publik yang diwawancarai pada studi di pemerintah kota menunjukkan minat pada Lean Six Sigma [27]; kedua studi itu membahas perbaikan proses layanan, bukan evaluasi kualitas data. Penelusuran awal melalui Crossref pada 27 Oktober 2026 dengan tujuh kombinasi kata kunci berbahasa Inggris dan Indonesia (antara lain “Six Sigma”, “DPMO”, “data quality”, “municipal solid waste”, dan “kualitas data timbulan sampah”) tidak menemukan penerapan kerangka ini untuk mengevaluasi data persampahan daerah; penelusuran ini terbatas pada Crossref.

Portal Satu Data Aceh menyediakan data timbulan kabupaten/kota 2011–2024 dan data penduduk BPS Aceh, tetapi penelaahan awal menunjukkan jumlah daerah yang melapor berubah dari tahun ke tahun dan besaran nilai antar tahun tampak tidak konsisten. Penelitian ini bertujuan (1) mengukur kelengkapan dan tingkat cacat data timbulan sampah kabupaten/kota di Provinsi Aceh 2011–2024; (2) menguji kekokohan hasil terhadap definisi cacat dan asumsi satuan; (3) mengidentifikasi indikasi bahwa sebagian angka diturunkan dari faktor standar, bukan diukur; dan (4) mengilustrasikan dampak pilihan data dan parameter terhadap kebutuhan kapasitas pengangkutan dan lahan pemrosesan akhir.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Rancangan dan sumber data

Penelitian ini merupakan analisis data sekunder atas 23 kabupaten/kota di Provinsi Aceh untuk periode 2011–2024 (analisis kapasitas memakai tahun dasar 2023) dengan kerangka DMAIC (Define–Measure–Analyze–Improve–Control). Penelitian ini berfokus pada tahap Define, Measure, dan Analyze (DMA). Define dan Measure dilakukan secara kuantitatif; Analyze berupa analisis pola cacat, uji sensitivitas, pembandingan dengan angka standar, dan analisis akar penyebab hipotetis (diagram Fishbone dan 5 Whys). Tahap Improve dan Control tidak dilaksanakan: keduanya disajikan pada subbagian 3.7 hanya sebagai rekomendasi tindak lanjut yang belum diuji. Seluruh data yang dipakai adalah data sekunder yang dipublikasikan oleh instansi (Tabel 1). Penulis tidak mengumpulkan data primer, tidak mengaudit proses

pengumpulan data di tingkat kabupaten/kota, dan tidak berwenang menyatakan bahwa suatu angka benar atau salah. Istilah cacat dalam artikel ini merujuk pada ketidaklengkapan atau ketidakkonsistenan data sebagaimana dipublikasikan pada tanggal akses, bukan pada kesalahan pengukuran di lapangan.

Tabel 1. Sumber data sekunder yang dipakai.

Data	Sumber	Cakupan	Catatan
Timbulan sampah (BPS Aceh)	Badan Pusat Statistik Aceh, Portal Satu Data Aceh, dataset "Jumlah Timbulan Sampah (m^3/hari)" (dibuat 4 Sep 2025; diperbarui 22 Sep 2025; CC-BY) [28]	23 kab/kota, 2011–2024 (322 catatan)	Nilai 0 dianggap tidak melapor; satuan tidak konsisten antar tahun
Timbulan harian dan tahunan (DLHK Aceh)	Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Aceh, Portal Satu Data Aceh, dataset "Volume Timbulan Sampah" (diperbarui 11 Apr 2025; CC-BY); nama berkas data_timbulan_sampah_sipsn_klhk_aceh_2023 [29]	23 kab/kota, 2023–2024	Ton/hari dan ton/tahun; bersumber SIPSN KLHK menurut nama berkas
Volume timbulan provinsi (DLHK Aceh)	Dataset yang sama, resource "Volume Timbulan Sampah Aceh" [29]	Provinsi, 2019–2023	Ton/tahun
Jumlah penduduk	BPS Aceh melalui Portal Satu Data Aceh, dataset "Jumlah Penduduk Menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Aceh" (CC-BY; diperbarui 10 Sep 2025) [30]	23 kab/kota, 2010–2024	Jenis angka (proyeksi/sensus) tidak dijelaskan portal

Seluruh berkas diunduh pada 26–27 Oktober 2026 dan disimpan tanpa perubahan beserta hash SHA-256-nya (Lampiran tersedia atas permintaan penulis).

2.2 Definisi cacat (Define)

Unit analisis adalah satu catatan kabupaten/kota-tahun (n = 322). Tiga jenis cacat didefinisikan. Cacat T (tidak melapor) adalah nilai pada portal yang sama dengan 0. Nilai 0 dibaca sebagai data yang tidak terinput, bukan ketiadaan pengangkutan: pada 2023 dan 2024, seluruh 33 nilai 0 dataset BPS Aceh (21 dan 12) berpadanan dengan nilai positif pada dataset DLHK Aceh untuk daerah dan tahun yang sama (subbagian 3.1). Untuk 2011–2022 tidak ada pembanding dan portal tidak menjelaskan arti nilai 0, sehingga pembacaan yang sama bersifat dugaan. Cacat S (skala menyimpang) adalah timbulan per kapita di luar rentang 0,05–3,0 kg/orang/hari. Cacat L (lonjakan) adalah perubahan nilai lebih dari 5 kali (naik) atau kurang dari 1/5 (turun) dibanding tahun sebelumnya, apabila kedua tahun melapor. Rentang dan ambang ini ditetapkan penulis, tidak berasal dari regulasi, dan sensitivitasnya diuji pada subbagian 2.5.

Dasar penetapan rentang dan ambang. Rentang S dimaksudkan menangkap kesalahan skala, bukan variasi timbulan yang wajar. Batas bawah 0,05 berada di bawah rata-rata terendah antarnegara (0,11 kg/orang/hari) dan sekitar seperdelapan faktor terkecil Permen LHK (0,4), sedangkan batas atas 3,0 berada di bawah rata-rata tertinggi antarnegara (4,54) dan lebih dari empat kali faktor tertinggi Permen LHK (0,7) [12], [15]. Rasio batas atas terhadap batas bawah sekitar 60 kali, sedangkan tertukarnya satuan kg dan ton menggeser nilai per kapita 1.000 kali, sehingga kesalahan satuan terdeteksi tanpa menandai variasi alami yang lebih kecil. Ambang L 5 kali dipilih karena perubahan jumlah penduduk antar tahun pada 322 pasangan kabupaten/kota-tahun BPS Aceh hanya 0,91–1,23 kali, sehingga perubahan timbulan sebesar itu tidak dapat dijelaskan oleh perubahan penduduk.

2.3 Satuan data

Dataset BPS Aceh berlabel m^3/hari, sedangkan dataset DLHK Aceh yang bersumber dari SIPSN KLHK berlabel ton dan memuat pasangan timbulan harian dan tahunan; harian × 365 sama dengan tahunan pada seluruh 46 baris (2023–2024; selisih di bawah 1%), sehingga satuannya ton/hari. Pada 2024, 10 dari 11 nilai dataset BPS Aceh identik dengan dataset DLHK Aceh, sehingga dataset BPS Aceh pada tahun itu berskala ton/hari meskipun berlabel m^3/hari. Untuk tahun lain tidak ada pembanding yang setara. Karena itu cacat S dihitung per tahun dengan satuan (kg/hari atau ton/hari) yang menghasilkan jumlah catatan per kapita dalam rentang kewajaran terbanyak. Pemilihan ini merupakan aturan, bukan fakta, dan hasilnya dibandingkan dengan dua skenario seragam (semua kg/hari dan semua ton/hari).

2.4 Pengukuran: DPMO dan level sigma (Measure)

Peluang cacat dihitung per catatan: cacat T dapat dievaluasi pada setiap catatan; cacat S pada catatan yang melapor; dan cacat L pada catatan yang kedua tahunnya melapor. Dengan demikian:

$$DPMO = (\text{jumlah cacat} / \text{jumlah peluang yang dapat dievaluasi}) \times 10^6 \quad (1)$$

$$\text{Level sigma} = \Phi^{-1}(1 - \text{cacat/peluang}) + 1{,}5 \quad (2)$$

dengan Φ^{-1} adalah invers distribusi normal baku dan 1,5 adalah geseran konvensional. Geseran 1,5 SD ini dikritik karena mengandaikan keluaran yang berdistribusi normal dan perlu didukung bukti untuk setiap proses [31]. Data pelaporan dalam penelitian ini tidak memenuhi asumsi tersebut, sehingga DPMO diperlakukan sebagai ukuran utama dan level

sigma sebagai padanan konvensional; tanpa geseran, level sigma keseluruhan adalah 0,67 (rentang 0,44–0,81 pada asumsi satuan otomatis). Karena peluang cacat didefinisikan peneliti dan data bersifat sekunder, DPMO dan level sigma ditafsirkan sebagai indikator relatif antar tahun dan antar daerah, bukan kapabilitas proses mutlak. Pada tahun tanpa cacat, level sigma tidak terdefinisi. Cacat diringkas dengan diagram Pareto dan peta panas daerah × tahun.

2.5 Uji sensitivitas dan analisis akar penyebab (Analyze)

Hasil diuji pada 27 skenario: tiga asumsi satuan (otomatis per tahun, seluruhnya kg/hari, seluruhnya ton/hari), tiga rentang S (0,05–3; 0,1–2; 0,02–5 kg/orang/hari), dan tiga ambang L (3×, 5×, 10×). Kekokohan dinilai dari rentang DPMO dan level sigma serta korelasi Spearman urutan tahun dan urutan daerah terhadap skenario dasar. Penyebab cacat tidak dapat diaudit dari data sekunder, sehingga analisis akar penyebab disajikan sebagai hipotesis terstruktur: diagram Fishbone (Ishikawa) memetakan kandidat penyebab cacat T, S, dan L menurut enam kategori, dan 5 Whys menelusuri dua rantai penyebab. Setiap penyebab diberi tanda (D) bila didukung pola data atau dokumen yang dikutip dan (H) bila merupakan hipotesis yang belum diuji.

2.6 Pembandingan dengan angka standar

Timbulan per kapita 2023 dari dataset DLHK Aceh (G1) dibandingkan dengan estimasi jumlah penduduk × faktor Permen LHK No. 6 Tahun 2022 menurut kelas penduduk (G2): kecil < 100.000; sedang 100.000–500.000; besar 500.000–1.000.000 [9], [12]. Rasio G1/G2 dengan pita ±25% dipakai sebagai acuan visual. Pola pengelompokan rasio dipakai sebagai indikasi, bukan pembuktian, bahwa sebagian angka diturunkan dari faktor tetap. Faktor Permen LHK diambil dari teks aslinya (tabel faktor estimasi pada Lampiran) [12] dan sesuai dengan ringkasan Kementerian PPN/Bappenas [9]. Teks asli SNI 8632:2018 tidak dapat diperoleh penulis, sehingga angka SNI dikutip dari ringkasan tersebut [9].

2.7 Skenario kapasitas

Pada tahun dasar 2023 dibangun empat skenario timbulan: G1 (data DLHK Aceh), G2 (Permen LHK), serta G3 dan G4 (batas bawah dan batas atas rentang SNI 8632:2018 menurut kelas penduduk: 0,60–0,75 kg/orang/hari untuk kota kecil dan sedang, 0,65–0,80 untuk kota besar dan metropolitan) [11]. Kebutuhan armada tiap kabupaten/kota dihitung dengan:

$$N = \lceil 1.000 \cdot Q \cdot c \,/\, (V \cdot \rho \cdot r \cdot a) \rceil \quad (3)$$

dengan N jumlah armada (unit), Q timbulan (ton/hari), c cakupan layanan (fraksi, 0–1), V kapasitas truk (6 m^3 per rit), ρ densitas sampah di truk (250–390 kg/m^3), r ritase (4–4,7 rit/hari), a ketersediaan armada (fraksi, 0,8), dan 1.000 faktor konversi ton ke kg sehingga pembilang dan penyebut sama-sama berdimensi kg/hari. Kapasitas truk 6 m^3 dan ritase 4–4,7 rit/hari mengacu pada studi armada pengangkutan di Kota Tebing Tinggi, yang menghitung 4,675 rit/hari untuk 1,476 jam per rit pada 8 jam kerja [32]. Rentang densitas merupakan asumsi penulis; batas bawahnya sebanding dengan densitas terukur 264 kg/m^3 pada studi TPA Tambakrigadung [33], yang diukur di TPA dan bukan di truk. Ketersediaan armada 0,8 juga asumsi penulis. Kebutuhan lahan pemrosesan akhir per tahun dihitung dari timbulan, densitas pemadatan 0,7 ton/m^3, tanah penutup 20% dari volume sampah, tinggi timbunan 15 m, dan sarana pendukung 30% dari luas TPA; densitas, tanah penutup, dan sarana mengikuti studi kelayakan TPA Pekanbaru [34], sedangkan tinggi timbunan dipilih penulis (studi tersebut memakai 20 m). Cakupan layanan diasumsikan 100%, sehingga hasil merupakan batas atas kebutuhan; sensitivitas terhadap cakupan 60–80% disajikan pada subbagian 3.5 sebagai angka ilustrasi. Hasil diperlakukan sebagai ilustrasi sensitivitas perencanaan, bukan rekomendasi kapasitas.

2.8 Batasan penelitian dan replikasi

Batasan utama: (1) satuan dataset BPS Aceh hanya dapat dikonfirmasi untuk 2024 melalui kesamaan dengan dataset DLHK Aceh, sehingga cacat S dan L pada tahun lain dilaporkan sebagai indikasi; (2) penyebab cacat tidak dapat dipastikan dari data sekunder; (3) rentang S, ambang L, dan peluang cacat ditentukan peneliti; (4) parameter kapasitas berasal dari studi lokal dan dua asumsi penulis (rentang densitas dan ketersediaan armada); (5) kebenaran angka tidak dapat ditentukan tanpa data primer; (6) faktor Permen LHK diverifikasi pada teks aslinya, tetapi angka SNI 8632:2018 dikutip dari ringkasan kebijakan karena teks aslinya tidak dapat diperoleh; dan (7) analisis akar penyebab bersifat hipotetis dan tidak diaudit. Kesimpulan dibatasi pada data sebagaimana dipublikasikan pada tanggal akses dan dapat berubah bila pengelola memperbarui dataset. Berkas mentah, hash SHA-256, dan skrip analisis (Python) tersedia atas permintaan kepada penulis agar seluruh angka dapat dihasilkan ulang.

3. RESULT AND DISCUSSION/HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kelengkapan pelaporan dan tingkat cacat

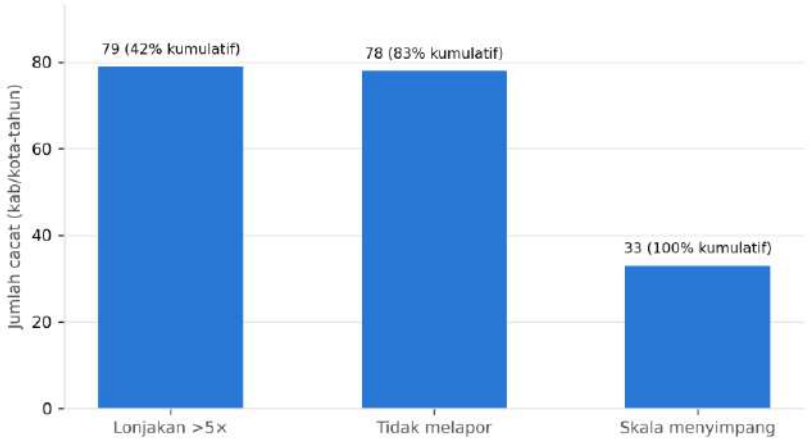
Dari 322 catatan kabupaten/kota-tahun, 155 catatan (48%) bebas cacat dan 167 catatan (52%) mengandung sedikitnya satu cacat. Terdapat 190 cacat dari 753 peluang yang dapat dievaluasi, setara DPMO 252.324 atau level sigma sekitar 2,17 (Tabel 2). Menurut jenisnya (Gambar 1), cacat lonjakan (L) berjumlah 79, tidak melapor (T) 78, dan skala menyimpang (S) 33; L dan T bersama-sama 83% seluruh cacat.

Jumlah daerah yang melapor tidak stabil: 12 daerah pada 2012, 16 pada 2017, dan 23 pada 2014 serta 2018–2021, lalu turun menjadi 14 pada 2022 dan 11 pada 2024. Pada dataset BPS Aceh hanya 2 daerah tercatat pada 2023, padahal dataset DLHK Aceh memuat seluruh 23 daerah untuk tahun itu, sehingga cacat T pada 2023 (21 daerah) mencerminkan perbedaan antar dataset portal: seluruh 21 nilai 0 itu bernilai positif pada dataset DLHK Aceh, sehingga bukan ketiadaan pengangkutan. Hal yang sama berlaku pada 2024 (12 dari 12 nilai 0). Untuk 2011–2022 tidak ada dataset pembanding, sehingga apakah nilai 0 berarti data tidak terinput atau tidak ada pengangkutan tidak dapat dipastikan; pembacaannya sebagai tidak melapor adalah dugaan. Tahun 2019 dan 2020 tidak mengandung cacat; DPMO tertinggi tercatat pada 2023 (807.692), 2021 (463.768), dan 2017 (384.615).

Tabel 2. Cacat pelaporan timbulan sampah per tahun (23 kabupaten/kota; asumsi satuan otomatis).

Tahun	Melapor	T	S	L	Peluang	Cacat	DPMO	Sigma	Satuan terpilih
2011	19	4	1	0	42	5	119.048	2,68	ton
2012	12	11	1	2	46	14	304.348	2,01	ton
2013	18	5	3	2	49	10	204.082	2,33	ton
2014	23	0	0	6	64	6	93.750	2,82	ton
2015	19	4	7	10	61	21	344.262	1,90	ton
2016	18	5	7	7	57	19	333.333	1,93	ton
2017	16	7	3	10	52	20	384.615	1,79	kg
2018	23	0	0	15	62	15	241.935	2,20	ton
2019	23	0	0	0	69	0	0	–	ton
2020	23	0	0	0	69	0	0	–	ton
2021	23	0	11	21	69	32	463.768	1,59	ton
2022	14	9	0	6	51	15	294.118	2,04	ton
2023	2	21	0	0	26	21	807.692	0,63	ton
2024	11	12	0	0	36	12	333.333	1,93	ton
Semua	–	78	33	79	753	190	252.324	2,17	

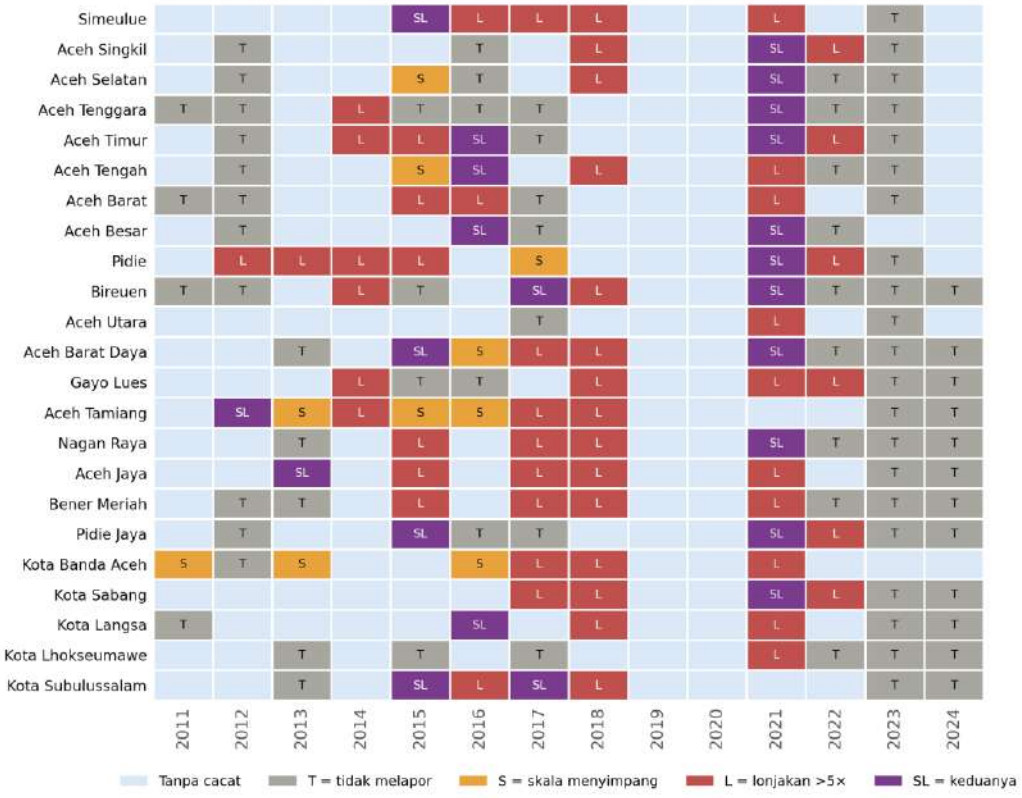
T = tidak melapor; S = skala menyimpang; L = lonjakan. Satuan terpilih ditentukan aturan pada subbagian 2.3. Sigma memakai geseran konvensional 1,5; "–" = tidak terdefinisi (tanpa cacat).



Gambar 1. Diagram Pareto jenis cacat pelaporan timbulan sampah (n = 190 cacat).

Cacat lonjakan terkonsentrasi pada tahun tertentu: 10 pada 2017, 15 pada 2018, dan 21 pada 2021, hampir serentak di banyak daerah (Gambar 2). Pola serentak ini lebih mengarah pada perubahan satuan atau skala yang menimpa banyak daerah sekaligus daripada kesalahan input yang berdiri sendiri-sendiri (dugaan). Menurut daerah, Bireuen mengandung cacat pada 10 dari 14 tahun, sedangkan Aceh Utara paling jarang (3 tahun). Bireuen dan Pidie, dua daerah dengan jumlah penduduk hampir sama (436.400 dan 435.300 jiwa pada 2023; kelas kota sedang), memperlihatkan dua pola cacat yang berbeda. Pada Bireuen nilai 0 muncul pada 2011, 2012, 2015, dan 2022–2024, diselingi lonjakan dari 130,5 menjadi 1.241,5 (2013–2014), dari 640 menjadi 10.101 (2016–2017), dan penurunan dari 526 menjadi 16,2 (2020–2021). Pada Pidie tidak ada nilai 0 sebelum 2023, tetapi nilai berubah lebih dari 5 kali pada setiap tahun 2012–2015, lalu naik 82,6 kali dari 553 menjadi 45.660 pada 2021 dan turun ke 175,8 pada 2022. Pada dataset DLHK Aceh 2023, rasio terhadap estimasi Permen LHK ialah 0,73 untuk Bireuen dan 0,81 untuk Pidie (per kapita 0,36 dan 0,41 kg/orang/hari), sehingga keduanya tidak menyimpang jauh pada data yang lebih baru (subbagian 3.4). Penyebab pola ini tidak dapat ditentukan

dari data sekunder; konteks kualitatif tata kelola kedua daerah, misalnya cara pencatatan atau pergantian pengelola data, tidak tersedia pada sumber yang dipakai dan perlu dikonfirmasi kepada pengelola data.



Gambar 2. Peta cacat pelaporan menurut kabupaten/kota dan tahun (T, S, L; SL = S dan L bersamaan).

3.2 Ketidakkonsistenan satuan antar tahun dan antar dataset

Tabel 3 menunjukkan persentase catatan yang melapor dan menghasilkan timbulan per kapita dalam rentang 0,05–3 kg/orang/hari bila nilai dianggap kg/hari atau ton/hari. Hanya tahun 2017 yang sesuai dengan satuan kg/hari (81%), sedangkan sebagian besar tahun lain sesuai dengan ton/hari (83–100% pada 2011–2014, 2018–2020, 2022, dan 2024; catatan 2023 hanya n = 2). Tahun 2015, 2016, dan 2021 sesuai sebagian pada kedua satuan (52–63% pada ton/hari), yang kemungkinan mencerminkan nilai bersatuan campuran dalam tahun yang sama (dugaan, tidak dapat dipastikan). Tidak ada satu satuan seragam yang menjelaskan seluruh deret.

Tabel 3. Persentase catatan melapor dengan per kapita dalam rentang 0,05–3 kg/orang/hari menurut asumsi satuan.

Tahun	Jumlah melapor	Jika kg/hari (%)	Jika ton/hari (%)
2011	19	0	95
2012	12	8	92
2013	18	6	83
2014	23	0	100
2015	19	21	63
2016	18	22	61
2017	16	81	6
2018	23	0	100
2019	23	0	100
2020	23	0	100
2021	23	17	52
2022	14	0	100
2023	2	0	100
2024	11	0	100

Catatan 2023 (n = 2) tidak dapat ditafsirkan.

Pembandingan antar dataset portal memperkuat temuan ini. Pada 2024, 10 dari 11 nilai dataset BPS Aceh identik dengan dataset DLHK Aceh yang berskala ton/hari, sehingga label m^3/hari pada dataset BPS Aceh tidak sesuai untuk tahun tersebut; satu-satunya selisih ialah Banda Aceh (81,2 vs 259,4 ton/hari). Pada 2023, nilai Banda Aceh (131,4 vs 255,8 ton/hari) dan Aceh Besar (50,1 vs 148,1 ton/hari) juga berbeda antar dataset. Total provinsi pada dataset DLHK Aceh bergerak 254.831 ton/tahun (2019), 247.625 (2020), 196.604 (2021), 598.630 (2022), dan 920.436 (2023), yaitu naik 3,0 kali dari 2021 ke 2022 dan 1,5 kali ke 2023. Jumlah seluruh nilai dataset BPS Aceh pada 2019 dan 2020 sekitar 10 kali total harian DLHK Aceh (698 dan 678 ton/hari) dan pada 2021 sekitar 341 kali, sedangkan pada 2022 sekitar 0,95 kali dengan hanya 14 daerah melapor, sehingga kedua dataset tidak dapat direkonsiliasi di luar 2024.

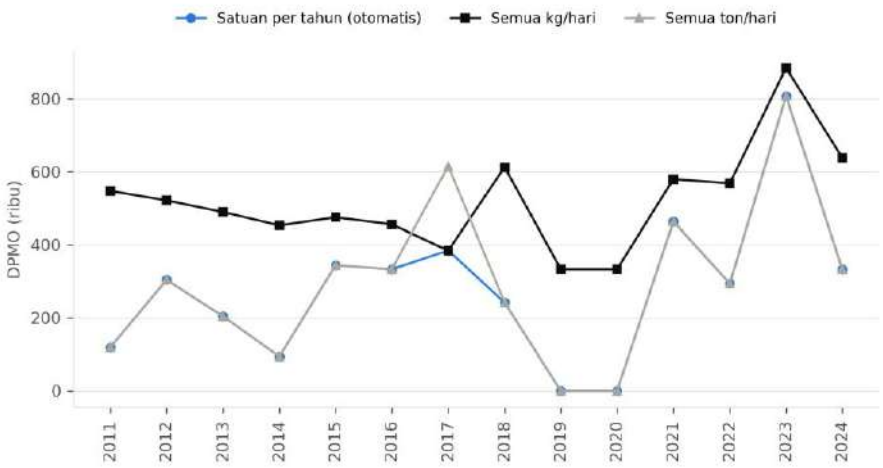
3.3 Uji sensitivitas

Pada asumsi satuan otomatis, DPMO berkisar 209.827–329.349 dan level sigma 1,94–2,31 di seluruh kombinasi rentang S dan ambang L (Tabel 4, Gambar 3). Cacat T tetap 78 pada semua skenario. Urutan tahun tetap mirip skenario dasar (Spearman 0,76–1,00) dan urutan daerah juga (0,69–1,00). Rentang S yang lebih sempit (0,1–2) menaikkan cacat S dari 33 menjadi 77, sehingga angka S sebaiknya dilaporkan sebagai rentang (19–85). Asumsi seluruh ton/hari memberi hasil serupa (DPMO 227.092–339.973), sedangkan asumsi seluruh kg/hari memberi DPMO 470.120–521.912 dan urutan daerah yang praktis acak (Spearman −0,08 hingga 0,26) karena hampir seluruh catatan menjadi cacat S (215–222). Skenario terakhir ditolak karena hanya 0–22% catatan yang masuk rentang kewajaran pada 13 dari 14 tahun.

Tabel 4. Ringkasan uji sensitivitas (27 skenario).

Asumsi satuan	Skenario	DPMO	Sigma	Cacat S	Spearman daerah
Otomatis per tahun	9	209.827–329.349	1,94–2,31	19–77	0,69–1,00
Seluruh ton/hari	9	227.092–339.973	1,91–2,25	32–85	0,62–0,93
Seluruh kg/hari	9	470.120–521.912	1,45–1,57	215–222	−0,08–0,26

Skenario dasar: rentang S 0,05–3; ambang L 5×; satuan otomatis (DPMO 252.324; sigma 2,17). Spearman = korelasi urutan daerah terhadap skenario dasar.

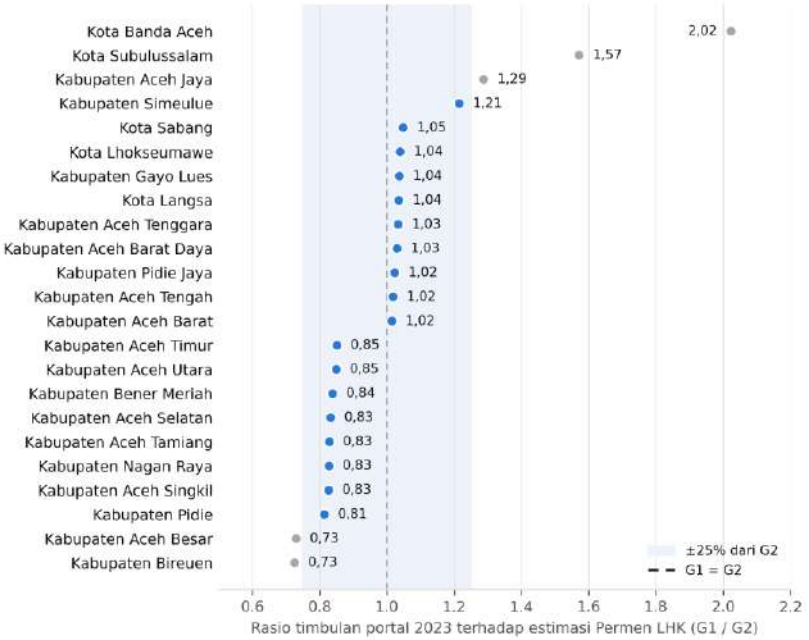


Gambar 3. DPMO per tahun menurut asumsi satuan (rentang S 0,05–3; ambang L 5×).

3.4 Pola faktor tetap pada data 2023

Timbulan per kapita 2023 pada dataset DLHK Aceh (ton/hari; nama berkas menunjukkan sumber SIPSN KLHK) berada pada 0,36–0,52 kg/orang/hari untuk 21 dari 23 daerah, hampir seragam. Rasio terhadap estimasi Permen LHK (G1/G2) membentuk dua gugus rapat: sembilan daerah pada 1,02–1,05 dan delapan daerah pada 0,81–0,85, sehingga 17 dari 23 daerah berada pada dua rasio tetap (Gambar 4). Dua daerah lain berada pada 0,73 (Bireuen dan Aceh Besar), dan empat daerah menyimpang jauh: Simeulue 1,21; Aceh Jaya 1,29; Subulussalam 1,57; dan Banda Aceh 2,02 (255,8 ton/hari, setara 1,01 kg/orang/hari). Pola dua gugus ini konsisten dengan penurunan angka dari jumlah penduduk dikali faktor tetap, sebagaimana Permen LHK No. 6 Tahun 2022 mengatur faktor estimasi Tier 1 untuk pelaporan [9]. Rumus yang dipakai pengelola data tidak diketahui sehingga hal ini masih dugaan. Dataset BPS Aceh memuat nilai Banda Aceh 2023 sebesar 131,4 ton/hari, mendekati estimasi standar (126,5 ton/hari), sehingga angka 255,8 ton/hari pada dataset DLHK Aceh perlu dikonfirmasi. Bila benar sebagian besar angka 2023 diturunkan dari penduduk dikali faktor tetap, data tersebut tidak memberi informasi tambahan tentang timbulan sebenarnya, dan pelaporan menjadi sirkular: estimasi dari standar dilaporkan kembali sebagai data, lalu dipakai untuk merencanakan kapasitas. Sirkularitas ini dapat menguat sendiri (feedback loop): angka faktor tetap dilaporkan sebagai timbulan; angka itu menjadi dasar perencanaan armada dan lahan; karena tidak ada ukuran independen, selisihnya terhadap timbulan sebenarnya tidak pernah terdeteksi; dan pelaporan periode berikutnya kembali memakai faktor yang sama karena itu cara yang paling mudah. Permen LHK No.

6 Tahun 2022 sendiri membedakan Tier 1 (penduduk × faktor Kementerian), Tier 2 (faktor lokal), dan Tier 3 (hasil sampling) serta mendorong faktor lokal [12], tetapi kajian Bappenas menemukan hanya 1 dari 13 daerah yang melakukan sampling dalam lima tahun terakhir [9]. Pada Tier 1, kesalahan pada jumlah penduduk atau kelas penduduk merambat langsung ke estimasi kapasitas tanpa koreksi. Mekanisme ini bersifat hipotetis dan belum diuji pada data Aceh; yang teramati hanya pola dua rasio. Temuan ini sejalan dengan kajian Kementerian PPN/Bappenas bahwa daerah jarang melakukan sampling primer dan lebih sering memakai angka standar [9].



Gambar 4. Rasio timbulan DLHK Aceh 2023 terhadap estimasi Permen LHK (G1/G2) per kabupaten/kota.

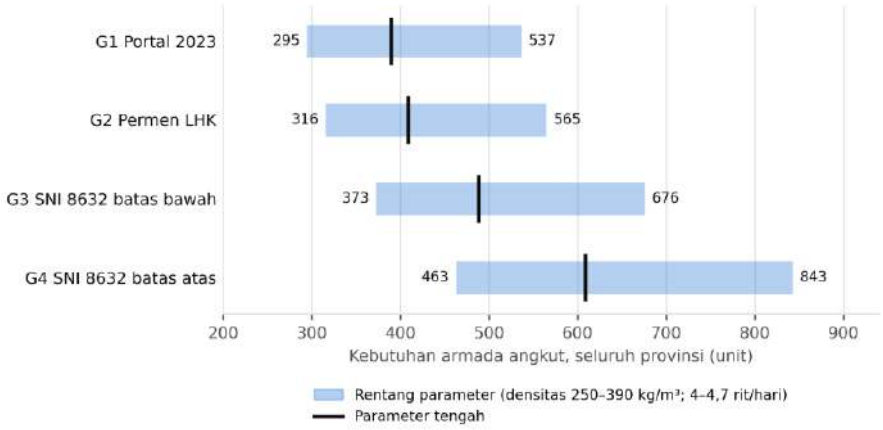
3.5 Dampak pada kebutuhan kapasitas

Total timbulan provinsi 2023 berkisar 2.522 ton/hari (G1) hingga 3.986 ton/hari (G4) (Tabel 5). Pada parameter tengah, kebutuhan armada provinsi bergeser dari 390 unit (G1) menjadi 609 unit (G4), atau 1,56 kali. Pada satu skenario timbulan, parameter densitas dan ritase saja menggeser kebutuhan armada G1 dari 295 menjadi 537 unit (1,8 kali). Gabungan keduanya membentuk rentang 295–843 unit (2,9 kali). Pada tingkat provinsi G1 dan G2 hampir sama (2.522 vs 2.656 ton/hari, selisih 5%), tetapi pada tingkat daerah lima dari 23 daerah menyimpang lebih dari 25% (Gambar 4), sehingga kebutuhan armada per daerah dapat berbeda meskipun total provinsi serupa. Kebutuhan lahan pemrosesan akhir berkisar 13,7–21,6 ha per tahun (Tabel 5). Rentang kebutuhan armada menurut skenario dan parameter diperlihatkan pada Gambar 5. Dengan demikian dua sumber ketidakpastian berukuran sebanding: variabilitas parameter operasional (densitas dan ritase) menggeser kebutuhan armada 1,8 kali, setara dan sedikit di atas pergeseran akibat pilihan data timbulan G1–G4 (1,56 kali). Ketidakpastian data timbulan karena itu bukan satu-satunya penentu kebutuhan armada, sehingga perbaikan kualitas data timbulan saja tidak cukup; pengukuran densitas dan waktu siklus lokal juga perlu dilakukan. Hasil ini adalah ilustrasi sensitivitas dengan parameter dari studi lokal dan dua asumsi penulis, bukan rekomendasi kapasitas.

Tabel 5. Skenario timbulan dan kebutuhan kapasitas provinsi, tahun dasar 2023.

Skenario	Timbulan (ton/hari)	Armada min	Armada tengah	Armada maks	Lahan TPA (ha/tahun)
G1 DLHK Aceh 2023	2.522	295	390	537	13,7
G2 Permen LHK 6/2022	2.656	316	409	565	14,4
G3 SNI 8632 batas bawah	3.195	373	489	676	17,3
G4 SNI 8632 batas atas	3.986	463	609	843	21,6

Armada min = densitas 390 kg/m^3 dan 4,7 rit/hari; maks = 250 kg/m^3 dan 4 rit/hari; tengah = 320 kg/m^3 dan 4,35 rit/hari; ketersediaan 0,8; cakupan layanan 100%; jumlah per kabupaten/kota dibulatkan ke atas lalu dijumlahkan; G3 dan G4 memakai 0,60/0,75 untuk kota kecil dan sedang dan 0,65/0,80 untuk kota besar.



Gambar 5. Rentang kebutuhan armada provinsi menurut skenario timbulan dan rentang parameter.

Penelitian ini mengasumsikan cakupan layanan 100%. Cakupan aktual daerah Aceh tidak tersedia pada data yang dipakai; sebagai ilustrasi, pada cakupan 80%, 70%, dan 60% kebutuhan armada untuk sampah yang terlayani turun hampir sebanding (Tabel 6): rentang gabungan menjadi 242–675, 213–593, dan 183–508 unit dibanding 295–843 unit pada cakupan 100%. Dengan demikian simulasi pada cakupan 100% menaksir terlalu tinggi (batas atas) kebutuhan armada untuk sampah terlayani, sekitar 30–40% pada cakupan 70–60%. Selisih mutlak antar skenario menyempit (548 menjadi 325 unit pada cakupan 60%), tetapi rasio relatif tetap sekitar 2,8 kali, sehingga ketidakpastian akibat pilihan data dan parameter tidak hilang. Sebaliknya, 30–40% timbulan yang tidak terlayani pada cakupan 70–60% tidak tercakup pada kebutuhan armada ini. Perbandingan dengan armada aktual tidak dapat dilakukan karena data armada tidak tersedia, dan cakupan diasumsikan seragam antar daerah dan skenario.

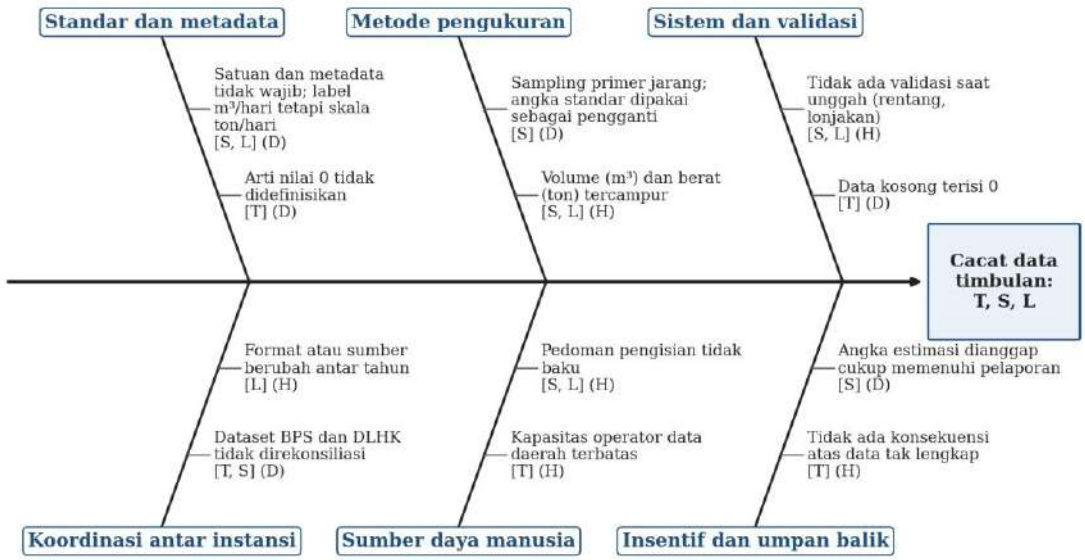
Tabel 6. Sensitivitas kebutuhan armada provinsi 2023 terhadap cakupan layanan (ilustrasi).

Cakupan layanan	Armada G1 (tengah)	Armada G4 (tengah)	Rentang gabungan (unit)	Selisih (unit)	Rasio maks/min
100%	390	609	295–843	548	2,86
80%	313	488	242–675	433	2,79
70%	276	429	213–593	380	2,78
60%	238	370	183–508	325	2,78

Cakupan 80–60% adalah angka ilustrasi. Parameter lain seperti pada Tabel 5; tengah = densitas 320 kg/m^3 dan 4,35 rit/hari; rentang gabungan = armada minimum G1 hingga armada maksimum G4.

3.6 Analisis akar penyebab hipotetis (Analyze)

Analisis akar penyebab dilakukan pada level tata kelola data pemerintahan daerah, bukan pada proses lapangan. Gambar 6 memetakan kandidat penyebab cacat T, S, dan L ke dalam enam kategori. Peta ini adalah hipotesis terstruktur: penyebab bertanda (D) didukung pola data atau dokumen yang dikutip pada artikel ini, sedangkan penyebab bertanda (H) belum diuji dan memerlukan konfirmasi pengelola data.



[T]/[S]/[L] = jenis cacat yang dijelaskan. (D) = didukung pola data atau dokumen yang dikutip; (H) = hipotesis, belum diuji.

Gambar 6. Diagram Fishbone hipotetis penyebab cacat T, S, dan L pada data timbulan sampah.

Penyebab bertanda (D) bersandar pada temuan berikut: label m^3/hari yang tidak sesuai dengan skala ton/hari (subbagian 3.2) dan nilai 0 yang bernilai positif pada dataset lain (subbagian 3.1); dataset BPS Aceh dan DLHK Aceh yang tidak dapat direkonsiliasi di luar 2024 (subbagian 3.2); sampling primer yang jarang dan angka standar yang dipakai sebagai pengganti pengukuran [9]; serta pola dua rasio tetap pada 2023 (subbagian 3.4). Dua rantai 5 Whys pada Tabel 7 menelusuri cacat yang paling banyak, yaitu lonjakan dan skala (rantai A) serta tidak melapor (rantai B).

Tabel 7. Analisis 5 Whys hipotetis untuk cacat S, L, dan T. (D) didukung pola data atau dokumen; (H) hipotesis.

Langkah	Rantai A: cacat S dan L (skala, lonjakan)	Rantai B: cacat T (tidak melapor)
Mengapa 1	Mengapa nilai timbulan berubah lebih dari 5 kali antar tahun? Karena nilai pada tahun tertentu tampak bersatuan atau berskala lain (Tabel 3). (D)	Mengapa 78 catatan bernilai 0? Karena sel data berisi 0, dan seluruh 33 nilai 0 pada 2023–2024 bernilai positif pada dataset DLHK Aceh. (D)
Mengapa 2	Mengapa satuan berbeda antar tahun? Karena dataset tidak membawa metadata satuan yang baku; label m^3/hari tidak cocok dengan skala ton/hari. (D)	Mengapa diisi 0, bukan dikosongkan atau diberi penanda hilang? Karena portal tidak mendefinisikan arti 0 dan tidak membedakan tidak melapor dari tidak ada. (D)
Mengapa 3	Mengapa metadata tidak baku? Karena tidak ada pedoman pengisian dan format pelaporan yang seragam antar tahun dan antar instansi. (H)	Mengapa nilai 0 pada satu dataset berpadanan dengan nilai positif pada dataset lain? Karena kedua dataset dikumpulkan secara terpisah dan tidak dapat direkonsiliasi di luar 2024. (D)
Mengapa 4	Mengapa tidak terdeteksi saat unggah? Karena tidak ada validasi otomatis (rentang per kapita, lonjakan antar tahun). (H)	Mengapa tidak direkonsiliasi? Karena tidak ada mekanisme koordinasi atau pemilik data tunggal antar instansi. (H)
Mengapa 5	Mengapa validasi tidak ada? Karena kualitas data tidak menjadi indikator yang dipantau dan angka estimasi standar dianggap cukup untuk pelaporan [9]. (H)	Mengapa tidak ada mekanisme koordinasi? Karena tidak ada konsekuensi atau umpan balik atas kelengkapan data. (H)

Kedua rantai bermuara pada penyebab tata kelola yang sama, yaitu ketiadaan metadata baku, validasi saat unggah, koordinasi antar instansi, dan umpan balik atas kualitas data. Temuan ini menjadi dasar rekomendasi Improve dan Control pada subbagian 3.7.

3.7 Rekomendasi tindak lanjut (Improve dan Control)

Hasil menunjukkan bahwa pelaporan timbulan sampah kabupaten/kota di Aceh beroperasi pada level sigma sekitar 2 dengan geseran konvensional 1,5 (rentang 1,94–2,31 antar skenario), jauh dari proses yang stabil. Angka sigma ini adalah indikator relatif karena peluang cacat ditentukan peneliti dan data bersifat sekunder; nilainya paling berguna untuk membandingkan tahun dan daerah. Temuan yang paling kuat adalah ketidaklengkapan pelaporan (cacat T), perubahan skala yang serentak antar daerah, dan ketidakcocokan antar dataset portal. Konsentrasi cacat lonjakan pada 2017, 2018, dan 2021, ketidakcocokan satuan antar tahun (Tabel 3), label m^3/hari yang tidak sesuai dengan skala nilai

2024, serta kenaikan total provinsi 3,0 kali dari 2021 ke 2022 mengindikasikan bahwa masalahnya bersifat sistemik pada proses pengumpulan dan penyajian data, bukan semata kesalahan individual daerah, pola yang sejalan dengan masalah pelaporan pada data administrasi terdesentralisasi [23]. Penyebab pastinya, misalnya penggabungan data dari sumber dengan satuan berbeda atau perubahan metode atau format pelaporan, tidak dapat ditentukan dari data sekunder dan perlu dikonfirmasi pengelola portal. Penulis belum memperoleh konfirmasi dari pengelola data, sehingga penjelasan di atas merupakan dugaan berdasarkan pola data.

Tahap Improve dan Control tidak dilaksanakan dalam penelitian ini. Berdasarkan pola cacat dan akar penyebab hipotetis pada subbagian 3.6, rekomendasi tindak lanjut berikut diajukan sebagai hipotesis kebijakan yang belum diuji: (a) metadata wajib pada setiap dataset, terutama satuan dan periode, serta validasi otomatis saat unggah, misalnya penanda per kapita di luar rentang kewajaran dan lonjakan antar tahun, sejalan dengan perlunya pengukuran kualitas data terbuka [21], [22]; (b) sampling timbulan primer berkala sesuai SNI 19-3964-1994 [35], sehingga angka dilaporkan sebagai hasil pengukuran dan bukan estimasi dari faktor standar, sebagaimana diwajibkan SNI 8632:2018 [9]; (c) pelaporan cakupan layanan bersama timbulan sehingga kebutuhan armada dapat dihitung terhadap sampah yang benar-benar terangkut; dan (d) peta kendali, misalnya I-MR, per daerah sebagai alat pemantauan stabilitas setelah satuan dibakukan.

3.8 Keterbatasan

Keterbatasan utama adalah ketergantungan pada data portal tanpa konfirmasi dari pengelola yang belum diperoleh, sehingga satuan dataset BPS Aceh hanya terkonfirmasi untuk 2024 (dataset DLHK Aceh untuk 2023–2024) dan cacat S dan L pada tahun lain bersifat indikatif; penyebab cacat tidak dapat dipastikan. Arti nilai 0 hanya dapat dibandingkan dengan dataset lain pada 2023–2024. Teks asli SNI 8632:2018 tidak dapat diperoleh sehingga angka skenario G3 dan G4 dikutip dari ringkasan Bappenas [9], sedangkan faktor Permen LHK diverifikasi pada teks aslinya [12]. Cakupan layanan dan armada aktual tidak tersedia, sehingga simulasi tidak dapat dibandingkan dengan armada aktual dan sensitivitas cakupan hanya ilustrasi. Analisis akar penyebab bersifat hipotetis. Rentang kewajaran, ambang lonjakan, dan definisi peluang ditentukan peneliti; parameter kapasitas berasal dari studi lokal dan dua asumsi penulis; dan kebenaran angka tidak dapat dinilai tanpa data primer. Studi lanjutan perlu memperoleh konfirmasi satuan dan metodologi dari pengelola data, membandingkan dengan dokumen sumber (misalnya laporan status lingkungan hidup daerah), dan melakukan sampling primer di beberapa kabupaten/kota sebagai acuan.

4. KESIMPULAN

Dari 322 catatan kabupaten/kota-tahun data timbulan sampah Aceh 2011–2024, 52% mengandung sedikitnya satu cacat (DPMO 252.324; level sigma sekitar 2,17 dengan geseran konvensional 1,5, rentang 1,94–2,31 antar skenario), terutama lonjakan antar tahun dan tidak melapor. Satuan dataset BPS Aceh tidak konsisten antar tahun: hanya 2024 yang terkonfirmasi berskala ton/hari melalui kesamaan dengan dataset DLHK Aceh, sedangkan 2017 tampak berskala kg/hari, dan total provinsi naik 3,0 kali dari 2021 ke 2022; analisis lintas tahun belum layak dilakukan sebelum satuan dan metodologi dikonfirmasi. Penelitian ini mencakup tahap Define–Measure–Analyze; tahap Improve dan Control (metadata dan validasi wajib, sampling primer, pelaporan cakupan layanan, dan peta kendali) merupakan rekomendasi tindak lanjut yang belum diuji.

Pada 2023, 17 dari 23 daerah berada pada dua rasio tetap terhadap estimasi Permen LHK, konsisten dengan penurunan angka dari faktor standar; hal ini masih dugaan. Kebutuhan armada provinsi dapat bergeser dari 295 hingga 843 unit menurut pilihan data timbulan dan parameter operasional, sehingga perbaikan kualitas data perlu disertai pengukuran densitas dan ritase lokal.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. Liu, L. Zhang, and Q. Wang, “Demand gap analysis of municipal solid waste landfill in Beijing: Based on the municipal solid waste generation,” *Waste Management*, vol. 134, pp. 42–51, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.007.

[2] M. Erdem and A. Özdemir, “A fuzzy modeling framework for sustainable municipal solid waste collection by the mixed fleet,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 16, no. 10, Art. no. 103628, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.asej.2025.103628.

[3] *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah*, 2008.

[4] *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*, 2012.

[5] *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*, 2017.

[6] F. Wu, D. Niu, S. Dai, and B. Wu, “New insights into regional differences of the predictions of municipal solid waste generation rates using artificial neural networks,” *Waste Management*, vol. 107, pp. 182–190, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.04.015.

[7] A. Kumar and S. R. Samadder, “An empirical model for prediction of household solid waste generation rate – A case study of Dhanbad, India,” *Waste Management*, vol. 68, pp. 3–15, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.034.

[8] M. Cubillos, J. N. Wulff, and S. Wøhlk, “A multilevel Bayesian framework for predicting municipal waste generation rates,” *Waste Management*, vol. 127, pp. 90–100, May 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.04.011.

[9] Kementerian PPN/Bappenas, "Transformasi kualitas data persampahan untuk pengelolaan sampah yang efektif dan efisien," Low Carbon Development Indonesia, Jakarta, Indonesia, Policy Brief, 2023. [Online]. Tersedia: https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2026/07/PGS-008.pdf [Diakses: 26 Oktober 2026].
[10] Badan Standardisasi Nasional, *Spesifikasi Timbulan Sampah untuk Kota Kecil dan Kota Sedang di Indonesia*, SNI 19-3983-1995, 1995.
[11] Badan Standardisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan*, SNI 8632:2018, 2018.
[12] *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2022 tentang Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*, Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2022 Nomor 375, 2022. [Online]. Tersedia: https://peraturan.bpk.go.id/Details/210856/permen-lhk-no-6-tahun-2022 [Diakses: 11 November 2026].
[13] E. Sembiring, A. H. Ramadan, and M. Farid, "Implications of shorter sampling durations on the analysis of municipal solid waste generation and composition," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 28, no. 1, pp. 133–140, 2025, doi: 10.1007/s10163-025-02401-6.
[14] K. Kawai and T. Tasaki, "Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 18, no. 1, pp. 1–13, 2016, doi: 10.1007/s10163-015-0355-1.
[15] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, F. Van Woerden, and D. Levine, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC, USA: World Bank, 2018, doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
[16] D. Andriani and T. D. Atmaja, "The potentials of landfill gas production: A review on municipal solid waste management in Indonesia," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 21, no. 6, pp. 1572–1586, Jul. 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00895-5.
[17] P. Resolute, "Applying cultural perspective in Indonesia municipal solid waste management process towards a grounded climate concept and action: A mini-review of opportunities and challenges," *Waste Management & Research*, vol. 42, no. 10, pp. 873–881, Jul. 2024, doi: 10.1177/0734242x241262711.
[18] A. A. Sukirman, P. A. Junaedi, and E. D. Sihaloho, "Pengaruh produk domestik regional bruto terhadap jumlah timbulan sampah di Provinsi Aceh," *Ekonomikawan: Jurnal Ilmu Ekonomi dan Studi Pembangunan*, vol. 24, no. 2, Dec. 2024, doi: 10.30596/ekonomikawan.v24i2.21259.
[19] G. Prajati and A. J. Pesurnay, "The analyze of sociodemographic and socioeconomic factors to municipal solid waste generated in Sumatera Island," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, vol. 3, no. 1, 2019, doi: 10.19184/jrsl.v3i1.8721.
[20] L. Purba and A. T. H. Sihotang, "Kebijakan, strategi dan capaian target Provinsi Aceh dalam pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga," Tulisan Hukum UJDIH BPK Perwakilan Provinsi Aceh, 2022. [Online]. Tersedia: https://aceh.bpk.go.id/wp-content/uploads/2022/12/KEBIJAKAN-STRATEGI-DAN-CAPAIAN-TARGET-PROVINSI-ACEH-DALAM-PENGELOLAAN-SAMPAH-RUMAH-TANGGA-DAN.pdf [Diakses: 27 Oktober 2026].
[21] A. Vetrò, L. Canova, M. Torchiano, C. O. Minotas, R. Iemma, and F. Morando, "Open data quality measurement framework: Definition and application to Open Government Data," *Government Information Quarterly*, vol. 33, no. 2, pp. 325–337, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.giq.2016.02.001.
[22] B. Šlibar, D. Oreški, and N. Begičević Ređep, "Importance of the open data assessment: An insight into the (meta) data quality dimensions," *SAGE Open*, vol. 11, no. 2, Apr. 2021, Art. no. 21582440211023178, doi: 10.1177/21582440211023178.
[23] A. van Delden, J. van der Laan, and A. Prins, "Detecting reporting errors in data from decentralised autonomous administrations with an application to hospital data," *Journal of Official Statistics*, vol. 34, no. 4, pp. 863–888, Dec. 2018, doi: 10.2478/jos-2018-0043.
[24] S. Koppel and S. Chang, "MDAIC – a Six Sigma implementation strategy in big data environments," *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 12, no. 2, pp. 432–449, 2020, doi: 10.1108/ijlss-12-2019-0123.
[25] A. Coskun, W. P. Oosterhuis, M. Serteser, and I. Unsal, "Sigma metric or defects per million opportunities (DPMO): The performance of clinical laboratories should be evaluated by the Sigma metrics at decimal level with DPMOs," *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, vol. 54, no. 8, 2016, doi: 10.1515/cclm-2015-1219.
[26] E. Psomas, E. Keramida, and N. Bouranta, "Practical implications of Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma in the public administration sector: A systematic literature review," *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 13, no. 6, pp. 1277–1307, 2022, doi: 10.1108/ijlss-04-2021-0078.
[27] J. Fletcher, "Opportunities for Lean Six Sigma in public sector municipalities," *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 9, no. 2, pp. 256–267, 2018, doi: 10.1108/ijlss-07-2017-0086.
[28] Badan Pusat Statistik Aceh, "Jumlah timbulan sampah (m3/hari) menurut kabupaten/kota di Provinsi Aceh," Portal Satu Data Aceh, 2025. [Online]. Tersedia: https://data.acehprov.go.id/dataset/jumlah-timbulan-sampah-m3-hari [Diakses: 26 Oktober 2026].
[29] Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Aceh, "Volume timbulan sampah," Portal Satu Data Aceh, 2025. [Online]. Tersedia: https://data.acehprov.go.id/dataset/volume-timbulan-sampah [Diakses: 26 Oktober 2026].
[30] Badan Pusat Statistik Aceh, "Jumlah penduduk menurut kabupaten/kota di Provinsi Aceh," Portal Satu Data Aceh, 2025. [Online]. Tersedia: https://data.acehprov.go.id/id/dataset/jumlah-penduduk-menurut-kabupaten-kota-di-provinsi-aceh [Diakses: 27 Oktober 2026].

[31] A. Coskun and C. Ialongo, "Six Sigma revisited: We need evidence to include a 1.5 SD shift in the extraanalytical phase of the total testing process," *Biochemia Medica*, vol. 30, no. 1, pp. 149–152, Feb. 2020, Art. no. 010901, doi: 10.11613/BM.2020.010901.

[32] F. F. Damanik, "Tinjauan alat pengangkutan sampah di Kota Tebing Tinggi," *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik (JIMT)*, vol. 2, no. 4, pp. 143–151, Apr. 2022.

[33] N. F. Jannah, "Optimalisasi pengelolan sampah di TPA Tambakrigadung Kecamatan Tikung Kabupaten Lamongan," Skripsi, UIN Sunan Ampel Surabaya, Surabaya, Indonesia, 2024. [Online]. Tersedia: https://digilib.uinsa.ac.id/id/eprint/69283/ [Diakses: 27 Oktober 2026].

[34] R. Natalina, J. Asmura, and D. Andrio, "Kajian kelayakan rencana lokasi baru tempat pemrosesan akhir (TPA) sampah di Kelurahan Muara Fajar – Kota Pekanbaru," *JOM FTEKNIK*, vol. 3, no. 1, Feb. 2016.

[35] Badan Standardisasi Nasional, *Metode Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbulan dan Komposisi Sampah Perkotaan*, SNI 19-3964-1994, 1994.