PEMERINTAH KOTA SURAKARTA
BADAN RISET DAN INOVASI DAERAH
KOTA SURAKARTA

# KAJIAN PENGUATAN EKONOMI SIRKULAR KOTA SURAKARTA

## BANK SAMPAH DIGITAL BERBASIS SMART TRASH BIN, SKEMA INSENTIF PEMILAHAN, DAN KEMITRAAN INDUSTRI DAUR ULANG




CETAKAN PERTAMA 2026

# KAJIAN PENGUATAN EKONOMI SIRKULAR KOTA SURAKARTA: BANK SAMPAH DIGITAL BERBASIS SMART TRASH BIN, SKEMA INSENTIF PEMILAHAN, DAN KEMITRAAN INDUSTRI DAUR ULANG

**PEMERINTAH KOTA SURAKARTA**
**BADAN RISET DAN INOVASI DAERAH**
**KOTA SURAKARTA**
**2026**

## SUSUNAN TIM KELITBANGAN KOTA SURAKARTA TAHUN 2026

Penanggung Jawab : Kentis Ratnawati, S.H., M.M.
(Kepala BRIDA Kota Surakarta)
Koordinator : Rossy Edi Harsiwi, S.H.
(Kepala Bidang Riset – BRIDA Kota Surakarta)

Tim Penulis
Anggota :

1. Sholeh Putra Utama (Fisika – UNS)
2. Faizal Tri Widiandika (Fisika – UNS)
3. Budi Winarno, S.H., M.H. (Peneliti Ahli Muda – BRIDA Kota Surakarta)
4. Herri Widiyanto, S.Sos, M.Si. (Peneliti Ahli Muda – BRIDA Kota Surakarta)
5. Nur Indriani Dewi S.E., M.E. (Peneliti Ahli Pertama – BRIDA Kota Surakarta)
6. Sarah Puruhitaningrum, S.Mat. (Analis Data Ilmiah Ahli Pertama – BRIDA Kota Surakarta)
7. Purwoko, S.T. (Penelaah Teknis Kebijakan– BRIDA Kota Surakarta)
8. Ghulam Fathul Amri, S.ST.,M.T. (Penelaah Teknis Kebijakakan – BRIDA Kota Surakarta)
9. Margono (Pengadministrasi Perkantoran – BRIDA Kota Surakarta)

Design/Layout : Ghulam Fathul Amri, S.ST.,M.T.


UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA

NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

LINGKUP HAK CIPTA

Pasal 2 ayat (1)

Hak Cipta merupakan hak eksklusif bagi Pencipta atau Pemegang Hak Cipta untuk mengumumkan atau memperbanyak Ciptaannya, yang timbul secara otomatis setelah suatu ciptaan dilahirkan tanpa mengurangi pembatasan menurut peraturan perundang-undangan yang berlaku.

KETENTUAN PIDANA

Pasal 72

(1) Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
(2) Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan kajian yang berjudul "Kajian Penguatan Ekonomi Sirkular Kota Surakarta: Bank Sampah Digital Berbasis *Smart Trash Bin*, Skema Insentif Pemilahan, dan Kemitraan Industri Daur Ulang" dengan baik dan tepat waktu.

Kajian ini disusun sebagai bentuk kontribusi pemikiran inovatif dalam menjawab permasalahan pengelolaan sampah perkotaan yang semakin kompleks di Kota Surakarta. Tingginya volume sampah rumah tangga, keterbatasan kapasitas TPA Putri Cempo, serta rendahnya partisipasi masyarakat dalam pemilahan sampah menjadi tantangan yang memerlukan solusi nyata dan berkelanjutan.

Naskah ini merupakan revisi kedua. Pada putaran revisi kali ini dilakukan penelaahan ulang atas seluruh rujukan, rekonsiliasi angka timbulan sampah antarsumber resmi, koreksi atas sejumlah pernyataan yang tidak sesuai fakta — termasuk mengenai skema biaya layanan pengolahan sampah PLTSa Putri Cempo dan kelas harga material daur ulang — serta penambahan aspek metrologi legal, pelindungan data pribadi, dan kepatuhan sistem pembayaran. Sistematika penulisan juga diselaraskan dengan ketentuan lembaga pemberi tugas. Seluruh tambahan dan perbaikan pada putaran ini ditandai dengan warna tinta yang berbeda sebagaimana dijelaskan pada Keterangan Warna Naskah.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan kajian ini masih terdapat berbagai kekurangan, baik dari segi isi, penyajian, maupun analisis. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya ini di masa yang akan datang.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan motivasi dalam proses penyusunan kajian ini. Semoga kajian ini dapat memberikan manfaat bagi masyarakat, Pemerintah Kota Surakarta, serta menjadi rujukan dalam pengembangan inovasi pengelolaan sampah berbasis teknologi di masa mendatang.

Surakarta, September 2026

Kepala Badan Riset dan Inovasi Daerah

Kota Surakarta

**Kentis Ratnawati, S.H., M.M.**

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... 4
DAFTAR ISI ..... 4
DAFTAR GAMBAR ..... 8
DAFTAR TABEL ..... 9
BAB I PENDAHULUAN ..... 10
1.1 Latar Belakang Masalah ..... 10
1.2 Identifikasi Masalah ..... 15
1.3 Batasan Masalah ..... 16
1.4 Rumusan Masalah ..... 16
1.5 Tujuan Penelitian ..... 17
1.6 Manfaat Penelitian ..... 17
1.6.1 Manfaat Teoretis ..... 17
1.6.2 Manfaat Praktis ..... 18
1.7 Keaslian dan Kebaruan Penelitian ..... 18
1.8 Definisi Operasional dan Sistematika Penulisan ..... 19
1.8.1 Definisi Operasional ..... 19
1.8.2 Sistematika Penulisan ..... 20
BAB II TINJAUAN PUSTAKA ..... 21
2.1 Landasan Teori ..... 21
2.1.1 Konsep Ekonomi Sirkular ..... 21
2.1.2 Bank Sampah sebagai Infrastruktur Sosial Ekonomi Sirkular ..... 22
2.1.3 Teori Perubahan Perilaku, Gamifikasi, dan Skema Insentif ..... 23
2.1.4 Skema Pengembalian Berimbalan dan Tanggung Jawab Produsen ..... 23
2.1.5 Instrumentasi *Internet of Things* pada *Smart Trash Bin* ..... 25
2.1.6 Arsitektur Basis Data, Aplikasi, dan Perlindungan Data ..... 26
2.1.7 Landasan Hukum Kajian ..... 27
2.2 Penelitian Terdahulu (*State of the Art*) ..... 28
2.2.1 Tema Instrumentasi dan Metrologi Fisik ..... 28
2.2.2 Tema Gamifikasi, Insentif, dan Keberlanjutan Partisipasi ..... 28
2.2.3 Tema Tata Kelola dan Kelembagaan Bank Sampah ..... 29

2.2.4 Tema Tata Kelola Persampahan Kota Surakarta ..... 29
2.3 Celah Penelitian (*Research Gap*) ..... 30
2.4 Kerangka Berpikir ..... 31
2.5 Proposisi Penelitian ..... 32
BAB III METODOLOGI PENELITIAN ..... 33
3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian ..... 33
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian ..... 34
3.3 Subjek, Informan, dan Sumber Data ..... 34
3.4 Variabel dan Definisi Operasional ..... 35
3.5 Teknik Pengumpulan Data ..... 36
3.5.1 Studi Literatur dan Analisis Spesifikasi Komponen ..... 36
3.5.2 Observasi Lapangan dan Koordinasi Kelembagaan ..... 36
3.5.3 Pengujian Eksperimental dan Kalibrasi Instrumen ..... 36
3.6 Uji Keabsahan Data ..... 37
3.7 Teknik Analisis Data ..... 38
3.7.1 Pengolahan Data Instrumentasi ..... 38
3.7.2 Pengolahan Data Sistem dan Skema Poin ..... 39
3.7.3 Teknik Analisis Kelayakan dan Skenario ..... 41
3.8 Etika Penelitian ..... 41
BAB IV PEMBAHASAN ..... 42
4.1 Rancang Bangun *Smart Trash Bin* dan Peningkatan Partisipasi Pemilahan di Sumber ..... 42
4.1.1 Desain Mekanis dan Peletakan Instrumentasi ..... 42
4.1.2 Topologi Jaringan *Internet of Things* ..... 44
4.1.3 Analisis Mitigasi Galat Instrumen ..... 45
4.1.4 Penurunan Hambatan Partisipasi sebagai Jawaban Tujuan Pertama ..... 46
4.2 Efektivitas Skema Poin Digital dan Notifikasi Otomatis terhadap Beban TPA ..... 47
4.2.1 Alur Autentikasi Pengguna Nir-Sentuh ..... 48
4.2.2 Algoritma Pencairan Poin Waktu-Nyata ..... 49
4.2.3 Antarmuka Dasbor Petugas dan Sistem Peringatan ..... 50
4.2.4 Proyeksi Reduksi Beban TPA Putri Cempo ..... 51
4.3 Model Kemitraan dan Tata Kelola Ekonomi Sirkular di Kota Surakarta ..... 52
4.3.1 Integrasi dengan Bank Sampah Induk Kota Surakarta ..... 52

4.3.2 Rantai Pasok Residu Organik ke Fasilitas Biokonversi dan PLTSa Putri Cempo ..... 54
4.3.3 Keselarasan Kelembagaan dan Peta Pemangku Kepentingan ..... 55
4.4 Kelayakan Teknis, Ekonomi, dan Kelembagaan serta Mitigasi Risiko ..... 56
4.4.1 Kelayakan Teknis ..... 56
4.4.2 Kelayakan Ekonomi ..... 57
4.4.3 Kelayakan Kelembagaan ..... 58
4.4.4 Analisis Risiko dan Mitigasi ..... 59
BAB V PENUTUP ..... 61
5.1 Kesimpulan ..... 61
5.1.1 Kesimpulan atas Rancang Bangun dan Partisipasi Pemilahan (Subbab 4.1) ..... 61
5.1.2 Kesimpulan atas Efektivitas Skema Poin dan Notifikasi (Subbab 4.2) . 61
5.1.3 Kesimpulan atas Model Kemitraan dan Tata Kelola (Subbab 4.3) ..... 62
5.1.4 Kesimpulan atas Kelayakan dan Risiko (Subbab 4.4) ..... 62
5.2 Rekomendasi ..... 63
5.2.1 Rekomendasi Penelitian ..... 63
5.2.2 Rekomendasi Kebijakan ..... 64
DAFTAR PUSTAKA ..... 67

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kerangka regulasi pengelolaan sampah yang menaungi kajian

Gambar 1.2 Rekonsiliasi angka timbulan dan penanganan sampah Kota Surakarta menurut empat sumber resmi

Gambar 2.1 Hierarki pengelolaan sampah dan posisi intervensi kajian

Gambar 2.2 Efektivitas skema insentif pengembalian dibanding sistem konvensional

Gambar 2.3 Kerangka berpikir kajian

Gambar 3.1 Alur tahapan penelitian

Gambar 4.1 Desain mekanis *Smart Trash Bin* dan peletakan instrumentasi

Gambar 4.2 Topologi jaringan *Internet of Things* pada sistem yang diusulkan

Gambar 4.3 Rancangan antarmuka aplikasi warga

Gambar 4.4 Alur proses pencairan poin waktu-nyata

Gambar 4.5 Dasbor operasional petugas dan sistem peringatan dini

Gambar 4.6 Proyeksi reduksi beban TPA menurut skenario penyebaran unit

Gambar 4.7 Rantai nilai botol PET dan letak sebenarnya nilai tambah purwarupa

Gambar 4.8 Peta pemangku kepentingan model tata kelola yang diusulkan

# DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Rekonsiliasi angka timbulan dan penanganan sampah Kota Surakarta

Tabel 1.2 Perbandingan kajian ini dengan penelitian terdahulu

Tabel 1.3 Definisi operasional istilah kunci

Tabel 2.1 Landasan hukum yang menaungi rancangan kajian

Tabel 2.2 Sintesis tematik penelitian terdahulu dan celah yang tersisa

Tabel 3.1 Variabel, indikator, dan skala pengukuran

Tabel 3.2 Spesifikasi instrumen dan batas ketidakpastian yang diakui

Tabel 4.1 Perbandingan hambatan partisipasi sebelum dan sesudah intervensi

Tabel 4.2 Keselarasan gagasan kajian dengan misi RPJMD Kota Surakarta 2025–2029

Tabel 4.3 Perkiraan belanja modal dan biaya operasional per unit

Tabel 4.4 Uji kepekaan kelayakan ekonomi terhadap volume terkumpul

Tabel 4.5 Analisis risiko penerapan dan mitigasinya

# BAB I
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang Masalah

Dalam era pembangunan perkotaan modern, paradigma pengelolaan sampah telah mengalami pergeseran dari sistem ekonomi linear *take–make–dispose* menuju ekonomi sirkular yang menempatkan sampah sebagai sumber daya bernilai ekonomi. Sampah tidak lagi dipandang sebagai limbah akhir, melainkan sebagai bahan baku yang dapat diproses kembali menjadi produk baru, energi alternatif, maupun sumber pendapatan masyarakat (Supriatna & Lenz, 2025). Konsep ekonomi sirkular menjadi strategi penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan, pengurangan emisi karbon, serta pengendalian krisis lingkungan perkotaan yang semakin kompleks (Sasongko dkk., 2025). Pemerintah Indonesia juga terus mendorong transformasi ini melalui penguatan sistem pengelolaan sampah berbasis masyarakat, salah satunya melalui pengembangan bank sampah sebagai instrumen ekonomi lingkungan yang mampu meningkatkan partisipasi masyarakat sekaligus mengurangi beban Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) (Putera dkk., 2026).

Secara normatif, kondisi ideal (*das Sollen*) yang hendak dicapai telah dirumuskan berlapis dalam kerangka hukum nasional dan daerah. Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah menegaskan bahwa pengelolaan sampah wajib dilakukan secara komprehensif dari hulu ke hilir dengan mengedepankan pengurangan di sumber. Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga (Jakstranas) menetapkan target kuantitatif berupa pengurangan sampah sebesar 30% dan penanganan sampah sebesar 70% dari angka timbulan pada tahun 2025. Pada tataran operasional, Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Sampah pada Bank Sampah — yang berlaku sejak 1 Juli 2021 dan menyempurnakan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 2012 — secara eksplisit menempatkan pendekatan ekonomi sirkular sebagai dasar pertimbangan penyelenggaraan bank sampah. Di tingkat daerah, Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 4 Tahun 2022 tentang Pengelolaan Sampah telah mengatur bab tersendiri mengenai insentif dan disinsentif, sehingga pemberian imbalan atas perilaku pemilahan bukan gagasan yang berada di luar kerangka hukum daerah, melainkan justru merupakan amanat yang belum dioperasionalkan secara memadai.




**Gambar 1.1** Kerangka regulasi pengelolaan sampah yang menaungi kajian

Kota Surakarta sebagai salah satu kota dengan tingkat kepadatan penduduk tinggi di Jawa Tengah menghadapi tantangan serius dalam pengelolaan sampah perkotaan. Tingginya aktivitas rumah tangga, perdagangan, dan jasa menyebabkan timbulan sampah terus meningkat setiap harinya. Kenyataan di lapangan (*das Sein*) memperlihatkan jarak yang lebar dengan kondisi ideal tersebut. Perlu ditegaskan sejak awal bahwa angka timbulan sampah Kota Surakarta yang beredar di berbagai dokumen tidak seragam karena perbedaan basis perhitungan, sehingga kajian ini memilih untuk menyajikan rekonsiliasi antarsumber alih-alih mengutip satu angka tunggal secara tidak kritis.

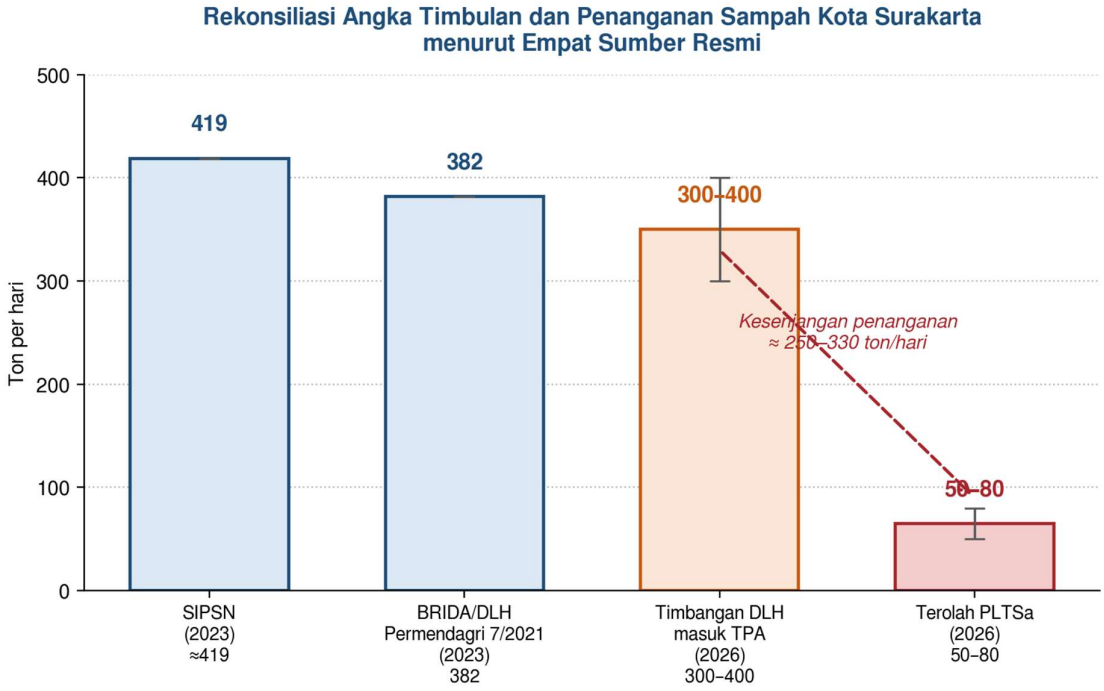
**Tabel 1.1** Rekonsiliasi angka timbulan dan penanganan sampah Kota Surakarta

| Sumber | Angka | Basis perhitungan | Tahun |
|---|---|---|---|
| Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), Kementerian Lingkungan Hidup | ± 419 ton/hari (152.974 ton/tahun) | Pelaporan mandiri daerah ke basis data nasional | 2023 |
| Kajian E-Riset BRIDA Kota Surakarta | 382 ton/hari (139.419 ton/tahun) | Penduduk 587.646 jiwa × 0,65 kg/jiwa/hari sesuai Permendagri 7/2021 | 2024 |
| Timbangan Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta | 300–400 ton/hari | Sampah yang benar-benar terangkut dan masuk ke TPA Putri Cempo | 2026 |
| Realisasi pengolahan PLTSa Putri Cempo | 50–80 ton/hari | Kapasitas terolah aktual menurut Kepala DLH Kota Surakarta | 2026 |

*Sumber: diolah dari SIPSN Kementerian Lingkungan Hidup (2024); BRIDA Kota Surakarta (2024); RRI (2026); DPRD Kota Surakarta (2025).*

Dari Tabel 1.1 terlihat bahwa selisih antara angka SIPSN dan angka BRIDA bukanlah pertentangan data, melainkan konsekuensi dari perbedaan metode: SIPSN merekam pelaporan agregat daerah, sedangkan BRIDA menghitung dari basis penduduk dan koefisien timbulan per kapita menurut Peraturan Menteri Dalam Negeri Nomor 7 Tahun 2021. Untuk menjaga kehati-hatian ilmiah, seluruh perhitungan dalam kajian ini menggunakan rentang 382–419 ton per hari sebagai angka timbulan, dan 300–400 ton per hari sebagai angka sampah yang benar-benar masuk ke TPA. Berdasarkan data Dinas Lingkungan Hidup, sektor rumah tangga merupakan penyumbang terbesar dengan porsi sekitar 72%, diikuti sampah dari fasilitas umum (12%), usaha (8%), dan pasar (6%), dengan angka timbulan

0,65 kg/jiwa/hari yang didominasi fraksi organik hingga 70% (BRIDA Kota Surakarta, 2024). Angka 72% ini jauh melampaui rata-rata nasional yang berkisar 47%, sehingga intervensi pada tingkat rumah tangga memiliki daya ungkit yang secara statistik paling besar bagi Kota Surakarta.




**Gambar 1.2** Rekonsiliasi angka timbulan dan penanganan sampah Kota Surakarta menurut empat sumber resmi

Kondisi ini memberikan tekanan besar terhadap kapasitas TPA Putri Cempo yang selama ini menjadi lokasi utama pembuangan akhir sampah kota. Sistem konvensional kumpul–angkut–buang yang masih dominan diterapkan terbukti tidak lagi berkelanjutan karena keterbatasan lahan, peningkatan biaya operasional, serta dampak pencemaran lingkungan yang semakin besar (Ariyanti dkk., 2025). Jika tidak dilakukan inovasi pengelolaan dari hulu, maka persoalan sampah akan terus menjadi ancaman serius bagi kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat Surakarta (Adji dkk., 2022).

Tekanan tersebut menjadi semakin nyata apabila dikaitkan dengan kinerja fasilitas pengolahan hilir. Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Putri Cempo dirancang sebagai proyek Kerja Sama Pemerintah dengan Badan Usaha berkapasitas sekitar 540 ton sampah per hari dengan keluaran listrik 5 MW yang dijual kepada PT PLN pada harga 13,35 sen dolar AS per kWh (Kementerian Pekerjaan Umum, t.t.). Namun, pada Maret 2026 Kepala Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta menyatakan bahwa kapasitas yang benar-benar terolah baru berkisar 50–80 ton per hari, jauh di bawah kiriman harian sebesar 300–400 ton (RRI, 2026). Pada bulan yang sama Menteri Lingkungan Hidup meninjau langsung fasilitas tersebut dan mengumumkan akan dilakukan audit menyeluruh, baik dari sisi teknis maupun kelayakan finansial, untuk menentukan apakah proyek masih

layak dilanjutkan (Tirto, 2026). Fakta ini penting bagi kajian karena menegaskan satu hal: strategi yang bertumpu semata-mata pada teknologi hilir mengandung risiko tinggi, sehingga penguatan pengurangan di hulu bukan pilihan pelengkap, melainkan keharusan.

Akar utama dari permasalahan tersebut terletak pada rendahnya pemilahan sampah dari sumber, khususnya pada tingkat rumah tangga. Padahal, keberhasilan ekonomi sirkular sangat bergantung pada proses pemilahan sejak awal agar sampah organik dan anorganik dapat diproses secara optimal (Saptutyningsih & Amalia, 2024). Namun, berbagai studi menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat masih belum melakukan pemilahan sampah secara rutin karena rendahnya kesadaran lingkungan serta kurangnya insentif langsung yang dirasakan masyarakat (Pandyaswargo & Rachman, 2025). Selain itu, keterbatasan edukasi berkelanjutan dan minimnya infrastruktur pendukung juga memperburuk kondisi tersebut (Murtyas dkk., 2025). Sistem bank sampah konvensional yang masih bersifat manual, seperti pencatatan tabungan sampah secara tertulis, proses penimbangan yang memakan waktu, serta jadwal setor yang tidak fleksibel, membuat masyarakat dengan mobilitas tinggi cenderung enggan berpartisipasi (Juriani & Anugrahini, 2026). Akibatnya, potensi ekonomi dari sampah rumah tangga belum dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Persoalan kelembagaan ini terdokumentasi dengan jelas di Kota Surakarta. Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta mencatat keberadaan 131 unit bank sampah, tetapi yang benar-benar aktif belum mencapai separuhnya (Liputan6, 2022). Angka ini menunjukkan bahwa persoalan utama Kota Surakarta bukanlah ketiadaan lembaga, melainkan rendahnya keberlanjutan operasional lembaga yang sudah ada. Pada tingkat nasional, tinjauan Budiyarto dkk. (2025) yang terbit pada *Waste Management & Research* memperkirakan kontribusi bank sampah terhadap pengelolaan sampah daur ulang nasional baru sekitar 7%. Dengan demikian, kesenjangan yang dihadapi bukan semata-mata kesenjangan teknologi, melainkan kesenjangan antara ketersediaan kelembagaan dan kemampuan kelembagaan itu mempertahankan partisipasi warga dari waktu ke waktu.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, diperlukan inovasi berbasis teknologi yang mampu meningkatkan kemudahan, efisiensi, dan daya tarik partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sampah. Salah satu solusi yang ditawarkan adalah pembuatan bank sampah digital berbasis *Smart Trash Bin* dengan integrasi *Internet of Things* (IoT) yang ditempatkan di berbagai titik strategis di Kota Surakarta (Fahriza & Yuliana, 2024). Sistem ini terdiri atas dua jenis tempat sampah, yaitu tempat sampah organik dan tempat sampah anorganik. Pada tempat sampah organik, sensor volume akan mendeteksi tingkat kepenuhan sampah, dan ketika kapasitas telah penuh, sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi kepada petugas untuk segera melakukan pengambilan sampah sehingga sampah tidak menumpuk dan membusuk (Tundjungsari dkk., 2025). Sementara itu, pada tempat sampah anorganik, khususnya untuk botol plastik dan kaca, diterapkan sistem poin

digital. Setiap pengguna yang membuang sampah dapat melakukan pemindaian melalui aplikasi untuk memperoleh poin yang dapat dikonversi menjadi uang (Fahriza & Yuliana, 2024). Skema insentif ini diharapkan mampu meningkatkan motivasi masyarakat untuk memilah sampah sejak dari rumah.

Gagasan pemberian insentif atas pengembalian kemasan bukanlah gagasan spekulatif. Ulasan bukti sistematis yang dilakukan Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025) pada jurnal *Sustainability* menemukan bahwa negara-negara Uni Eropa yang menjalankan skema pengembalian berimbalan (*deposit–return scheme*) secara penuh mencapai tingkat pengumpulan kemasan minuman di atas 85%, disertai penurunan sampah tercecer sebesar 40–60%. Temuan yang paling relevan bagi konteks Indonesia adalah bahwa efektivitas skema semacam ini tidak berkorelasi dengan tingkat kematangan sistem persampahan kota secara keseluruhan; artinya, skema berbasis insentif dapat menghasilkan tingkat pengumpulan tinggi bahkan di kota yang sistem persampahan umumnya masih lemah. Ulasan yang sama juga mencatat bahwa mutu material yang terkumpul melalui skema berinsentif jauh lebih bersih: pengujian van Velzen menunjukkan jumlah partikel pengotor pada PET daur ulang dari skema berimbalan hampir sembilan kali lebih sedikit dibandingkan PET dari pengumpulan terpilah biasa.

Keberhasilan sistem ini tidak hanya bergantung pada pengumpulan sampah, tetapi juga pada keberadaan mitra industri daur ulang sebagai pihak penerima hasil akhir (*offtaker*). Oleh karena itu, inovasi ini dirancang dengan membangun kemitraan strategis antara bank sampah digital, masyarakat, dan industri pendaur ulang sampah di Surakarta (Sasongko dkk., 2025). Sampah organik yang terkumpul akan disalurkan kepada mitra pengolah untuk dijadikan kompos pertanian maupun bahan baku biogas (Supriatna & Lenz, 2025). Di sisi lain, sampah anorganik seperti botol plastik dan kaca akan dikirim kepada industri daur ulang untuk diproses kembali menjadi produk bernilai ekonomi (Putera dkk., 2026). Sistem digital ini juga memungkinkan konektivitas langsung antara bank sampah tingkat RT/RW dengan industri pendaur ulang, sehingga rantai pasok menjadi lebih pendek, efisien, transparan, dan memberikan harga jual yang lebih adil bagi masyarakat (Fahriza & Yuliana, 2024).

Inovasi bank sampah digital berbasis *Smart Trash Bin* ini sejalan dengan arah pembangunan daerah Kota Surakarta. Penyelarasan tersebut perlu dinyatakan secara tepat. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Kota Surakarta Tahun 2025–2029 ditetapkan melalui Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 9 Tahun 2025 dengan visi "Gotong Royong Mewujudkan Surakarta Berbudaya, Maju, Sejahtera, dan Berkelanjutan" serta lima misi, yaitu (1) pendidikan, kesehatan, dan perlindungan sosial untuk semua; (2) berbudaya untuk kemajuan dan ketahanan sosial; (3) daya saing ekonomi untuk kesejahteraan; (4) inovasi birokrasi untuk pelayanan publik yang adaptif dan inklusif; serta (5) ketahanan kota dan kerja sama wilayah terpadu dan berkelanjutan (JDIH Kota Surakarta, 2025). Kajian ini berkaitan langsung dengan misi kelima melalui aspek

ketahanan kota dan keberlanjutan lingkungan, dengan misi ketiga melalui penciptaan nilai ekonomi dari material daur ulang, dan dengan misi keempat melalui digitalisasi pelayanan publik.

Pada tingkat nasional, kajian ini bersandar pada Asta Cita Presiden Republik Indonesia. Perlu dikoreksi bahwa Asta Cita merupakan delapan misi pemerintahan pusat, bukan dokumen milik pemerintah kota, dan cita ke-8 berbunyi "memperkuat penyelarasan kehidupan yang harmonis dengan lingkungan, alam, dan budaya, serta peningkatan toleransi antarumat beragama untuk mencapai masyarakat yang adil dan makmur". Adapun aspek ketahanan pangan, ekonomi hijau, dan ekonomi biru berada pada cita ke-2. Dengan demikian, keterkaitan kajian ini dengan Asta Cita terletak pada cita ke-8 dari sisi keselarasan dengan lingkungan dan cita ke-2 dari sisi ekonomi hijau, bukan pada rumusan "Asta Cita Kota Surakarta poin ke-8" sebagaimana tertulis pada naskah terdahulu.

Dengan demikian, kajian ini tidak hanya menawarkan solusi terhadap persoalan sampah perkotaan, tetapi juga menjadi model inovasi pembangunan berkelanjutan yang mampu menciptakan nilai ekonomi, sosial, dan lingkungan secara simultan bagi Kota Surakarta (Murtyas dkk., 2025). Celah yang belum terjawab oleh penelitian terdahulu — dan yang menjadi posisi kajian ini — adalah belum tersedianya rancangan yang secara utuh menyatukan tiga hal sekaligus dalam satu konteks kota: instrumentasi pengukuran massa yang tertelusur secara metrologis, pencairan insentif yang berlangsung seketika melalui kanal pembayaran berizin, dan pengikatan kelembagaan kepada penyerap material yang terverifikasi. Uraian lengkap mengenai celah ini disajikan pada Subbab 2.3.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, dapat diidentifikasi sejumlah persoalan sebagai berikut.

1. Timbulan sampah Kota Surakarta berada pada kisaran 382–419 ton per hari, sementara kapasitas pengolahan hilir yang benar-benar berjalan di PLTSa Putri Cempo baru 50–80 ton per hari, sehingga terdapat kesenjangan penanganan yang sangat besar.
2. Sektor rumah tangga menyumbang sekitar 72% timbulan, jauh di atas rata-rata nasional 47%, tetapi praktik pemilahan pada tingkat rumah tangga masih rendah.
3. Dari 131 unit bank sampah yang tercatat di Kota Surakarta, kurang dari separuhnya berstatus aktif, yang menandakan persoalan keberlanjutan operasional, bukan persoalan ketersediaan lembaga.
4. Pencatatan setoran pada bank sampah konvensional masih manual sehingga rawan galat, tidak transparan, dan menunda pencairan imbalan bagi warga.
5. Jadwal operasional bank sampah yang terbatas tidak sesuai dengan pola mobilitas warga perkotaan, sehingga menaikkan biaya non-moneter partisipasi.

6. Material anorganik yang terkumpul bercampur dan kotor sehingga terdepresiasi nilainya di pasar sekunder dan menurunkan penerimaan bank sampah.
7. Ketentuan insentif dan disinsentif dalam Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 4 Tahun 2022 belum dioperasionalkan menjadi mekanisme yang terukur dan dapat diaudit.
8. Percampuran fraksi organik basah dengan fraksi anorganik menurunkan nilai kalor umpan dan memperburuk kinerja proses gasifikasi pada fasilitas hilir.

## 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan terarah dan dapat dipertanggungjawabkan, kajian ini dibatasi sebagai berikut.

1. **Lokus.** Kajian dibatasi pada wilayah administratif Kota Surakarta, Provinsi Jawa Tengah, dengan perhatian khusus pada TPA Putri Cempo, Bank Sampah Induk, dan bank sampah unit tingkat RT/RW.
2. **Periode data.** Data sekunder yang digunakan mencakup periode 2020 sampai dengan pertengahan 2026, dengan prioritas pada data resmi terbaru yang dapat ditelusuri publik.
3. **Objek material.** Fraksi anorganik yang ditinjau dibatasi pada botol *polyethylene terephthalate* (PET) dan kemasan kaca; fraksi organik ditinjau sebatas kebutuhan pemantauan volume dan penjadwalan pengangkutan, bukan pada rekayasa proses pengomposan atau biokonversi.
4. **Cakupan teknis.** Kajian membahas rancang bangun purwarupa pada tingkat arsitektur sistem, pemilihan komponen, dan pengujian fungsional laboratorium. Kajian ini tidak mencakup uji coba lapangan berskala kota, uji ketahanan jangka panjang, maupun sertifikasi metrologi legal oleh instansi berwenang.
5. **Cakupan ekonomi.** Analisis kelayakan bersifat *ex-ante* dengan skenario, bukan hasil realisasi keuangan. Angka harga material mengikuti kisaran pasar yang dipublikasikan dan bersifat fluktuatif.
6. **Cakupan kebijakan.** Rekomendasi dibatasi pada tindakan yang berada dalam kewenangan Pemerintah Kota Surakarta dan perangkat daerahnya menurut peraturan yang berlaku, sehingga tidak mengusulkan langkah yang memerlukan perubahan undang-undang.

## 1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, identifikasi, dan batasan masalah di atas, rumusan masalah kajian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana rancang bangun bank sampah digital berbasis *Smart Trash Bin* dengan sistem pemisahan sampah organik dan anorganik dapat meningkatkan partisipasi masyarakat Kota Surakarta dalam melakukan pemilahan sampah dari sumber?

2. Bagaimana sistem insentif poin digital pada tempat sampah anorganik serta notifikasi otomatis pada tempat sampah organik dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah rumah tangga dan mengurangi beban TPA Putri Cempo?
3. Bagaimana kemitraan antara bank sampah digital, masyarakat, pemerintah, dan industri pendaur ulang di Kota Surakarta dapat mendukung penguatan ekonomi sirkular serta mewujudkan pembangunan berkelanjutan sesuai RPJMD Kota Surakarta 2025–2029?
4. Sejauh mana gagasan ini layak secara teknis, ekonomi, dan kelembagaan untuk diterapkan oleh perangkat daerah Kota Surakarta, dan risiko apa saja yang perlu dimitigasi?

## 1.5 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis rancang bangun bank sampah digital berbasis *Smart Trash Bin* dalam meningkatkan kesadaran dan partisipasi masyarakat Kota Surakarta terhadap pemilahan sampah organik dan anorganik dari sumber.
2. Mengetahui efektivitas sistem poin digital pada sampah anorganik dan sistem notifikasi otomatis pada sampah organik dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan sampah rumah tangga serta mengurangi beban TPA Putri Cempo.
3. Mengkaji model kemitraan strategis antara bank sampah digital, masyarakat, pemerintah, dan industri daur ulang dalam mendukung ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan di Kota Surakarta.
4. Menilai kelayakan teknis, ekonomi, dan kelembagaan gagasan ini beserta risiko penerapannya bagi perangkat daerah Kota Surakarta.

Keempat tujuan tersebut dijawab secara berurutan pada Subbab 4.1 sampai dengan 4.4, sehingga setiap tujuan memiliki satu subbab pembahasan yang berpadanan.

## 1.6 Manfaat Penelitian

### 1.6.1 Manfaat Teoretis

Secara teoretis, kajian ini memberikan tiga sumbangan. *Pertama*, kajian ini memperluas penerapan teori skema pengembalian berimbalan (*deposit–return scheme*) yang selama ini berkembang pada konteks negara maju dengan sistem ritel terpusat, ke dalam konteks kota Indonesia yang bertumpu pada kelembagaan bank sampah berbasis komunitas. *Kedua*, kajian ini menautkan teori penentuan nasib sendiri (*self-determination theory*) dan teori perilaku terencana (*theory of planned behavior*) dengan rancangan instrumentasi fisis, sehingga variabel psikologis seperti kesegeraan imbalan dapat diterjemahkan menjadi parameter rancangan yang terukur. *Ketiga*, kajian ini menawarkan kerangka penilaian mutu material daur ulang yang mengaitkan kemurnian fisis dengan valuasi ekonomi pada pasar sekunder Indonesia.

### 1.6.2 Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kemudahan bagi masyarakat Kota Surakarta dalam melakukan pengelolaan sampah rumah tangga secara lebih praktis, modern, dan bernilai ekonomi. Melalui sistem *Smart Trash Bin*, masyarakat dapat memilah sampah dengan lebih mudah karena tersedia dua tempat sampah terpisah untuk organik dan anorganik. Sampah anorganik seperti botol plastik dan kaca dapat menghasilkan poin digital yang dapat ditukarkan menjadi uang, sehingga memberikan manfaat ekonomi langsung bagi warga. Selain itu, pengelolaan sampah organik yang lebih cepat melalui sistem notifikasi otomatis dapat menjaga kebersihan lingkungan, mengurangi bau, dan menekan risiko penyakit akibat penumpukan sampah.

Penelitian ini diharapkan menjadi solusi inovatif bagi Pemerintah Kota Surakarta dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah perkotaan serta mengurangi ketergantungan pada sistem kumpul–angkut–buang yang selama ini membebani TPA Putri Cempo. Implementasi bank sampah digital berbasis IoT dapat membantu pemerintah dalam meningkatkan partisipasi masyarakat, memperkuat program ekonomi sirkular, serta mendukung pengembangan kemitraan dengan industri daur ulang lokal. Bagi Dinas Lingkungan Hidup, kajian ini menyediakan rancangan yang dapat langsung dipakai untuk menyusun petunjuk teknis pelaksanaan ketentuan insentif dan disinsentif dalam Peraturan Daerah Nomor 4 Tahun 2022. Bagi Bank Sampah Induk dan bank sampah unit, kajian ini menyediakan model peningkatan mutu material yang dapat menaikkan penerimaan tanpa menambah beban kerja kader. Bagi kalangan akademik dan perguruan tinggi di Surakarta, kajian ini menyediakan rancangan purwarupa terbuka yang dapat direplikasi dan diuji lebih lanjut melalui kegiatan pengabdian masyarakat.

## 1.7 Keaslian dan Kebaruan Penelitian

Untuk memastikan bahwa kajian ini bukan pengulangan atas karya yang telah ada, dilakukan pembandingan sistematis terhadap penelitian terdahulu yang paling berdekatan, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.2.

**Tabel 1.2** Perbandingan kajian ini dengan penelitian terdahulu

| Penelitian terdahulu | Fokus dan temuan pokok | Perbedaan dengan kajian ini |
|---|---|---|
| Tundjungsari dkk. (2025), *JMIR Serious Games* | Model Circonomy: IoT, *semantic web*, dan gamifikasi untuk bank sampah; purwarupa diuji secara fungsional | Circonomy belum menautkan pencairan imbalan ke kanal pembayaran berizin dan tidak terikat pada satu konteks kebijakan kota tertentu |
| Sendari dkk. (2025), *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology* | Penimbangan cerdas berbasis IoT dan kecerdasan buatan untuk bank sampah | Berhenti pada lapisan pengukuran; tidak membahas mekanisme insentif maupun tata kelola kemitraan penyerap material |

| Penelitian terdahulu | Fokus dan temuan pokok | Perbedaan dengan kajian ini |
|---|---|---|
| Budiyarto dkk. (2025), *Waste Management & Research* | Tinjauan penerapan bank sampah di kabupaten/kota Indonesia; kontribusi nasional sekitar 7% | Bersifat tinjauan kebijakan agregat; tidak menawarkan rancangan instrumen maupun rancangan kelembagaan operasional |
| Septiani dkk. (2024), *Indonesian Journal of Business and Entrepreneurship* | Model bisnis sosiopreneur Bank Sampah Surakarta dan sumbangannya bagi keberlanjutan | Bersifat analisis model bisnis pada kelembagaan yang berjalan; tidak menyentuh digitalisasi pengukuran dan insentif seketika |
| Rosi & Sandria (2025), *Industrial and Domestic Waste Management* | Tata kelola multi-aktor PLTSa Putri Cempo | Berfokus pada tata kelola fasilitas hilir; tidak membahas intervensi pengurangan di hulu |
| Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025), *Sustainability* | Ulasan bukti skema pengembalian berimbalan di Uni Eropa | Konteks Uni Eropa dengan jaringan ritel dan regulasi kemasan yang berbeda; belum diterjemahkan ke kelembagaan bank sampah Indonesia |

Berdasarkan perbandingan tersebut, kebaruan kajian ini terletak pada tiga hal yang belum pernah dipadukan dalam satu rancangan untuk konteks Kota Surakarta, yaitu: (1) penyatuan validasi massa berbasis *load cell* yang disertai analisis ketidakpastian pengukuran dengan skema poin yang dapat diaudit; (2) penautan pencairan insentif kepada penyelenggara jasa pembayaran berizin sehingga imbalan diterima seketika dan tercatat secara sah; serta (3) pengikatan model operasional kepada kerangka hukum daerah yang telah ada, khususnya ketentuan insentif dan disinsentif dalam Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 4 Tahun 2022 dan arah pembangunan dalam Peraturan Daerah Nomor 9 Tahun 2025.

## 1.8 Definisi Operasional dan Sistematika Penulisan

### 1.8.1 Definisi Operasional

**Tabel 1.3** Definisi operasional istilah kunci

| Istilah | Definisi operasional yang dipakai dalam kajian ini |
|---|---|
| Ekonomi sirkular | Sistem ekonomi yang mempertahankan nilai guna material selama mungkin melalui perlambatan, penutupan, dan penyempitan arus material, sehingga meminimalkan buangan akhir |
| Bank sampah | Fasilitas pengelolaan sampah dengan prinsip pengurangan dan penanganan sampah sebagaimana dimaksud dalam Peraturan Menteri LHK Nomor 14 Tahun 2021, yang menerima setoran sampah terpilah dan mencatatnya sebagai simpanan bernilai ekonomi |

| Istilah | Definisi operasional yang dipakai dalam kajian ini |
|---|---|
| *Smart Trash Bin* | Wadah sampah yang dilengkapi mikrokontroler, sensor ultrasonik, sel beban, dan pemindai optik, yang mampu mengukur, memvalidasi, dan mengirimkan data setoran secara nirkabel |
| Insentif poin digital | Imbalan bernilai ekonomi yang dihitung dari massa material terverifikasi, dicatat pada basis data terpusat, dan dapat dicairkan melalui kanal pembayaran berizin |
| Partisipasi pemilahan | Tindakan warga memisahkan sampah menurut kategori organik dan anorganik sebelum diserahkan, diukur melalui frekuensi setoran, massa setoran, dan tingkat kemurnian material |
| Kemurnian material | Proporsi massa material sasaran terhadap total massa setoran, dinyatakan dalam persen, yang menentukan kelas harga pada pasar sekunder |
| Reduksi beban TPA | Selisih massa material yang berhasil dialihkan dari aliran menuju TPA Putri Cempo, dinyatakan dalam ton per hari |
| Penyerap material (*off-taker*) | Badan usaha berizin yang membeli material daur ulang secara berkelanjutan berdasarkan perjanjian tertulis dengan spesifikasi mutu dan harga yang disepakati |

### 1.8.2 Sistematika Penulisan

Naskah kajian ini disusun dalam lima bab yang saling bertaut.

**Bab I Pendahuluan** menguraikan kesenjangan antara kondisi ideal dan kondisi faktual pengelolaan sampah Kota Surakarta, merumuskan masalah, tujuan, manfaat, dan kebaruan kajian.

**Bab II Tinjauan Pustaka** memaparkan landasan teori, sintesis penelitian terdahulu secara tematik, celah penelitian, dan kerangka berpikir yang menjadi pisau analisis.

**Bab III Metodologi Penelitian** menjelaskan jenis dan pendekatan penelitian, lokasi dan waktu, subjek dan sumber data, definisi operasional variabel, teknik pengumpulan data, uji keabsahan data, teknik analisis, serta etika penelitian.

**Bab IV Pembahasan** menyajikan empat subbab yang berpadanan satu-satu dengan empat tujuan penelitian.

**Bab V Penutup** memuat kesimpulan atas setiap subbab pembahasan serta rekomendasi penelitian dan rekomendasi kebijakan bagi masing-masing pemangku kepentingan.

# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

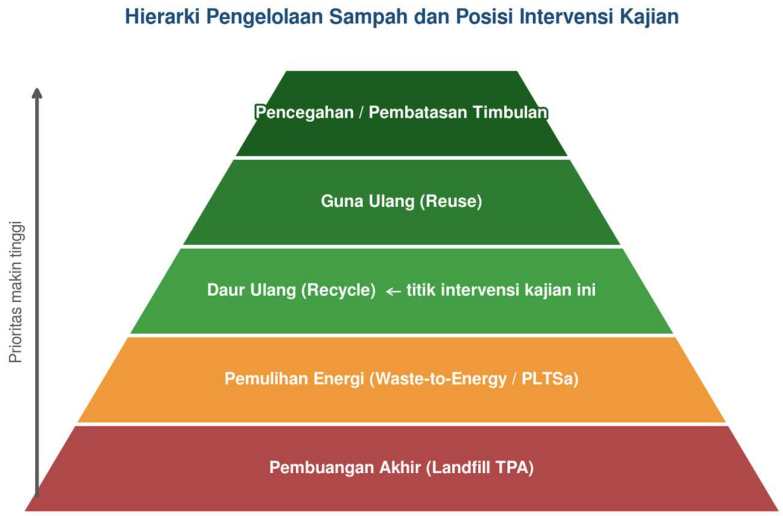
## 2.1 Landasan Teori

### 2.1.1 Konsep Ekonomi Sirkular

Sistem pengelolaan sampah perkotaan secara tradisional umumnya menganut model ekonomi linear, yaitu paradigma ambil, pakai, dan buang (*take–make–dispose*). Model ini bertumpu pada pengumpulan sampah yang pada akhirnya bermuara di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA), yang memicu penumpukan beban lingkungan secara masif seiring bertambahnya volume timbulan sampah harian. Sebagai solusi strategis atas inefisiensi tersebut, pendekatan ekonomi sirkular hadir untuk mentransformasi tata kelola lingkungan. Ekonomi sirkular merupakan sistem ekonomi tertutup (*closed-loop system*) yang bertujuan untuk mempertahankan nilai guna material selama mungkin, meminimalkan buangan akhir, dan mengoptimalkan regenerasi sumber daya alam. Dalam paradigma ini, sampah tidak lagi direduksi sebagai residu akhir yang tak bernilai, melainkan direposisi sebagai komoditas material sekunder yang memiliki potensi ekonomi.

Secara konseptual, ekonomi sirkular dibangun di atas tiga prinsip yang dirumuskan Ellen MacArthur Foundation, yaitu menghapus limbah dan polusi sejak tahap rancangan, mempertahankan produk dan material dalam peredaran pada nilai tertingginya, serta meregenerasi sistem alam. Bocken dan rekan menerjemahkan prinsip tersebut menjadi tiga strategi arus material yang lebih operasional: memperlambat arus (*slowing*) melalui perpanjangan umur pakai, menutup arus (*closing*) melalui daur ulang, dan mempersempit arus (*narrowing*) melalui efisiensi penggunaan sumber daya. Kajian ini bekerja terutama pada strategi menutup arus, dengan penekanan pada mutu material yang beredar kembali, bukan sekadar pada kuantitasnya. Penekanan ini penting karena daur ulang yang menghasilkan material terkontaminasi hanya menghasilkan penurunan mutu bertingkat (*downcycling*) dan tidak benar-benar menutup lingkar material.

Dalam praktik kebijakan, prinsip-prinsip tersebut diwujudkan melalui hierarki pengelolaan sampah yang menempatkan pencegahan pada posisi tertinggi dan pembuangan akhir pada posisi terendah. Hierarki inilah yang menjelaskan mengapa penguatan pengurangan di sumber harus diprioritaskan di atas pemulihan energi, sebagaimana tergambar pada Gambar 2.1.




**Gambar 2.1** Hierarki pengelolaan sampah dan posisi intervensi kajian

### 2.1.2 Bank Sampah sebagai Infrastruktur Sosial Ekonomi Sirkular

Keberhasilan implementasi ekonomi sirkular di tingkat akar rumput sangat bergantung pada kehadiran infrastruktur sosial berupa Bank Sampah. Bank sampah berperan sebagai simpul yang mempertemukan warga penyetor dengan pasar material sekunder, sekaligus sebagai sarana edukasi lingkungan yang berkelanjutan. Melalui mekanisme menabung sampah, warga memperoleh manfaat ekonomi sekaligus terlatih memilah sejak dari rumah.

Secara hukum, kedudukan bank sampah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Sampah pada Bank Sampah. Peraturan ini membedakan Bank Sampah Unit yang beroperasi pada skala komunitas dengan Bank Sampah Induk yang berfungsi sebagai simpul agregasi antarunit, serta menempatkan pendekatan ekonomi sirkular sebagai dasar pertimbangan penyelenggaraannya. Konsideran peraturan tersebut menyatakan bahwa pengelolaan sampah perlu dilakukan secara komprehensif dan terpadu dari hulu ke hilir dengan pendekatan ekonomi sirkular, sehingga memberikan manfaat secara ekonomi, sehat bagi masyarakat, dan aman bagi lingkungan.

Meskipun demikian, capaian empiris bank sampah di Indonesia masih terbatas. Tinjauan Budiyarto dkk. (2025) memperkirakan kontribusi bank sampah terhadap pengelolaan sampah daur ulang nasional baru sekitar 7%. Juriani dan Anugrahini (2026) menemukan bahwa hambatan utama bank sampah komunitas bukan terletak pada kemauan warga, melainkan pada keterbatasan sumber daya pengelola, ketidaktetapan pasar penyerap, dan ketiadaan dukungan kelembagaan yang berkelanjutan. Temuan sejenis dilaporkan Sya'diyah dkk. (2025) untuk konteks Bantul dan Putera dkk. (2026) untuk konteks Banjarmasin, yang menempatkan bank sampah sebagai gerakan sosial budaya yang bertumpu pada identitas kolektif, bukan semata-mata unit usaha. Dengan kata lain, keberlanjutan

bank sampah ditentukan oleh mutu kelembagaan dan kesegeraan manfaat, bukan oleh sekadar keberadaan sarana.

### 2.1.3 Teori Perubahan Perilaku, Gamifikasi, dan Skema Insentif

Perubahan perilaku pemilahan sampah tidak dapat dicapai hanya melalui imbauan. Diperlukan rekayasa lingkungan keputusan yang menurunkan hambatan bertindak sekaligus memberikan penguatan positif yang konsisten. Gamifikasi, yaitu penerapan unsur permainan pada konteks non-permainan, banyak digunakan untuk tujuan tersebut melalui unsur poin, lencana, papan peringkat, dan tantangan berjangka.

Secara teoretis, kajian ini bersandar pada tiga kerangka yang saling melengkapi. *Pertama*, teori perilaku terencana (*theory of planned behavior*) dari Ajzen menjelaskan bahwa niat berperilaku dibentuk oleh sikap terhadap perilaku, norma subjektif, dan persepsi kendali perilaku. Dalam konteks pemilahan sampah, persepsi kendali perilaku sangat dipengaruhi oleh ketersediaan sarana dan kejelasan prosedur; inilah yang dituju oleh rancangan wadah dua kompartemen yang dapat diakses tanpa jadwal. *Kedua*, teori penentuan nasib sendiri (*self-determination theory*) dari Deci dan Ryan membedakan motivasi intrinsik dari motivasi ekstrinsik dan memperingatkan adanya kemungkinan pendesakan motivasi (*crowding-out*) apabila imbalan berwujud diberikan secara berlebihan pada perilaku yang semula dilakukan atas dorongan nilai. *Ketiga*, kerangka ekonomi perilaku menjelaskan bahwa kesegeraan imbalan mempengaruhi perilaku jauh lebih kuat daripada besaran imbalan, karena manusia cenderung mendiskontokan manfaat yang tertunda secara tajam.

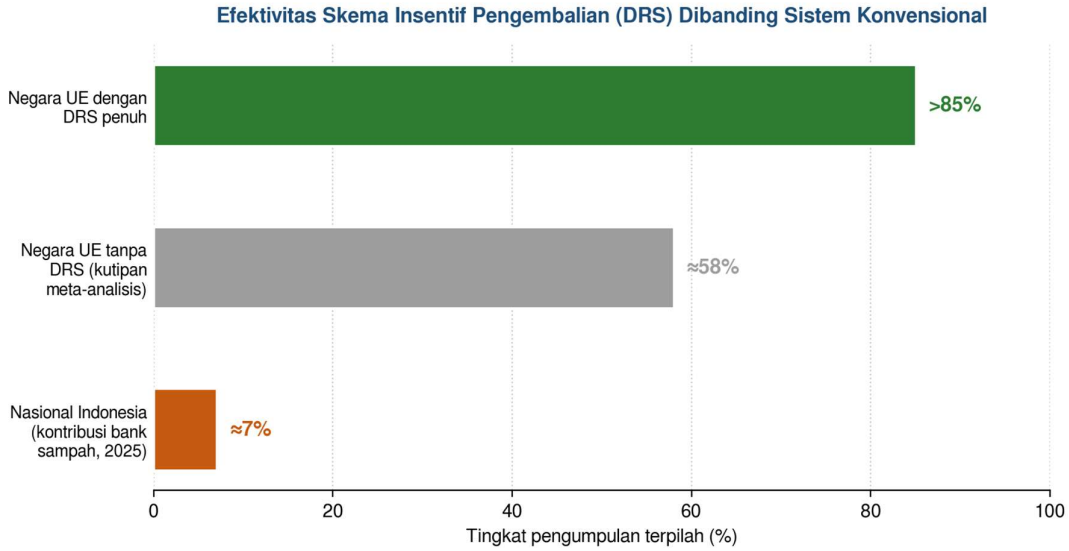
Ketiga kerangka tersebut memberikan implikasi rancangan yang saling menyeimbangkan. Kesegeraan pencairan insentif dibenarkan secara teoretis karena menurunkan diskonto waktu. Namun besaran insentif tidak boleh dijadikan satu-satunya penggerak, sebab risiko pendesakan motivasi intrinsik akan muncul apabila warga mulai memandang pemilahan semata-mata sebagai transaksi. Oleh karena itu rancangan yang diusulkan memadukan imbalan ekonomi dengan unsur pengakuan sosial pada tingkat RW, sehingga norma subjektif tetap terpelihara. Perlu ditegaskan pula bahwa bukti mengenai keawetan pengaruh gamifikasi masih terbatas: meta-analisis Meyerowitz-Katz dkk. (2020) pada intervensi berbasis aplikasi menunjukkan tingkat putus pakai yang tinggi, sehingga klaim keberhasilan jangka panjang harus disampaikan secara berhati-hati dan wajib diuji melalui pemantauan longitudinal.

### 2.1.4 Skema Pengembalian Berimbalan dan Tanggung Jawab Produsen

Skema pengembalian berimbalan (*deposit–return scheme*, DRS) merupakan instrumen ekonomi yang menambahkan nilai simpanan pada harga kemasan minuman, yang dikembalikan ketika kemasan kosong diserahkan pada titik pengumpulan. Instrumen ini merupakan padanan konseptual terdekat dari

skema poin digital yang diusulkan dalam kajian ini, sehingga bukti empirisnya layak dijadikan rujukan.

Ulasan bukti sistematis yang dilakukan Sidorczuk-Pietraszko, Piontek, dan Larsson (2025) terhadap 63 sumber ilmiah dan kelabu menghasilkan sejumlah temuan yang relevan. Negara-negara Uni Eropa dengan sistem yang beroperasi penuh mencatat tingkat pengumpulan kemasan di atas 85%, dan meta-analisis Calabrese dkk. yang dirujuk dalam ulasan tersebut memperkirakan selisih 20 hingga 30 poin persentase dibandingkan negara tanpa skema serupa. Penerapan skema ini juga diikuti penurunan sampah tercecer sebesar 40–60%. Temuan yang paling penting bagi konteks Indonesia adalah bahwa keberhasilan skema tidak berkorelasi dengan tingkat kematangan sistem persampahan kota secara umum, sehingga skema berinsentif berpotensi menghasilkan tingkat pengumpulan tinggi bahkan pada kota yang sistem persampahan umumnya masih lemah.




*Sumber: Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025); Calabrese dkk. (2021) dalam ulasan tersebut; Budiyarto dkk. (2025).*

**Gambar 2.2** Efektivitas skema insentif pengembalian dibanding sistem konvensional

Ulasan tersebut juga memuat tiga peringatan rancangan yang diadopsi dalam kajian ini. *Pertama*, besaran imbalan harus dikalibrasi: apabila terlalu rendah, material justru dialihkan kembali ke aliran sampah biasa. *Kedua*, kemudahan akses merupakan penentu utama; pengalaman Rumania menunjukkan bahwa penilaian negatif masyarakat lebih banyak disebabkan oleh kekurangan titik pengumpulan dan antrean panjang, bukan oleh gagasan skemanya. *Ketiga*, skema semacam ini sebaiknya dipahami sebagai bagian dari kerangka tanggung jawab produsen yang diperluas (*extended producer responsibility*, EPR), bukan sebagai instrumen yang berdiri sendiri. Di Indonesia, kerangka EPR dijalankan melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.75 Tahun 2019 tentang Peta Jalan Pengurangan Sampah oleh Produsen, yang membuka peluang pendanaan bersama antara pemerintah kota dan produsen kemasan.

Aspek kemurnian material juga terdokumentasi secara kuantitatif. Pengujian van Velzen yang dikutip dalam ulasan tersebut menemukan jumlah partikel pengotor pada PET daur ulang hasil skema berimbalan hampir sembilan kali lebih sedikit dibandingkan PET dari pengumpulan terpilah biasa, dan lebih dari lima kali lebih sedikit dibandingkan PET hasil pemulihan mekanis. Temuan ini menjadi dasar ilmiah bagi argumen kajian bahwa nilai tambah utama instrumentasi presisi terletak pada kemurnian material, bukan pada kuantitas semata.

### 2.1.5 Instrumentasi *Internet of Things* pada *Smart Trash Bin*

Teknologi sistem tertanam (*embedded systems*) berupa mikrokontroler dan sensor dapat dimanfaatkan untuk memantau volume penampungan sampah secara langsung. Arsitektur *Internet of Things* pada *Smart Trash Bin* merupakan implementasi sistem instrumentasi terpadu yang menjembatani variabel fisis di lapangan dengan ranah digital. Sistem ini beroperasi melalui integrasi beberapa subsistem perangkat keras yang saling berkomunikasi.

**a. Mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan.** Sebagai pusat kendali pada perangkat keras, sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 yang memiliki arsitektur mikroprosesor dwi-inti Xtensa 32-bit LX6 dengan konsumsi daya rendah. Mikrokontroler ini terintegrasi dengan modul transmisi Wi-Fi (802.11 b/g/n) dan *Bluetooth Low Energy*, sehingga memungkinkan pengiriman paket data telemetri secara nirkabel melalui protokol HTTP atau MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) menuju peladen. Pena masukan/keluaran serbaguna pada ESP32 mendukung protokol komunikasi serial I2C, SPI, dan UART yang diperlukan untuk membaca data dari berbagai sensor periferal secara serentak.

**b. Pengukuran volume berbasis gelombang ultrasonik.** Untuk fungsi peringatan kapasitas pada wadah organik, sistem memanfaatkan sensor ultrasonik pendeteksi jarak seri HC-SR04 atau tipe tahan air JSN-SR04T. Sensor bekerja berdasarkan prinsip pantulan gelombang akustik atau *time of flight*. Transduser pemancar mengeluarkan rentetan gelombang pada frekuensi ultrasonik sekitar 40 kHz yang merambat melalui udara dan memantul ketika mengenai permukaan tumpukan sampah. Jarak antara tutup wadah dan permukaan sampah dihitung melalui persamaan:

$$s = (v \times t) / 2$$

dengan s adalah jarak, v adalah cepat rambat gelombang suara di udara, dan t adalah total waktu tempuh bolak-balik.

Perlu dikoreksi bahwa nilai cepat rambat bunyi tidak dapat diperlakukan sebagai tetapan sebesar 340 m/s. Cepat rambat bunyi di udara bergantung pada suhu menurut hubungan pendekatan $v \approx 331{,}3 + 0{,}606 \cdot T$, dengan T dalam derajat Celsius. Pada suhu 20 °C nilainya sekitar 343 m/s, sedangkan pada 35 °C — suhu yang lazim dijumpai pada wadah logam yang terpapar matahari di Surakarta — nilainya sekitar 352 m/s. Apabila program tetap memakai tetapan 340 m/s, galat

sistematis yang timbul mencapai sekitar 3,5%. Oleh karena itu rancangan yang diusulkan mewajibkan penambahan sensor suhu, misalnya DHT22 atau DS18B20, untuk melakukan koreksi cepat rambat secara adaptif. Koreksi ini bukan sekadar penyempurnaan teknis, melainkan penentu keandalan ambang peringatan kepenuhan wadah.

**c. Validasi massa menggunakan sel beban dan pengondisi sinyal HX711.** Pada wadah anorganik, validasi setoran dilakukan melalui pengukuran massa. Instrumen yang digunakan adalah sel beban (*load cell*) bertipe *strain gauge* yang dirangkai dalam konfigurasi jembatan Wheatstone. Ketika terdapat beban di atas pelat penampung, terjadi deformasi mikroskopis pada *strain gauge* yang mengakibatkan perubahan resistansi listrik. Perubahan resistansi ini menghasilkan fluktuasi tegangan analog dalam orde milivolt. Untuk mendigitalkan sinyal tersebut, sistem menggunakan modul HX711 yang berfungsi sekaligus sebagai penguat dan pengubah analog ke digital beresolusi 24 bit.

Terhadap uraian tersebut perlu ditambahkan catatan metrologis yang penting. Resolusi 24 bit pada HX711 tidak berarti ketelitian 24 bit. Sebagian bit terbawah tenggelam dalam derau, sehingga jumlah bit yang benar-benar bebas derau pada penguatan 128 kali umumnya berada pada kisaran 19 sampai 20 bit. Selain itu, sel beban mengalami rayapan (*creep*), histeresis, dan pergeseran titik nol akibat perubahan suhu. Konsekuensinya, sistem tidak boleh mengklaim ketelitian yang lebih baik daripada yang dapat dipertanggungjawabkan. Rancangan yang diusulkan karena itu menetapkan pembulatan poin ke kelipatan massa tertentu dan penetapan nilai ambang minimum, agar galat pengukuran tidak berubah menjadi galat nilai ekonomi yang merugikan salah satu pihak. Perlu ditegaskan pula bahwa alat ukur yang dipakai untuk menentukan besaran imbalan berpotensi tunduk pada Undang-Undang Nomor 2 Tahun 1981 tentang Metrologi Legal, sehingga kalibrasi berkala oleh unit metrologi legal daerah merupakan keharusan, bukan pilihan.

**d. Identifikasi pengguna melalui pemindai optik.** Wadah anorganik dilengkapi modul pemindai optik serial, misalnya GM66 atau modul kamera pembaca kode batang, yang menangkap citra kode QR pengguna, mengubahnya menjadi untaian karakter identitas, dan mengirimkannya ke mikrokontroler melalui komunikasi serial. Proses autentikasi perangkat keras inilah yang menjadi gerbang pencatatan poin digital ke basis data.

### 2.1.6 Arsitektur Basis Data, Aplikasi, dan Perlindungan Data

Infrastruktur *Smart Trash Bin* tidak dapat berdiri sendiri sebagai entitas perangkat keras yang terisolasi. Transformasi kegiatan fisik menjadi skema insentif ekonomi digital mengharuskan adanya integrasi antara simpul sensor di lapangan, peladen komputasi awan, dan perangkat pengguna. Interoperabilitas ini dicapai melalui antarmuka pemrograman aplikasi (*application programming interface*) yang menstandarkan format pertukaran data, umumnya dalam bentuk JSON, serta

melalui basis data waktu-nyata yang mencatat setiap transaksi setoran, konversi poin, dan pencairan saldo.

Terdapat dua aspek yang belum dibahas pada naskah terdahulu dan perlu ditambahkan agar rancangan ini sah secara hukum. *Pertama*, seluruh pemrosesan identitas pengguna tunduk pada Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022 tentang Pelindungan Data Pribadi. Konsekuensinya, sistem wajib menerapkan asas pembatasan tujuan, meminta persetujuan yang sah dan spesifik, menyediakan mekanisme penarikan persetujuan, serta menerapkan minimalisasi data. Dalam rancangan yang diusulkan, kode QR pengguna tidak memuat data pribadi apa pun melainkan hanya token acak yang dipetakan pada basis data terlindungi, dan token tersebut diperbarui secara berkala agar tidak dapat dipakai untuk penjejakan lintas lokasi. *Kedua*, mekanisme pencairan saldo menyentuh ranah sistem pembayaran. Penyelenggaraan uang elektronik di Indonesia diatur oleh Bank Indonesia, sehingga kanal pencairan wajib menggunakan penyelenggara jasa pembayaran yang telah memperoleh izin. Bank sampah maupun pemerintah kota tidak boleh menghimpun dan mengelola saldo warga secara mandiri tanpa izin, sebab hal tersebut berpotensi dikategorikan sebagai penghimpunan dana masyarakat.

Konsekuensi rancangan dari kedua ketentuan tersebut adalah bahwa poin dalam sistem ini harus diperlakukan sebagai catatan hak tagih atas hasil penjualan material, bukan sebagai alat pembayaran. Poin baru berubah menjadi uang pada saat pencairan melalui kanal berizin, dan seluruh transaksi tercatat pada jejak audit yang dapat diperiksa oleh inspektorat daerah.

### 2.1.7 Landasan Hukum Kajian

**Tabel 2.1** Landasan hukum yang menaungi rancangan kajian

| Peraturan | Materi yang relevan bagi kajian |
|---|---|
| UU No. 18 Tahun 2008 | Kewajiban pengelolaan sampah dari hulu ke hilir; pengurangan di sumber; peran serta masyarakat |
| UU No. 2 Tahun 1981 | Metrologi legal; kewajiban tera dan tera ulang alat ukur yang dipakai dalam transaksi |
| UU No. 27 Tahun 2022 | Pelindungan data pribadi; asas persetujuan, pembatasan tujuan, dan minimalisasi data |
| Perpres No. 97 Tahun 2017 | Jakstranas: target pengurangan 30% dan penanganan 70%; kewajiban daerah menyusun Jakstrada |
| Perpres No. 35 Tahun 2018 | Percepatan pembangunan instalasi pengolah sampah menjadi energi listrik; batas atas biaya layanan pengolahan sampah |
| Permen LHK No. 14 Tahun 2021 | Pengelolaan sampah pada bank sampah; klasifikasi Bank Sampah Unit dan Bank Sampah Induk |
| Permen LHK No. P.75 Tahun 2019 | Peta jalan pengurangan sampah oleh produsen; dasar kemitraan pendanaan berbasis EPR |
| Permendagri No. 7 Tahun 2021 | Tata cara perhitungan timbulan dan retribusi pelayanan persampahan |

| Peraturan | Materi yang relevan bagi kajian |
|---|---|
| Perda Kota Surakarta No. 4 Tahun 2022 | Pengelolaan sampah; memuat bab insentif dan disinsentif serta kerja sama |
| Perda Kota Surakarta No. 9 Tahun 2025 | RPJMD Kota Surakarta 2025–2029; visi, lima misi, dan arah kebijakan pembangunan |

## 2.2 Penelitian Terdahulu (*State of the Art*)

Kajian pustaka disusun secara tematik agar terlihat pola temuan yang telah mapan, titik pertentangan yang masih terbuka, serta metode yang lazim dipakai. Empat tema dibahas berikut ini.

### 2.2.1 Tema Instrumentasi dan Metrologi Fisik

Kelompok penelitian pertama memusatkan perhatian pada keandalan pengukuran fisis. Sendari dkk. (2025) mengembangkan sistem penimbangan cerdas berbasis IoT dan kecerdasan buatan untuk mendukung ekonomi sirkular pada bank sampah, dan menunjukkan bahwa otomasi penimbangan mampu memangkas waktu layanan sekaligus mengurangi perselisihan angka antara penyetor dan pengelola. Hermawan dkk. (2025) melaporkan penguatan literasi lingkungan melalui tempat sampah pintar berbasis IoT pada konteks pengabdian masyarakat, dengan temuan bahwa umpan balik visual berperan penting dalam mempertahankan perhatian pengguna.

Pola yang konsisten pada kelompok ini adalah bahwa integrasi sensor massa dan sensor jarak secara teknis telah matang dan dapat direplikasi dengan komponen berbiaya rendah. Namun terdapat kesenjangan yang berulang: sebagian besar laporan menyajikan angka ketelitian tanpa menguraikan anggaran ketidakpastian pengukuran, tanpa menyebutkan prosedur kalibrasi berkala, dan tanpa mengaitkan hasil pengukuran dengan konsekuensi hukum apabila angka tersebut dipakai untuk menentukan nilai uang. Kajian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menyajikan analisis mitigasi galat pada Subbab 4.1.3.

### 2.2.2 Tema Gamifikasi, Insentif, dan Keberlanjutan Partisipasi

Kelompok kedua meneliti sisi perilaku. Tundjungsari dkk. (2025) mengembangkan model Circonomy yang memadukan IoT, *semantic web*, dan gamifikasi untuk pengelolaan sampah sirkular di Indonesia; purwarupanya menunjukkan bahwa penyediaan skema insentif berbasis teknologi dapat mendorong warga menerapkan prinsip 3R. Fahriza dan Yuliana (2024) melaporkan pengalaman digitalisasi bank sampah di Bandung yang memperlihatkan perbaikan efisiensi pencatatan dan kecepatan layanan.

Di sisi lain, terdapat temuan yang berlawanan arah dan tidak boleh diabaikan. Meta-analisis Meyerowitz-Katz dkk. (2020) atas intervensi berbasis aplikasi menunjukkan tingkat putus pakai yang tinggi pada penggunaan jangka

panjang. Sementara itu, Saptutyningsih dan Amalia (2024) menemukan bahwa modal sosial merupakan penjelas kuat bagi kesediaan rumah tangga membayar bagi perbaikan pengelolaan sampah, yang menyiratkan bahwa faktor komunitas dapat sama pentingnya dengan insentif individual. Pertentangan ini melahirkan kompromi teoretis yang diadopsi kajian ini: insentif ekonomi dipakai untuk menurunkan hambatan awal partisipasi, sedangkan penguatan norma komunitas dipakai untuk menjaga keberlanjutannya. Rancangan yang diusulkan karena itu tidak hanya menampilkan saldo individu, tetapi juga capaian agregat tingkat RW.

Bukti dari ranah kebijakan memperkuat kompromi tersebut. Ulasan Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025) menyimpulkan bahwa penentu utama perilaku pengembalian adalah biaya non-moneter berupa waktu dan kemudahan, bukan semata-mata besaran imbalan. Temuan ini sejalan dengan hasil Juriani dan Anugrahini (2026) mengenai hambatan jadwal pada bank sampah komunitas, dan menjadi alasan utama mengapa kajian ini menekankan ketersediaan layanan tanpa jadwal.

### 2.2.3 Tema Tata Kelola dan Kelembagaan Bank Sampah

Kelompok ketiga menelaah sisi kelembagaan. Budiyarto dkk. (2025) memetakan penerapan bank sampah pada berbagai kabupaten/kota di Indonesia dan menyimpulkan bahwa kontribusinya terhadap pengelolaan sampah daur ulang nasional masih terbatas. Putera dkk. (2026) menempatkan bank sampah sebagai gerakan sosial berbasis budaya yang bertumpu pada mobilisasi sumber daya dan pembentukan identitas kolektif. Sya'diyah dkk. (2025) menyoroti efektivitas pengelolaan bank sampah pada tingkat kapanewon, sedangkan Sasongko dkk. (2025) menelaah integrasi ekonomi sirkular melalui program berbasis pemangku kepentingan.

Pola yang muncul dari kelompok ini adalah bahwa kegagalan bank sampah jarang bersifat teknis. Penyebab yang berulang adalah ketidaktetapan pasar penyerap, keterbatasan kapasitas pengelola, dan lemahnya dukungan kelembagaan. Implikasinya bagi kajian ini jelas: perbaikan teknologi tanpa kepastian penyerap material hanya akan memindahkan titik kemacetan, tidak menghilangkannya. Karena itu perjanjian tertulis dengan penyerap material berizin ditempatkan sebagai prasyarat, bukan sebagai pelengkap.

### 2.2.4 Tema Tata Kelola Persampahan Kota Surakarta

Kelompok keempat memusatkan perhatian pada konteks lokus. Septiani dkk. (2024) menelaah model bisnis sosiopreneur pada bank sampah Kota Surakarta dan menemukan adanya peningkatan pendapatan serta perubahan perilaku pengelolaan sampah pada warga yang terlibat. Rosi dan Sandria (2025) menganalisis tata kelola multi-aktor PLTSa Putri Cempo dan menyoroti kerumitan koordinasi antarpihak. Yusmaman dkk. (2024) menegaskan urgensi reduksi sampah organik sebelum dibuang ke TPA dalam kerangka ekonomi sirkular di Kota

Surakarta, sedangkan Tuzzahra dan Ainun (2020) menghitung sisa umur pakai TPA Putri Cempo. Ariyanti dkk. (2025) meneliti hubungan kepadatan penduduk dengan tingkat kesadaran pengelolaan sampah berbasis 3R pada permukiman padat Kelurahan Sangkrah, dan menemukan bahwa kepadatan bukanlah penjelas tunggal; ketersediaan sarana dan modal sosial justru lebih menentukan.

Sumber resmi dan pemberitaan lembaga negara melengkapi gambaran tersebut dengan data mutakhir. Kajian E-Riset BRIDA Kota Surakarta (2024) menyajikan komposisi sumber sampah dan kesenjangan pembiayaan penanganan sampah, termasuk temuan bahwa pencatatan retribusi masih menggunakan lembar kerja sederhana sehingga rawan galat dan belum tersinkronisasi dengan basis data kependudukan. DPRD Kota Surakarta (2025) mencatat kinerja PLTSa yang masih jauh dari rancangan. Pada Maret 2026, Menteri Lingkungan Hidup menyatakan akan melakukan audit menyeluruh atas operasional dan kelayakan finansial PLTSa Putri Cempo (Tirto, 2026), sementara Kepala DLH Kota Surakarta menyebutkan kapasitas terolah baru 50–80 ton per hari (RRI, 2026).

Satu koreksi penting perlu dicatat pada tema ini. Kajian WALHI (2024) serta pemberitaan Antara (2019) menunjukkan bahwa PLTSa Putri Cempo justru **tidak** memperoleh biaya layanan pengolahan sampah (*tipping fee*) dari Pemerintah Kota Surakarta; skema yang dipilih adalah skema tanpa biaya layanan, dengan pendapatan operator bersandar pada penjualan listrik. Angka Rp500.000 per ton yang sering dikutip merupakan batas atas menurut Peraturan Presiden Nomor 35 Tahun 2018, bukan besaran yang benar-benar dibayarkan oleh Kota Surakarta. Koreksi ini berdampak langsung pada analisis kelayakan ekonomi dan akan diuraikan pada Subbab 4.4.

## 2.3 Celah Penelitian (*Research Gap*)

Sintesis atas keempat tema di atas memperlihatkan bahwa literatur telah mapan pada masing-masing pilar secara terpisah, tetapi belum menyatukannya. Tabel 2.2 merangkum pola temuan, titik pertentangan, dan celah yang tersisa.

**Tabel 2.2** Sintesis tematik penelitian terdahulu dan celah yang tersisa

| Tema | Temuan yang sudah konsisten | Titik yang masih terbuka |
|---|---|---|
| Instrumentasi | Integrasi sensor massa dan jarak layak secara teknis dan berbiaya rendah | Anggaran ketidakpastian pengukuran, prosedur kalibrasi berkala, dan implikasi metrologi legal belum dibahas |
| Gamifikasi dan insentif | Insentif dan unsur permainan meningkatkan partisipasi pada tahap awal | Keawetan partisipasi masih diperdebatkan; risiko pendesakan motivasi intrinsik belum diuji pada konteks bank sampah |
| Kelembagaan | Kegagalan bank sampah lebih bersifat kelembagaan daripada teknis | Belum ada rancangan yang menempatkan perjanjian penyerap material sebagai prasyarat operasional |

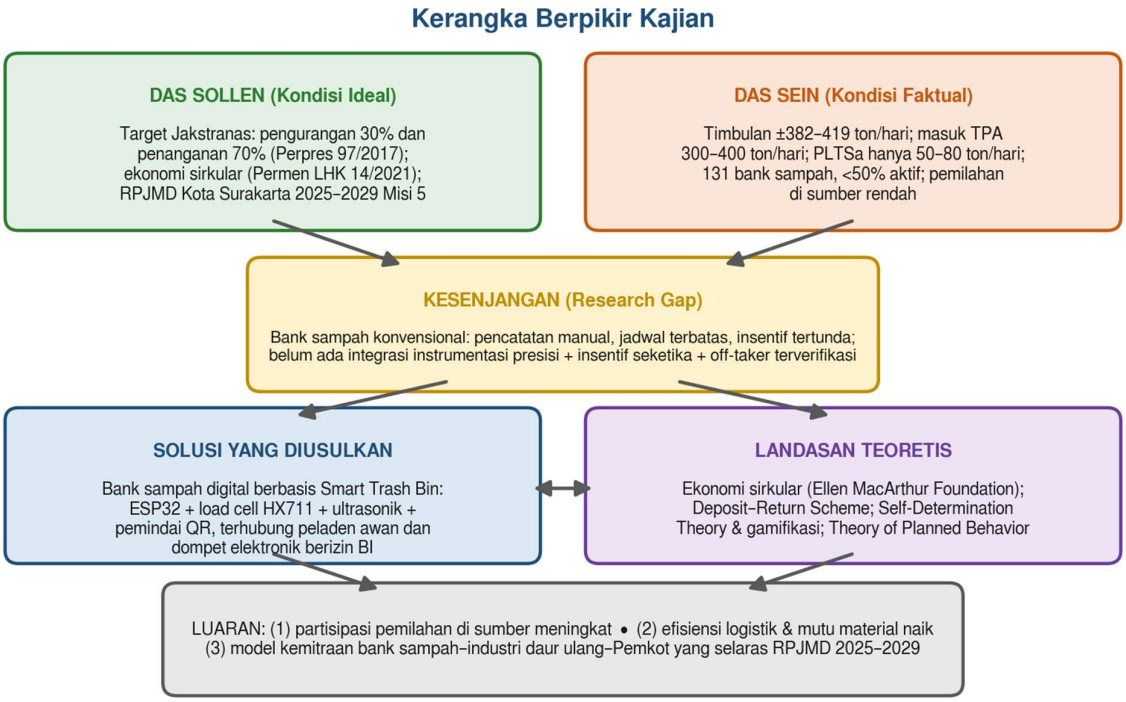
| Tema | Temuan yang sudah konsisten | Titik yang masih terbuka |
|---|---|---|
| Konteks Surakarta | Fasilitas hilir belum bekerja sesuai rancangan; pemilahan di sumber rendah | Belum ada rancangan hulu yang secara eksplisit ditautkan pada ketentuan insentif dalam Perda 4/2022 dan arah RPJMD 2025–2029 |

Dengan demikian, celah penelitian yang dituju kajian ini dapat dinyatakan sebagai berikut: belum tersedia rancangan bank sampah digital yang secara serentak (a) menyajikan validasi massa yang tertelusur secara metrologis beserta batas ketidakpastiannya, (b) menautkan pencairan insentif kepada kanal pembayaran berizin sehingga sah dan dapat diaudit, dan (c) mengikatkan model operasionalnya pada kerangka hukum daerah dan penyerap material terverifikasi dalam konteks satu kota. Ketiga unsur inilah yang menjadi justifikasi rumusan masalah pada Subbab 1.4.

## 2.4 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir kajian disusun sebagai sintesis dari landasan teori, penelitian terdahulu, dan celah penelitian. Alurnya bermula dari perbandingan antara kondisi ideal yang diamanatkan regulasi dengan kondisi faktual di Kota Surakarta, yang melahirkan kesenjangan berupa lemahnya keberlanjutan bank sampah dan rendahnya pemilahan di sumber. Kesenjangan tersebut direspons melalui solusi berupa bank sampah digital berbasis *Smart Trash Bin*, yang dilandasi oleh empat kerangka teoretis, dan diarahkan pada tiga luaran yang berpadanan dengan tujuan penelitian.

Gambar 2.3 menggantikan bagan kerangka berpikir pada naskah terdahulu. Penggantian dilakukan karena bagan sebelumnya memuat angka timbulan 266 ton per hari yang tidak sesuai dengan sumber resmi mana pun, memuat satu kotak yang terduplikasi, serta tidak menampilkan alur *das Sollen*–*das Sein*–kesenjangan secara eksplisit.




**Gambar 2.3** Kerangka berpikir kajian

## 2.5 Proposisi Penelitian

Kajian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif sehingga tidak merumuskan hipotesis statistik yang diuji secara inferensial. Sebagai gantinya, dirumuskan proposisi yang diturunkan langsung dari landasan teori dan temuan terdahulu, dan yang keterpenuhannya ditelaah pada Bab IV.

1. **Proposisi 1.** Penyediaan sarana pemilahan dua kompartemen yang dapat diakses tanpa terikat jadwal akan meningkatkan persepsi kendali perilaku warga, sehingga menurunkan hambatan non-moneter yang selama ini menjadi penghalang utama partisipasi (diturunkan dari Ajzen; Sidorczuk-Pietraszko dkk., 2025; Juriani & Anugrahini, 2026).
2. **Proposisi 2.** Kesegeraan pencairan insentif berpengaruh lebih besar terhadap keberlanjutan partisipasi daripada besaran nominalnya, sepanjang besaran tersebut berada di atas ambang yang bermakna bagi rumah tangga (diturunkan dari teori diskonto waktu; Sidorczuk-Pietraszko dkk., 2025).
3. **Proposisi 3.** Nilai tambah ekonomi terbesar dari instrumentasi presisi berasal dari peningkatan kemurnian material, bukan dari peningkatan kuantitas material terkumpul (diturunkan dari van Velzen dalam Sidorczuk-Pietraszko dkk., 2025).
4. **Proposisi 4.** Tanpa perjanjian tertulis dengan penyerap material berizin, perbaikan teknologi hanya akan memindahkan titik kemacetan dari pencatatan ke penyaluran (diturunkan dari Budiyarto dkk., 2025; Juriani & Anugrahini, 2026).

# BAB III
# METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Kajian ini merupakan penelitian terapan (*applied research*) yang ditopang oleh pendekatan proses rancangan rekayasa (*engineering design process*). Pendekatan ini dipilih karena luaran utama kajian tidak berhenti pada rumusan konseptual tata kelola persampahan, melainkan berfokus pada perancangan dan sintesis purwarupa instrumen fisis yang fungsional, yaitu infrastruktur *Smart Trash Bin* berbasis *Internet of Things*.

Secara paradigmatik, kajian ini menganut pendekatan kualitatif deskriptif dengan desain studi kasus tunggal terpancang (*embedded single-case study*) sebagaimana dirumuskan Yin, dengan Kota Surakarta sebagai kasus dan tiga unit analisis terpancang di dalamnya, yaitu unit instrumen, unit perilaku pengguna, dan unit kelembagaan. Alasan pemilihan desain ini adalah bahwa pertanyaan penelitian bersifat "bagaimana", peneliti tidak mengendalikan peristiwa yang diteliti, dan fenomena yang dikaji tidak dapat dilepaskan dari konteks kebijakan kotanya. Data kuantitatif yang muncul — misalnya hasil pembebanan bertahap pada sel beban dan proyeksi skenario reduksi — diperlakukan sebagai data pendukung deskriptif, bukan sebagai dasar pengujian inferensial. Karena itu kajian ini tidak merumuskan hipotesis statistik, melainkan proposisi sebagaimana tercantum pada Subbab 2.5.

Alasan pemilihan pendekatan rekayasa terapan, dan bukan misalnya survei atau eksperimen sosial, dapat dijelaskan sebagai berikut. Survei tidak memadai karena persoalan yang dituju bukan sekadar pemetaan sikap warga, melainkan kelayakan sebuah artefak teknis yang belum ada. Eksperimen sosial berskala kota belum dapat dilaksanakan karena purwarupa masih berada pada tahap pengujian laboratorium dan belum memperoleh pengesahan metrologi. Dengan demikian, pendekatan rancangan rekayasa merupakan pilihan yang paling sesuai dengan tahap kematangan gagasan, sekaligus menjadi prasyarat bagi pengujian lapangan pada tahap berikutnya.

Secara metodologis, pendekatan kajian memadukan arsitektur instrumentasi perangkat keras dengan rekayasa perangkat lunak. Pada lapisan perangkat keras, pendekatan difokuskan pada integrasi sirkuit mikrokontroler dan modul sensor untuk mengonversi variabel fisis di lapangan menjadi besaran digital yang sahih. Pada lapisan perangkat lunak, pendekatan diarahkan pada pengembangan basis data dan antarmuka aplikasi yang merespons masukan data perangkat keras, termasuk algoritma untuk skema poin dan pencairan insentif berbasis pemindaian kode QR.




**Gambar 3.1** Alur tahapan penelitian

## 3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian adalah Kota Surakarta, Provinsi Jawa Tengah, dengan penekanan pada tiga latar, yaitu (a) permukiman padat pada tingkat RT/RW yang memiliki bank sampah unit, (b) Bank Sampah Induk Kota Surakarta sebagai simpul agregasi, dan (c) TPA Putri Cempo beserta fasilitas PLTSa sebagai muara aliran material. Pemilihan lokasi ini bukan sekadar karena kemudahan akses, melainkan karena tiga alasan substantif.

1. Kota Surakarta memiliki proporsi sampah rumah tangga sebesar 72%, jauh di atas rata-rata nasional 47%, sehingga daya ungkit intervensi di sumber lebih besar daripada di kota lain (BRIDA Kota Surakarta, 2024).
2. Kota Surakarta telah memiliki fasilitas pengolahan hilir berskala besar yang kinerjanya belum optimal, sehingga menjadi latar empiris yang tepat untuk menguji argumen bahwa penguatan hulu tidak dapat digantikan oleh teknologi hilir (RRI, 2026; Tirto, 2026).
3. Kota Surakarta sudah memiliki dasar hukum daerah yang memuat ketentuan insentif dan disinsentif dalam Peraturan Daerah Nomor 4 Tahun 2022, sehingga gagasan yang diusulkan berpeluang langsung dioperasionalkan tanpa memerlukan pembentukan peraturan daerah baru.

Waktu penelitian berlangsung selama enam bulan, meliputi tahap penelusuran pustaka dan regulasi, observasi lapangan dan koordinasi kelembagaan, perancangan dan pengujian purwarupa di laboratorium, analisis kelayakan dan penyusunan skenario, serta perumusan model tata kelola dan rekomendasi. Data sekunder yang dipakai mencakup rentang 2020 sampai dengan pertengahan 2026.

## 3.3 Subjek, Informan, dan Sumber Data

Karena kajian ini bersifat kualitatif, bagian ini menggantikan uraian populasi dan sampel. Penentuan informan dilakukan secara bertujuan (*purposive sampling*) dengan kriteria keterlibatan langsung dalam rantai pengelolaan sampah kota dan penguasaan informasi yang relevan dengan pertanyaan penelitian. Kelompok

informan meliputi pengelola bank sampah unit dan Bank Sampah Induk, petugas pengangkut sampah, warga penyetor aktif maupun tidak aktif, serta pejabat pada perangkat daerah terkait. Penambahan informan dihentikan ketika tercapai kejenuhan data, yaitu ketika wawancara tambahan tidak lagi menghasilkan tema baru yang berbeda dari tema yang telah teridentifikasi.

Sumber data dibedakan menjadi tiga. *Pertama*, data primer berupa hasil observasi partisipatif, wawancara semi-terstruktur, serta data pengujian instrumen di laboratorium. *Kedua*, data sekunder resmi berupa dokumen dan basis data pemerintah, yaitu Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional Kementerian Lingkungan Hidup, kajian E-Riset BRIDA Kota Surakarta, laman resmi Pemerintah Kota Surakarta dan DPRD Kota Surakarta, laman Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta, serta basis data peraturan pada Jaringan Dokumentasi dan Informasi Hukum. *Ketiga*, data sekunder ilmiah berupa artikel pada jurnal terindeks Scopus dan Sinta, serta dokumen teknis produsen komponen. Untuk menjaga mutu rujukan, seluruh artikel yang dikutip diverifikasi keaktifan penanda objek digitalnya dan keberadaannya pada laman resmi penerbit; rujukan yang tidak dapat diverifikasi disingkirkan dan diganti, sebagaimana dilaporkan pada Lampiran B.

## 3.4 Variabel dan Definisi Operasional

Meskipun berparadigma kualitatif, kajian ini tetap menetapkan variabel yang terukur agar analisis dapat diperiksa ulang. Tabel 3.1 menyajikan variabel, indikator, satuan, skala pengukuran, dan sumber datanya.

**Tabel 3.1** Variabel, indikator, dan skala pengukuran

| Variabel | Indikator | Satuan / skala | Sumber data |
|---|---|---|---|
| Partisipasi pemilahan | Frekuensi setoran per pengguna per bulan; jumlah pengguna aktif | Kali/bulan; orang (rasio) | Catatan transaksi sistem; observasi |
| Massa material terverifikasi | Massa botol PET tervalidasi sel beban | Gram (rasio) | Pengujian instrumen; basis data |
| Kemurnian material | Proporsi massa material sasaran terhadap total setoran | Persen (rasio) | Penimbangan pembanding di BSI |
| Ketelitian pengukuran | Simpangan pembacaan terhadap anak timbangan standar | Gram dan persen (rasio) | Uji pembebanan bertahap |
| Ketelitian volumetrik | Simpangan pembacaan jarak terhadap jarak acuan | Sentimeter (rasio) | Uji topografi tumpukan tiruan |
| Latensi sistem | Waktu dari pemindaian sampai pembaruan saldo | Detik (rasio) | Uji fungsional jaringan |
| Kesegeraan insentif | Selisih waktu setoran dengan penerimaan dana | Menit atau hari (rasio) | Uji fungsional; wawancara |
| Kesiapan kelembagaan | Ketersediaan perjanjian tertulis dengan penyerap material; status aktif bank sampah | Ada/tidak; aktif/tidak (nominal) | Dokumen; data DLH |

## 3.5 Teknik Pengumpulan Data

Untuk memastikan rancang bangun *Smart Trash Bin* memiliki kesahihan teknis dan keterterapan yang tinggi, pengumpulan data dilakukan melalui pendekatan triangulasi yang mencakup studi spesifikasi, observasi operasional, dan pengujian eksperimental terukur.

### 3.5.1 Studi Literatur dan Analisis Spesifikasi Komponen

Pengumpulan data sekunder dilakukan melalui kajian terhadap dokumen teknis dari setiap instrumen semikonduktor dan modul sensor yang digunakan. Parameter seperti rentang tegangan operasi, resolusi pengubah analog ke digital pada modul HX711, toleransi beban maksimum pada sel beban, serta daerah buta akustik pada sensor ultrasonik dikumpulkan sebagai dasar perumusan batasan sistem. Selain itu, dilakukan penelaahan regulasi persampahan daerah dan arah kebijakan pembangunan kota untuk memastikan keselarasan inovasi dengan kebijakan pemerintah kota. Penelaahan kebijakan mengacu pada Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 9 Tahun 2025 tentang RPJMD 2025–2029 dan Peraturan Daerah Nomor 4 Tahun 2022 tentang Pengelolaan Sampah, bukan pada dokumen RPJMD periode sebelumnya.

### 3.5.2 Observasi Lapangan dan Koordinasi Kelembagaan

Pemetaan arsitektur sistem poin dan penentuan nilai wajar insentif didasarkan pada pengumpulan data primer melalui observasi partisipatif di beberapa unit bank sampah tingkat RW dan Bank Sampah Induk di Surakarta. Observasi ini bertujuan mengidentifikasi hambatan logistik dalam rantai pasok sampah, durasi rata-rata penimbangan manual, serta demografi pengguna. Sesuai ketentuan pedoman riset daerah, tahapan akuisisi data lapangan dilaksanakan dengan berkoordinasi secara resmi bersama perangkat daerah terkait, yang dibuktikan melalui pengurusan surat izin penelitian yang diterbitkan oleh BRIDA Kota Surakarta.

Instrumen pengumpulan data lapangan berupa lembar observasi dan pedoman wawancara semi-terstruktur yang disusun sendiri oleh peneliti dengan mengadaptasi dimensi hambatan partisipasi dari Juriani dan Anugrahini (2026) serta dimensi biaya non-moneter dari ulasan Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025). Pedoman tersebut mencakup empat rumpun pertanyaan, yaitu pola perilaku pemilahan, hambatan yang dirasakan, persepsi terhadap kewajaran nilai insentif, dan harapan terhadap kemudahan layanan.

### 3.5.3 Pengujian Eksperimental dan Kalibrasi Instrumen

Data unjuk kerja perangkat keras diperoleh melalui pengujian eksperimental skala laboratorium untuk menguji keandalan sistem sebelum diterapkan di ruang publik. Variabel data yang dikumpulkan meliputi:

1. **Data kalibrasi metrologi.** Pengujian pembebanan bertahap (*step-loading test*) pada sel beban menggunakan anak timbangan standar kelas F1. Nilai keluaran tegangan analog dicatat untuk menetapkan faktor kalibrasi linear pada algoritma ESP32. Pengujian dilakukan dua arah, yaitu pembebanan naik dan pembebanan turun, agar histeresis dan rayapan dapat terukur, bukan sekadar diasumsikan tidak ada.
2. **Data resolusi spasial.** Pembacaan sensor ultrasonik pada berbagai variasi topografi tumpukan sampah tiruan di dalam bak untuk mengidentifikasi tingkat ketelitian *time of flight* dan menentukan batas persentase volume aman sebelum peringatan dikirimkan. Pengujian diulang pada tiga tingkat suhu untuk mengukur pengaruh suhu terhadap cepat rambat bunyi.
3. **Data latensi jaringan dan dekode optik.** Pengukuran keluaran dan waktu tunda transmisi sejak pemindai membaca matriks kode QR hingga basis data pada peladen mengeksekusi penambahan poin.

Rangkuman spesifikasi instrumen beserta batas ketidakpastian yang diakui disajikan pada Tabel 3.2. Penyajian batas ketidakpastian ini merupakan tambahan pada revisi kali ini, karena naskah terdahulu menyebutkan ketelitian tanpa menyatakan batas keberlakuannya.

**Tabel 3.2** Spesifikasi instrumen dan batas ketidakpastian yang diakui

| Instrumen | Fungsi | Rentang kerja | Batas ketidakpastian yang diakui |
|---|---|---|---|
| ESP32 (Xtensa dwi-inti) | Unit pemrosesan dan transmisi | 3,0–3,6 V; Wi-Fi 802.11 b/g/n | Bukan sumber galat pengukuran; menentukan waktu tunda |
| Sel beban *strain gauge* + HX711 | Validasi massa setoran | 0–5 kg (tipikal) | ± 2 g atau ± 1% pembacaan, mana yang lebih besar, setelah kalibrasi dan penapisan |
| HC-SR04 / JSN-SR04T | Pengukuran jarak permukaan | 2–400 cm; daerah buta < 2 cm | ± 1 cm pada suhu terkendali; sampai ± 3,5% bila cepat rambat tidak dikoreksi suhu |
| Sensor suhu DHT22 / DS18B20 | Koreksi cepat rambat bunyi | −40 sampai 80 °C | ± 0,5 °C, setara koreksi cepat rambat ± 0,3 m/s |
| Pemindai optik GM66 | Autentikasi pengguna | Kode QR cetak dan layar | Tingkat gagal baca meningkat pada cahaya matahari langsung |

*Sumber: dokumen teknis produsen komponen, diolah penulis.*

## 3.6 Uji Keabsahan Data

Keabsahan data dijaga melalui empat cara. *Pertama*, triangulasi sumber, yaitu setiap klaim faktual mengenai kondisi persampahan Kota Surakarta diverifikasi pada sekurang-kurangnya dua sumber resmi yang berbeda; contohnya, angka kapasitas terolah PLTSa diperiksa silang antara pernyataan Kepala DLH, catatan DPRD Kota Surakarta, dan pemberitaan kantor berita nasional. *Kedua*,

triangulasi metode, yaitu temuan wawancara diperiksa silang dengan hasil observasi dan dengan data terukur dari instrumen. *Ketiga*, jejak audit (*audit trail*), yaitu seluruh rujukan dicatat lengkap dengan penanda objek digital atau tautan resmi sehingga dapat ditelusuri kembali oleh pembaca. *Keempat*, pemeriksaan anggota (*member checking*), yaitu hasil sementara dikonfirmasi kembali kepada pengelola bank sampah untuk memastikan tidak terjadi salah tafsir.

Pada sisi instrumen, keabsahan pengukuran dijaga melalui kalibrasi terhadap anak timbangan standar bersertifikat, pengulangan pengukuran, dan pelaporan simpangan baku. Ketertelusuran pengukuran mengacu pada kerangka Undang-Undang Nomor 2 Tahun 1981 tentang Metrologi Legal, dengan catatan bahwa purwarupa pada tahap ini belum ditera dan karenanya belum boleh dipakai untuk transaksi yang mengikat secara hukum.

## 3.7 Teknik Analisis Data

Proses pengolahan data dibagi menjadi dua ranah, yaitu pemrosesan sinyal fisis pada tingkat perangkat keras dan pemrosesan data transaksional pada tingkat perangkat lunak. Selain itu, data kualitatif dianalisis dengan model interaktif Miles dan Huberman yang mencakup kondensasi data, penyajian data, dan penarikan simpulan yang diverifikasi secara berulang. Pengodean dilakukan dua tahap, yaitu pengodean terbuka atas catatan lapangan dan pengodean terpola yang mengelompokkan kode ke dalam tema hambatan, pemicu, dan prasyarat kelembagaan.

### 3.7.1 Pengolahan Data Instrumentasi

**a. Pengolahan data metrologi massa.** Data mentah dari sel beban berupa fluktuasi tegangan diferensial analog dalam orde milivolt, yang merepresentasikan perubahan resistansi pada jembatan Wheatstone akibat deformasi mekanis. Modul HX711 memperkuat sinyal tersebut dan mengonversinya menjadi nilai digital. Untuk memperoleh massa yang tepat, nilai keluaran digital diolah dengan persamaan kalibrasi linear:

$$M = (D_{mentah} - D_{tara}) / K_{skala}$$

dengan M adalah massa objek (gram), D_mentah adalah pembacaan digital mentah, D_tara adalah nilai digital saat alat kosong, dan K_skala adalah tetapan kalibrasi yang diperoleh dari regresi terhadap anak timbangan standar.

Mengingat wadah rentan terhadap gaya kejut saat pengguna melempar botol, mikrokontroler diprogram untuk tidak mengambil nilai tunggal seketika. Sistem mengambil sejumlah N cuplikan data dalam rentang waktu tertentu, lalu menerapkan penapis digital lolos-rendah untuk meredam lonjakan transien, sehingga hanya massa mantap yang dikirimkan untuk validasi poin.

Pada revisi ini ditambahkan tiga ketentuan pengolahan yang sebelumnya tidak dinyatakan. *Pertama*, pengambilan tara ulang otomatis dilakukan setiap awal

siklus dan setiap perubahan suhu melampaui ambang tertentu, untuk mengompensasi pergeseran titik nol. *Kedua*, nilai massa dibulatkan ke kelipatan 10 gram sebelum dikonversi menjadi poin, agar galat pengukuran tidak berpindah menjadi selisih nilai uang. *Ketiga*, ditetapkan massa minimum setoran yang diakui, sehingga pembacaan di bawah batas ketidakpastian instrumen tidak menghasilkan poin.

**b. Pengolahan data volumetrik.** Sensor ultrasonik menghasilkan data mentah berupa durasi waktu pulsa dalam mikrodetik. Mikrokontroler mengonversinya menjadi jarak ruang kosong d di dalam bak menggunakan persamaan $d = (v \cdot \Delta t) / 2$. Setelah jarak ruang kosong diperoleh, persentase kapasitas C dihitung dengan:

$$C = (1 - d / D_{maks}) \times 100\%$$

dengan $D_{maks}$ adalah kedalaman total bak sampah.

Koreksi penting pada revisi ini adalah bahwa v tidak lagi diperlakukan sebagai tetapan 340 m/s, melainkan dihitung adaptif dari pembacaan suhu melalui hubungan $v \approx 331{,}3 + 0{,}606 \cdot T$. Tanpa koreksi ini, pembacaan pada wadah logam yang terpapar matahari langsung di Surakarta dapat menyimpang hingga sekitar 3,5%, yang pada bak berkedalaman 80 cm setara dengan simpangan sekitar 2,8 cm dan berpotensi memicu peringatan palsu.

Tantangan berikutnya adalah anomali pembacaan akibat hamburan gelombang dari topografi tumpukan yang tidak simetris. Untuk mengurangi kesalahan pembacaan, data jarak diolah dengan penapis rerata bergerak sederhana (*simple moving average*) yang merata-ratakan sejumlah pembacaan terakhir. Melalui penapis ini, mikrokontroler hanya mengirimkan sinyal peringatan apabila nilai rerata persentase kapasitas telah konsisten berada di atas ambang batas selama beberapa siklus pembacaan berturut-turut.

Ambang peringatan ditetapkan bertingkat, tidak tunggal. Ambang 80% memicu penjadwalan pengangkutan biasa, sedangkan ambang 90% memicu peringatan prioritas. Penetapan bertingkat ini dimaksudkan agar armada tidak selalu bergerak dalam keadaan darurat, sehingga penghematan rute benar-benar dapat direalisasikan.

### 3.7.2 Pengolahan Data Sistem dan Skema Poin

Data digital yang telah divalidasi dan disaring pada tingkat perangkat keras ditransmisikan dalam bentuk muatan berformat JSON menuju peladen komputasi awan. Pengolahan pada tingkat perangkat lunak berfokus pada manajemen basis data, eksekusi algoritma poin, dan perutean logistik.

**a. Autentikasi dan pengolahan data transaksi.** Pengolahan diawali dengan pembacaan untaian matriks hasil pemindaian kode QR pengguna. Ketika perangkat mengirimkan muatan data berisi identitas pengguna tersandi dan nilai

metrologi massa, antarmuka pemrograman aplikasi pada peladen mengeksekusi protokol verifikasi. Setelah identitas tervalidasi, sistem menghitung insentif melalui:

$$P_total = P_saldo + (N_item \times R_dasar) + (M_valid \times V_konversi)$$

dengan P_total adalah saldo poin terbarui, P_saldo adalah saldo sebelumnya, N_item adalah jumlah item yang masuk, R_dasar adalah insentif dasar per transaksi, M_valid adalah massa tervalidasi, dan V_konversi adalah nilai konversi mengikuti harga komoditas daur ulang pada pasar sekunder.

Proses penambahan poin dieksekusi dengan menjaga sifat atomisitas, konsistensi, keterpisahan, dan ketahanan pada basis data untuk mencegah penggandaan transaksi. Hasil akhir langsung dikirimkan ke antarmuka aplikasi pengguna sehingga memberikan umpan balik seketika.

Tiga penyempurnaan ditambahkan pada revisi ini. *Pertama*, V_konversi tidak boleh ditetapkan sebagai angka tetap dalam kode program, melainkan dibaca dari tabel harga yang ditinjau berkala oleh Bank Sampah Induk, sebab harga material daur ulang bersifat fluktuatif mengikuti harga minyak dunia dan permintaan industri. *Kedua*, ditetapkan batas atas transaksi harian per pengguna sebagai pengaman terhadap penyalahgunaan, misalnya penyetoran material yang berasal dari luar rumah tangga secara massal. *Ketiga*, seluruh transaksi dicatat pada jejak audit yang tidak dapat diubah dan dapat diperiksa oleh inspektorat daerah, sesuai asas akuntabilitas pengelolaan keuangan daerah.

**b. Pengolahan data kapasitas dan distribusi peringatan.** Untuk mengoptimalkan manajemen rantai pasok sampah organik, data persentase kapasitas yang diterima dari sensor ultrasonik diolah menggunakan algoritma ambang batas. Peladen memantau fluktuasi nilai kapasitas dari setiap identitas perangkat yang tersebar di wilayah Surakarta. Logika peringatan didefinisikan sebagai fungsi bertingkat:

$$f(\text{Peringatan}) = 0 \text{ bila } C < 80\%;\ 1 \text{ (penjadwalan biasa) bila } 80\% \le C < 90\%;\ 2 \text{ (prioritas) bila } C \ge 90\%$$

Apabila fungsi menghasilkan nilai selain nol, peladen memicu pengiriman pemberitahuan. Pengolahan lanjutan melibatkan pencocokan koordinat perangkat yang penuh dengan titik lokasi armada pengangkut terdekat. Data peringatan didistribusikan ke dasbor petugas untuk memfasilitasi penjemputan yang efisien dan mencegah pembusukan sampah organik di ruang publik.

Bagan fungsi peringatan pada naskah terdahulu disajikan sebagai berkas gambar persamaan bertingkat dua nilai yang beresolusi rendah dan tertaut ke layanan luar. Pada revisi ini persamaan tersebut ditulis ulang sebagai teks dengan tiga tingkat ambang, sehingga dapat dibaca dengan jelas, dapat disunting, dan tidak bergantung pada tautan eksternal.

### 3.7.3 Teknik Analisis Kelayakan dan Skenario

Analisis kelayakan dilakukan dalam tiga lapisan. *Pertama*, kelayakan teknis dinilai melalui pemenuhan spesifikasi fungsional dan pemenuhan batas ketidakpastian sebagaimana Tabel 3.2. *Kedua*, kelayakan ekonomi dinilai melalui perhitungan biaya modal per unit, biaya operasional tahunan, dan penerimaan dari selisih harga material, dengan menyajikan hasil dalam bentuk rentang, bukan angka tunggal, karena harga material bersifat fluktuatif. *Ketiga*, kelayakan kelembagaan dinilai melalui pemeriksaan kesesuaian setiap unsur model dengan kewenangan perangkat daerah menurut peraturan yang berlaku.

Proyeksi reduksi beban TPA disusun menggunakan analisis skenario dengan tiga tingkat asumsi penyebaran unit, yaitu konservatif, moderat, dan optimistis. Asumsi utama, keterbatasan, serta uji kepekaan terhadap perubahan asumsi diuraikan secara terbuka pada Subbab 4.4 agar pembaca dapat menilai sendiri kekokohan proyeksi. Perlu ditegaskan bahwa proyeksi ini bersifat *ex-ante* dan tidak boleh dipakai sebagai dasar penganggaran sebelum diuji melalui percontohan terkendali.

## 3.8 Etika Penelitian

Kajian ini menaati sejumlah kaidah etika. Pengambilan data lapangan didahului dengan penjelasan tujuan penelitian dan permintaan persetujuan lisan maupun tertulis dari informan, disertai jaminan bahwa keikutsertaan bersifat sukarela dan dapat dibatalkan sewaktu-waktu. Identitas informan disamarkan dalam pelaporan, dan data mentah disimpan secara terbatas hanya untuk keperluan penelitian.

Karena rancangan sistem memproses data pengguna, kajian ini menerapkan asas-asas Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022 tentang Pelindungan Data Pribadi sejak tahap perancangan. Penerapan tersebut meliputi pembatasan tujuan pemrosesan, minimalisasi data yang dikumpulkan, penggunaan token acak sebagai pengganti identitas langsung pada kode QR, penetapan masa simpan data, serta penyediaan mekanisme penarikan persetujuan dan penghapusan data atas permintaan pengguna. Perizinan penelitian diurus melalui BRIDA Kota Surakarta sesuai ketentuan penyelenggaraan penelitian di daerah, dan seluruh koordinasi kelembagaan dilakukan melalui saluran resmi perangkat daerah.

Terakhir, kajian ini menaati kaidah kejujuran akademik. Seluruh kutipan diberi rujukan yang dapat ditelusuri, tidak ada data yang direkayasa, dan setiap keterbatasan dinyatakan secara terbuka. Rujukan yang pada penelusuran ulang tidak dapat diverifikasi keberadaannya telah disingkirkan dan digantikan dengan sumber sahih, sebagaimana dilaporkan pada Lampiran B.

# BAB IV
# PEMBAHASAN

Bab ini disusun dalam empat subbab yang berpadanan satu-satu dengan empat tujuan penelitian pada Subbab 1.5. Subbab 4.1 menjawab tujuan pertama, Subbab 4.2 menjawab tujuan kedua, Subbab 4.3 menjawab tujuan ketiga, dan Subbab 4.4 menjawab tujuan keempat.

## 4.1 Rancang Bangun *Smart Trash Bin* dan Peningkatan Partisipasi Pemilahan di Sumber

Subbab ini menjawab tujuan penelitian pertama. Argumen pokoknya adalah bahwa peningkatan partisipasi pemilahan tidak dicapai melalui imbauan, melainkan melalui rancangan fisik yang menurunkan biaya non-moneter warga — waktu, jarak, dan ketidakpastian — sebagaimana ditegaskan Proposisi 1.

### 4.1.1 Desain Mekanis dan Peletakan Instrumentasi




**Gambar 4.1** Desain mekanis *Smart Trash Bin* dan peletakan instrumentasi

Secara arsitektural, bodi mekanis *Smart Trash Bin* dibagi menjadi dua kompartemen yang terisolasi, yaitu kompartemen organik/campuran dan kompartemen khusus anorganik bernilai tinggi berupa polimer PET. Pemisahan struktural ini merupakan justifikasi teknis untuk mencegah kontaminasi silang material, mengingat Kota Surakarta memproduksi timbulan sampah heterogen pada kisaran 382–419 ton per hari (BRIDA Kota Surakarta, 2024; SIPSN, 2024). Tanpa pemisahan mekanis di hulu, material ini akan membebani TPA Putri Cempo dan menurunkan mutu umpan bagi fasilitas pengolahan hilir.

Perlu dilakukan koreksi terhadap pernyataan pada naskah terdahulu yang menghubungkan pemisahan ini dengan penghematan biaya layanan pengolahan

sampah (*tipping fee*) sebesar Rp500.000 per ton. Penelusuran menunjukkan bahwa PLTSa Putri Cempo justru dioperasikan dengan skema tanpa biaya layanan; investor menyetujui skema beli putus tanpa *tipping fee*, sehingga seluruh pendapatan operator bertumpu pada penjualan listrik kepada PT PLN (Antara, 2019; WALHI, 2024). Angka Rp500.000 per ton merupakan batas atas menurut Peraturan Presiden Nomor 35 Tahun 2018, bukan besaran yang benar-benar dibayarkan oleh Pemerintah Kota Surakarta. Dengan demikian, manfaat fiskal dari kajian ini tidak terletak pada penghindaran *tipping fee*, melainkan pada perpanjangan umur pakai lahan urug, efisiensi rute pengangkutan, dan perbaikan nilai kalor umpan. Manfaat yang telah dikoreksi ini diuraikan pada Subbab 4.4.

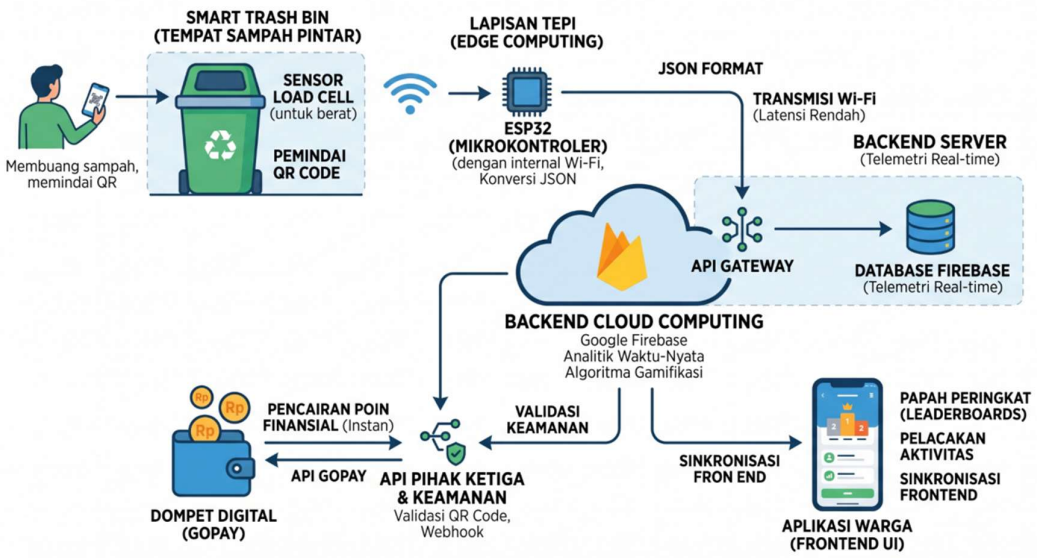
Pada kompartemen anorganik, desain difokuskan untuk memproteksi premi kebersihan (*cleanliness premium*) dari botol PET. Valuasi pasar sekunder menunjukkan bahwa limbah PET yang kotor dan tidak terpilah hanya dihargai sangat rendah, sedangkan botol PET transparan yang tersortir murni dan homogen bernilai jauh lebih tinggi. Untuk mengamankan komoditas ini, pintu masuk kompartemen anorganik dikunci menggunakan aktuator motor servo yang hanya merespons setelah pemindai optik — diletakkan pada fasia depan dengan sudut elevasi 45 derajat agar ergonomis — berhasil memvalidasi identitas digital warga.

Di bagian pelat dasar kompartemen anorganik diterapkan sistem metrologi massa menggunakan sel beban tipe *strain gauge* yang terhubung dengan modul HX711. Sensor ditopang dudukan suspensi elastomer untuk meredam getaran mekanis dari kerangka luar. Peletakan pada titik pusat tumpuan memastikan setiap botol yang masuk ditimbang dengan galat momen gaya yang minimal.

Untuk kompartemen organik, parameter fisis yang dikendalikan bukanlah massa, melainkan jarak spasial guna memitigasi kelebihan kapasitas yang berujung pada pelepasan gas metana akibat dekomposisi anaerobik. Modul sensor ultrasonik tipe tahan air diposisikan di titik tengah langit-langit penutup kompartemen dan memancarkan gelombang tegak lurus ke bawah. Peletakan terpusat di atas ini dirancang untuk memperkecil zona buta akustik serta mengurangi efek pantulan ganda yang kerap terjadi akibat ketidakteraturan topografi tumpukan sampah basah.

Pada revisi ini ditambahkan tiga ketentuan rancangan mekanis yang sebelumnya belum dinyatakan dan yang menentukan keandalan alat di iklim tropis. *Pertama*, kompartemen wajib memiliki lubang tirus dengan pembatas ukuran agar hanya botol berukuran tertentu yang dapat masuk, sehingga pemilahan tidak hanya bergantung pada niat pengguna. *Kedua*, seluruh rongga elektronik harus memenuhi tingkat proteksi terhadap debu dan curah hujan sekurang-kurangnya setara IP65, mengingat curah hujan Kota Surakarta yang tinggi pada musim penghujan. *Ketiga*, sensor suhu dipasang berdekatan dengan transduser ultrasonik untuk keperluan koreksi cepat rambat bunyi sebagaimana diuraikan pada Subbab 3.7.1; tanpa sensor ini, pembacaan pada siang hari akan menyimpang secara sistematis.

### 4.1.2 Topologi Jaringan *Internet of Things*




**Gambar 4.2** Topologi jaringan *Internet of Things* pada sistem yang diusulkan

**a. Transmisi data lapisan tepi.** Pada lapisan paling bawah, mikrokontroler ESP32 difungsikan sebagai pusat pemrosesan tepi. Data fisis dari sel beban yang telah dikonversi menjadi format digital dipaketkan ke dalam format JSON dan dipancarkan melalui modul Wi-Fi internal. Transmisi dirancang berlatensi rendah karena keberhasilan skema poin yang dapat ditukar sangat bergantung pada pemrosesan waktu-nyata.

**b. Manajemen peladen dan basis data waktu-nyata.** Paket data yang memuat identitas pengguna dan gramasi material diterima oleh gerbang antarmuka pemrograman aplikasi di peladen awan. Arsitektur peladen didukung basis data telemetri waktu-nyata yang memfasilitasi pemantauan aktivitas pengguna secara berkelanjutan, dan mengeksekusi algoritma poin secara otonom.

**c. Autentikasi keamanan dan sinkronisasi antarmuka.** Untuk mencegah anomali transaksi, protokol keamanan pada peladen memvalidasi matriks kode QR yang dikirimkan pemindai. Setelah tervalidasi, peladen memicu pemanggilan balik menuju antarmuka penyelenggara jasa pembayaran untuk mencairkan poin kepada pengguna, dan hasilnya ditampilkan pada antarmuka aplikasi warga.

Terhadap uraian tersebut perlu ditambahkan empat catatan penting yang menyangkut kepatuhan hukum dan keandalan operasional. *Pertama*, penyebutan satu merek dompet digital tertentu pada naskah terdahulu perlu digantikan dengan rumusan yang netral, yaitu "penyelenggara jasa pembayaran yang telah memperoleh izin Bank Indonesia". Perubahan ini bukan sekadar soal gaya penulisan: penunjukan mitra tunggal oleh instansi pemerintah berpotensi bertentangan dengan asas persaingan usaha yang sehat dan ketentuan pengadaan barang dan jasa pemerintah. *Kedua*, pengiriman token identitas melintasi jaringan wajib dienkripsi menggunakan protokol berlapis keamanan

transportasi, dan token tidak boleh memuat data pribadi sebagaimana diamanatkan Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022. *Ketiga*, ketergantungan penuh pada sambungan Wi-Fi tidak realistis untuk pemasangan di ruang publik, sehingga rancangan perlu menyediakan pilihan modul seluler serta penyangga data lokal agar transaksi tetap tercatat ketika jaringan terputus dan disinkronkan kemudian. *Keempat*, karena harga material bersifat fluktuatif, tabel konversi nilai wajib disimpan di sisi peladen dan bukan ditanam dalam program mikrokontroler.

### 4.1.3 Analisis Mitigasi Galat Instrumen

Keandalan instrumen IoT yang ditempatkan di ruang publik sangat bergantung pada kemampuannya mengisolasi anomali pembacaan dan gangguan lingkungan. Arsitektur sistem karena itu dilengkapi lapisan mitigasi galat sebagai berikut.

**a. Mitigasi galat mekanis dan histeresis pada sensor massa.** Tantangan fisis terbesar pada penimbangan otonom adalah gaya kejut mekanis yang terjadi seketika saat pengguna menjatuhkan botol ke dalam kompartemen. Hantaman ini menciptakan fluktuasi sinyal analog transien yang dapat menggeser titik nol dan menghasilkan galat sistemik. Untuk memitigasinya, selain suspensi peredam elastomer, mikrokontroler mengeksekusi penapis lolos-rendah dan rerata bergerak sederhana. Sistem tidak mengunci nilai massa saat fluktuasi memuncak, melainkan menunggu hingga kurva tegangan mencapai kondisi tunak.

Pada revisi ini ditambahkan anggaran ketidakpastian pengukuran yang sebelumnya tidak dinyatakan. Resolusi 24 bit pada modul HX711 tidak identik dengan ketelitian 24 bit, karena sebagian bit terbawah tenggelam dalam derau; jumlah bit bebas derau pada penguatan 128 kali umumnya berada pada kisaran 19–20 bit. Sumber galat yang perlu diperhitungkan meliputi ketidaklinearan sel beban, histeresis dan rayapan pada pembebanan berkelanjutan, pergeseran titik nol akibat perubahan suhu harian, serta getaran lingkungan. Dengan mempertimbangkan seluruh sumber tersebut, ketelitian yang dapat dipertanggungjawabkan pada purwarupa ini adalah sekitar ± 2 gram atau ± 1% pembacaan, mana yang lebih besar, dan bukan ketelitian mutlak sebagaimana tersirat pada naskah terdahulu. Konsekuensi rancangannya adalah pembulatan massa ke kelipatan 10 gram serta penetapan massa minimum yang diakui, agar galat pengukuran tidak berubah menjadi selisih nilai uang yang merugikan warga maupun pengelola.

Perlu ditambahkan pula bahwa alat ukur yang keluarannya menentukan besaran imbalan berpotensi termasuk dalam lingkup Undang-Undang Nomor 2 Tahun 1981 tentang Metrologi Legal. Oleh karena itu, sebelum dioperasikan untuk transaksi yang mengikat, purwarupa wajib melalui tera dan tera ulang berkala oleh unit metrologi legal daerah. Ketentuan ini bukan formalitas administratif, melainkan penjamin kepercayaan warga terhadap keadilan angka yang ditampilkan mesin.

**b. Mitigasi galat akustik pada sensor ultrasonik.** Pada kompartemen organik, pembacaan tingkat kepenuhan sering dikacaukan oleh asimetri topografi sampah yang menumpuk tidak merata. Ketidakteraturan permukaan memicu hamburan gelombang suara sehingga pantulan terdeteksi lebih cepat dari kedalaman sebenarnya dan menciptakan galat positif palsu. Algoritma memitigasi anomali ini dengan menerapkan ambang simpangan logis: apabila sensor tiba-tiba mendeteksi lompatan kapasitas yang tidak wajar dalam hitungan detik, sistem mengklasifikasikannya sebagai derau spasial dan menolak mengirimkan peringatan.

Sumber galat yang belum disebutkan pada naskah terdahulu adalah ketergantungan cepat rambat bunyi pada suhu udara. Pada wadah logam yang terpapar sinar matahari langsung, suhu rongga dapat mencapai 35–40 °C, sehingga penggunaan tetapan 340 m/s menghasilkan galat sistematis hingga sekitar 3,5%. Pada bak berkedalaman 80 cm, galat tersebut setara sekitar 2,8 cm dan cukup untuk memicu peringatan palsu pada ambang 90%. Karena itu koreksi suhu ditetapkan sebagai keharusan rancangan, bukan pilihan. Sumber galat lain yang perlu diantisipasi adalah pengembunan pada permukaan transduser akibat kelembapan tinggi sampah organik, yang diatasi melalui pemilihan tipe tahan air dan pemberian sungkup pelindung.

**c. Mitigasi galat transaksional dan pencegahan kecurangan.** Pada lapisan perangkat lunak, sistem rentan terhadap eksploitasi, misalnya pengguna yang memindai kode QR namun memasukkan benda tanpa nilai demi mencurangi pencairan. Oleh karena itu, gerbang logika mikrokontroler dirancang saling mengunci antara pemindai optik dengan validasi batas bawah dari sel beban. Poin hanya ditransmisikan apabila massa benda sesuai dengan rentang kerapatan wajar sebuah botol PET.

Tiga lapisan pengaman tambahan ditetapkan pada revisi ini: pembatasan jumlah transaksi harian per pengguna, penandaan otomatis atas pola setoran yang menyimpang untuk ditinjau pengelola, serta pencocokan lokasi perangkat dengan lokasi pemindaian agar satu identitas tidak dapat dipakai serentak di dua tempat. Perlu dinyatakan secara jujur bahwa tidak ada satu pun lapisan ini yang mampu menghilangkan kecurangan sepenuhnya; yang dapat dicapai adalah menaikkan biaya kecurangan sampai melampaui manfaatnya.

### 4.1.4 Penurunan Hambatan Partisipasi sebagai Jawaban Tujuan Pertama

Ketiga lapisan rancangan di atas bermuara pada satu hasil yang dapat diperiksa terhadap Proposisi 1, yaitu turunnya hambatan non-moneter partisipasi. Tabel 4.1 membandingkan proses setoran pada bank sampah konvensional dengan proses pada sistem yang diusulkan.

**Tabel 4.1** Perbandingan hambatan partisipasi sebelum dan sesudah intervensi

| Aspek | Bank sampah konvensional | Sistem yang diusulkan |
|---|---|---|
| Ketersediaan layanan | Terikat jadwal, umumnya sepekan sekali | Tersedia setiap saat pada titik terpasang |
| Waktu tunggu penimbangan | Antre; bergantung ketersediaan kader | Seketika; tanpa perantara manusia |
| Pencatatan | Buku besar manual, rawan galat dan sulit diaudit | Basis data terpusat dengan jejak audit |
| Kesegeraan imbalan | Tertunda hingga penjualan material terjadi | Tercatat seketika; pencairan melalui kanal berizin |
| Kepastian angka | Bergantung ketelitian timbangan dan kesepakatan | Terukur instrumen dengan batas ketidakpastian yang dinyatakan |
| Mutu material terkumpul | Bercampur; memerlukan penyortiran ulang | Terpilah sejak masuk; premi kebersihan terjaga |

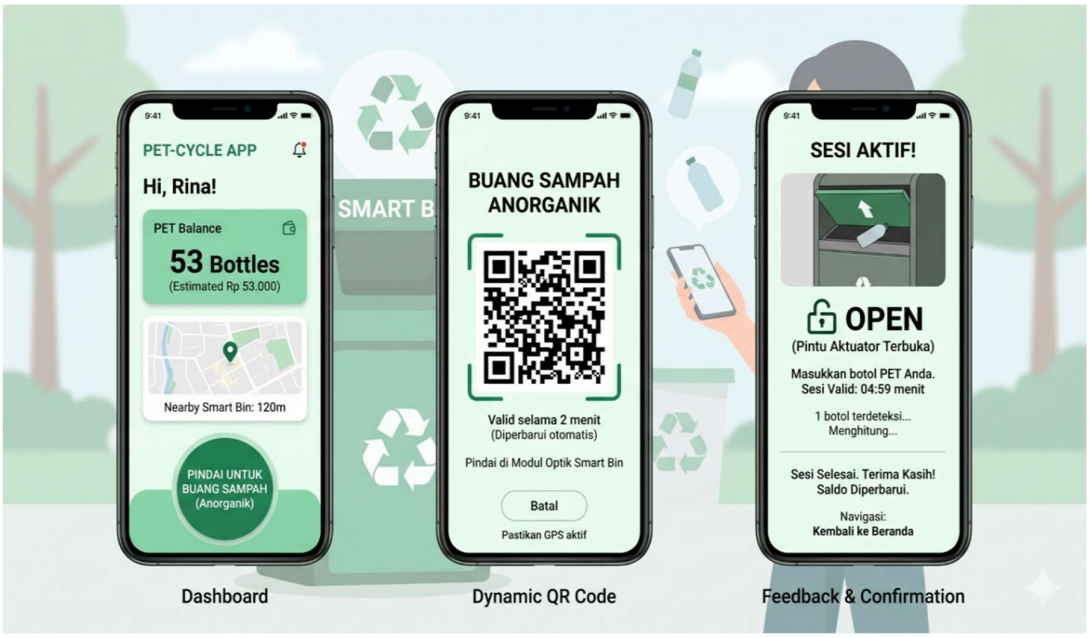
Perbandingan tersebut memperlihatkan bahwa unsur yang paling berubah adalah biaya waktu dan ketidakpastian, bukan besaran imbalan. Temuan ini konsisten dengan simpulan Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025) bahwa penentu utama perilaku pengembalian adalah kemudahan akses, serta dengan temuan Juriani dan Anugrahini (2026) mengenai hambatan jadwal pada bank sampah komunitas. Dengan demikian Proposisi 1 memperoleh dukungan konseptual yang memadai pada tahap perancangan, dengan catatan bahwa pembuktian empirisnya memerlukan percontohan terkendali di lapangan.

Perlu disampaikan pula satu kehati-hatian. Rancangan ini mensyaratkan kepemilikan telepon pintar dan kemampuan digital tertentu, sehingga berpotensi menyisihkan warga lanjut usia dan kelompok berpenghasilan rendah — persoalan yang juga tercatat pada penerapan skema serupa di Hungaria dan Rumania sebagaimana dilaporkan dalam ulasan Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025). Karena itu sistem yang diusulkan wajib mempertahankan jalur setoran konvensional melalui kader bank sampah sebagai pilihan yang setara, bukan menggantikannya. Aspek keadilan akses ini diangkat kembali sebagai butir rekomendasi kebijakan pada Subbab 5.2.2.

## 4.2 Efektivitas Skema Poin Digital dan Notifikasi Otomatis terhadap Beban TPA

Subbab ini menjawab tujuan penelitian kedua, yang mencakup dua mekanisme berbeda: skema poin pada aliran anorganik dan sistem peringatan pada aliran organik.

### 4.2.1 Alur Autentikasi Pengguna Nir-Sentuh




**Gambar 4.3** Rancangan antarmuka aplikasi warga

Keberhasilan implementasi ekonomi sirkular tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan sensor, melainkan juga oleh rancangan antarmuka yang menjembatani interaksi manusia dengan mesin. Kajian perilaku mengidentifikasi adanya kesenjangan antara sikap dan tindakan, yaitu keadaan ketika kepedulian lingkungan yang tinggi gagal diterjemahkan menjadi tindakan nyata akibat proses yang menyulitkan pengguna (Murtyas dkk., 2025).

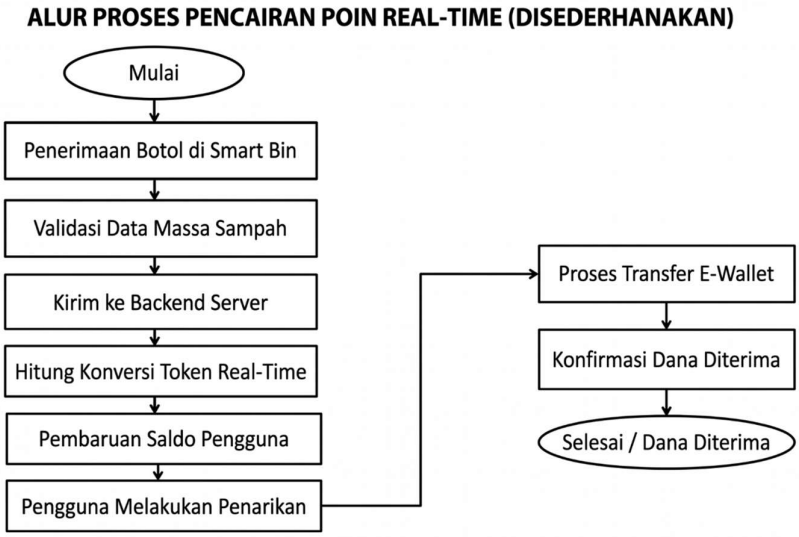
Untuk mengurangi hambatan tersebut, alur interaksi direkayasa menggunakan protokol autentikasi nir-sentuh. Melalui aplikasi ponsel yang dikembangkan dengan kerangka kerja lintas platform, pengguna disajikan antarmuka yang memuat identitas digital dalam wujud matriks kode QR. Alur dimulai ketika pengguna mendekatkan layar ponsel ke modul pemindai optik pada fasia depan wadah.

Pemindaian identitas ini mengatasi kelemahan sistem pencatatan bank sampah konvensional yang masih mengandalkan buku besar berbasis kertas, yang membuka ruang bagi cacat administratif dan ketidaktepatan kalkulasi (Budiyarto dkk., 2025). Pada lapisan keamanan, kode QR yang dihasilkan tidak bersifat tetap melainkan dinamis, menggunakan mekanisme token berbatas waktu yang diterbitkan peladen. Protokol ini memastikan pintu aktuator kompartemen anorganik hanya terbuka bagi pengguna yang terautentikasi secara sah pada lokasi yang tepat.

Dua penyempurnaan ditambahkan pada revisi ini. *Pertama*, token dinamis harus berumur pendek dan sekali pakai, agar tangkapan layar kode QR tidak dapat dipakai ulang oleh pihak lain. *Kedua*, sesuai asas minimalisasi data pada Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022, token tidak boleh memuat nama, nomor telepon,

atau nomor induk kependudukan; token hanya berupa penunjuk acak yang dipetakan pada basis data terlindungi, dan pemetaan tersebut diputar secara berkala agar pola pergerakan pengguna tidak dapat direkonstruksi dari log perangkat.

### 4.2.2 Algoritma Pencairan Poin Waktu-Nyata




**Gambar 4.4** Alur proses pencairan poin waktu-nyata

Permasalahan mendasar pada perangkat lunak bank sampah digital generasi awal adalah penahanan dana pasif, yaitu poin yang diklaim warga terkunci dalam ekosistem aplikasi tanpa dapat ditarik secara mandiri, sehingga mengurangi motivasi warga (Budiyarto dkk., 2025). Untuk mengatasi hambatan tersebut, sistem dilengkapi algoritma pencairan waktu-nyata yang beroperasi pada peladen. Setelah mikrokontroler mengirimkan data massa botol yang telah divalidasi, peladen mengonversi massa menjadi nilai poin dan memperbarui saldo pengguna seketika, kemudian meneruskan permintaan pencairan ke penyelenggara jasa pembayaran ketika pengguna mengajukannya.

Tiga ketentuan hukum perlu ditambahkan agar mekanisme ini sah dan dapat diaudit. *Pertama*, poin dalam sistem ini harus diperlakukan sebagai catatan hak tagih atas hasil penjualan material, bukan sebagai alat pembayaran; poin baru berubah menjadi uang pada saat pencairan melalui kanal berizin. Pembedaan ini penting karena penerbitan alat pembayaran memerlukan izin tersendiri dari Bank Indonesia. *Kedua*, bank sampah maupun pemerintah kota tidak boleh menghimpun dan mengelola saldo warga secara mandiri tanpa izin, sebab hal tersebut berpotensi dikategorikan sebagai penghimpunan dana masyarakat. *Ketiga*, seluruh mutasi poin dicatat pada jejak audit yang tidak dapat diubah, sehingga dapat diperiksa oleh inspektorat daerah dan diselaraskan dengan asas akuntabilitas pengelolaan keuangan daerah.

Dari sisi keberlanjutan perilaku, kesegeraan pencairan memperoleh pembenaran teoretis dari sifat manusia yang mendiskontokan manfaat tertunda secara tajam. Namun bukti empiris menuntut kehati-hatian: meta-analisis Meyerowitz-Katz dkk. (2020) menunjukkan tingkat putus pakai yang tinggi pada intervensi berbasis aplikasi. Oleh sebab itu klaim bahwa skema poin akan menjaga partisipasi jangka panjang tidak dapat dinyatakan sebagai kepastian, melainkan sebagai proposisi yang harus diuji melalui pemantauan longitudinal. Untuk menyeimbangkannya, rancangan menambahkan lapisan pengakuan sosial berupa capaian agregat tingkat RW, sehingga norma komunitas turut bekerja ketika daya tarik insentif individual melemah. Rancangan ini sekaligus memitigasi risiko pendesakan motivasi intrinsik yang diperingatkan dalam teori penentuan nasib sendiri.

### 4.2.3 Antarmuka Dasbor Petugas dan Sistem Peringatan




**Gambar 4.5** Dasbor operasional petugas dan sistem peringatan dini

Pada aliran organik, nilai tambah sistem terletak pada pengubahan pola pengangkutan dari berbasis jadwal tetap menjadi berbasis kebutuhan. Data persentase kapasitas dari setiap perangkat ditampilkan pada dasbor petugas beserta lokasinya, sehingga armada dapat diarahkan hanya ke titik yang benar-benar memerlukan pengangkutan.

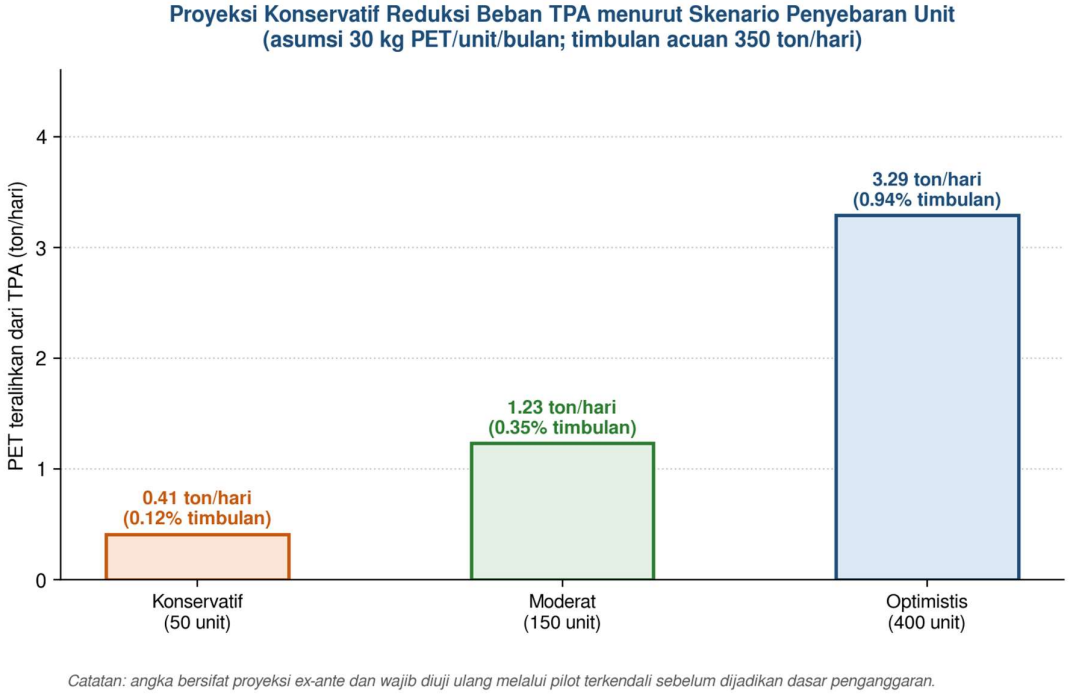
Naskah terdahulu mencantumkan angka penghematan bahan bakar sebesar 15% pada gambar dasbor tanpa menyertakan dasar perhitungan maupun sumber. Angka tersebut tidak dapat dipertanggungjawabkan sebagai temuan dan pada revisi ini diperlakukan sebagai ilustrasi antarmuka semata, bukan sebagai klaim hasil. Yang dapat dinyatakan secara ilmiah adalah mekanismenya: pengangkutan berbasis kebutuhan menghilangkan perjalanan menuju wadah yang belum penuh, dan besarnya penghematan bergantung sepenuhnya pada sebaran tingkat pengisian antartitik. Apabila seluruh wadah terisi merata dan cepat, penghematan mendekati nol; penghematan menjadi berarti justru ketika sebaran

pengisian sangat timpang. Besaran sesungguhnya karena itu wajib diukur melalui percontohan, bukan diasumsikan.

Manfaat kedua yang lebih pasti adalah pencegahan pembusukan. Dengan ambang bertingkat sebagaimana Subbab 3.7.2, fraksi organik dievakuasi sebelum memasuki fase dekomposisi anaerobik yang melepaskan metana. Manfaat ini bersifat lingkungan dan kesehatan publik, dan tetap berlaku bahkan ketika penghematan bahan bakar tidak tercapai.

### 4.2.4 Proyeksi Reduksi Beban TPA Putri Cempo

Untuk menilai efektivitas skema terhadap beban TPA, disusun proyeksi berbasis skenario dengan asumsi yang dinyatakan secara terbuka. Asumsi dasar yang dipakai adalah 30 kilogram PET terkumpul per unit per bulan pada penempatan di titik dengan lalu lintas warga sedang, dan angka timbulan acuan 350 ton per hari yang merupakan titik tengah rentang sampah yang benar-benar masuk ke TPA.




**Gambar 4.6** Proyeksi reduksi beban TPA menurut skenario penyebaran unit

Hasil proyeksi memperlihatkan angka yang harus dibaca secara jujur. Bahkan pada skenario optimistis dengan 400 unit terpasang, PET yang teralihkan baru sekitar 3,3 ton per hari atau kurang dari satu persen timbulan yang masuk ke TPA. Angka ini jauh dari cukup untuk mengatasi kesenjangan penanganan sebesar 250–330 ton per hari sebagaimana Gambar 1.2. Naskah terdahulu menyatakan bahwa intervensi ini memproyeksikan reduksi beban yang sangat signifikan; pernyataan tersebut tidak dapat dipertahankan dan pada revisi ini dikoreksi.

Namun demikian, simpulan bahwa gagasan ini tidak bermanfaat juga keliru, sebab ukuran keberhasilan yang tepat bukanlah tonase. Terdapat empat manfaat yang tetap sahih. *Pertama*, dari perspektif tata ruang lahan urug, polimer termoplastik memiliki nisbah volume terhadap massa yang sangat tinggi, sehingga pengalihan satu ton PET menghemat ruang urug jauh lebih besar daripada pengalihan satu ton material padat lainnya, dan dengan demikian memperpanjang sisa umur pakai lahan (Tuzzahra & Ainun, 2020). *Kedua*, pengeluaran PET dari aliran umpan meningkatkan homogenitas dan nilai kalor material yang masuk ke fasilitas gasifikasi. *Ketiga*, nilai ekonomi yang dipulihkan bersifat nyata bagi rumah tangga penyetor meskipun kecil dalam agregat kota. *Keempat*, dan yang terpenting, fungsi utama alat ini adalah sebagai instrumen pembentuk kebiasaan memilah; tonase yang terkumpul melalui alat hanyalah penanda perilaku, sedangkan dampak sesungguhnya muncul ketika kebiasaan memilah meluas ke seluruh aliran sampah rumah tangga yang tidak melewati alat.

Dengan kerangka tersebut, indikator keberhasilan yang direkomendasikan bukanlah ton per hari, melainkan tingkat kemurnian material yang disetorkan, jumlah rumah tangga yang berpindah dari tidak memilah menjadi memilah, dan keawetan perilaku tersebut setelah enam dan dua belas bulan. Pergeseran indikator ini merupakan salah satu sumbangan koreksi terpenting dari revisi kali ini.

## 4.3 Model Kemitraan dan Tata Kelola Ekonomi Sirkular di Kota Surakarta

Subbab ini menjawab tujuan penelitian ketiga. Keberhasilan penerapan teknologi tepat guna di ruang publik sangat bergantung pada keselarasan rancangan instrumen dengan arsitektur kebijakan daerah. Purwarupa karena itu tidak diposisikan sebagai entitas mandiri yang terputus, melainkan sebagai infrastruktur pendukung yang terintegrasi dengan ekosistem yang telah ada di Kota Surakarta.

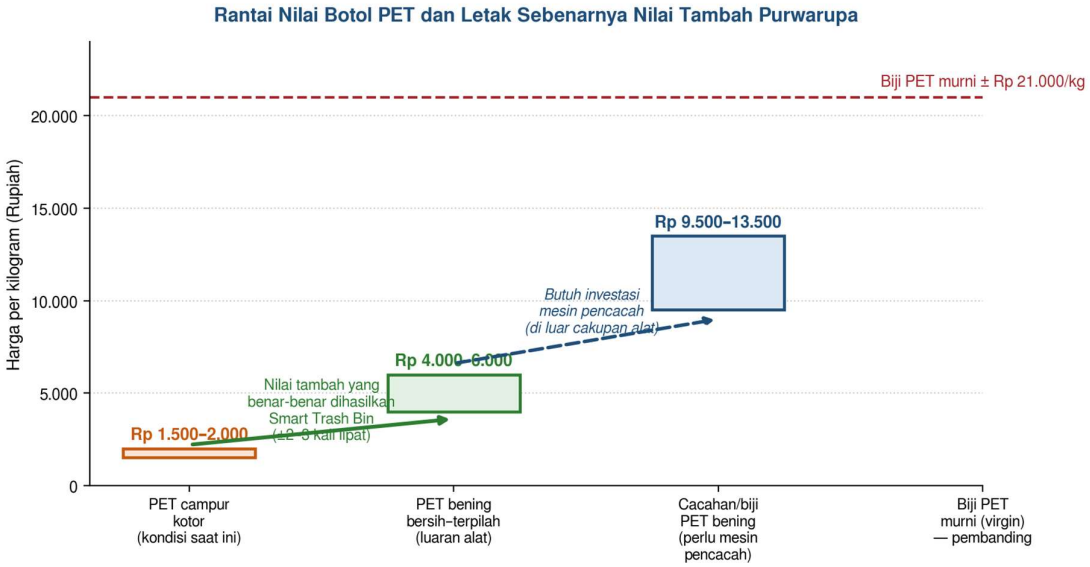
### 4.3.1 Integrasi dengan Bank Sampah Induk Kota Surakarta

Model operasional bank sampah pada tingkat rukun warga di Surakarta saat ini bertumpu pada manajemen pasif yang padat karya dan rentan tidak efisien. Pencatatan manual menggunakan buku besar tidak hanya menghambat pencairan imbalan bagi warga, tetapi juga menghasilkan komoditas dengan tingkat kemurnian yang rendah. Ketiadaan instrumen pemilah presisi pada tingkat basis menyebabkan material daur ulang sering turun kelas dan dikategorikan sebagai PET campur yang kotor.

Untuk mengurai kebuntuan tersebut, kajian ini mengusulkan skema kemitraan antarbadan usaha yang mengintegrasikan ekosistem *Smart Trash Bin* secara langsung dengan Bank Sampah Induk Kota Surakarta. Dalam model ini, infrastruktur IoT mengambil alih peran pencatat manual dengan bertransformasi menjadi simpul pengumpul otonom. Warga tidak perlu menunggu jadwal

operasional bank sampah yang terbatas, melainkan dapat menyetor secara mandiri kapan saja. Data fisis dan transaksional yang telah dikonversi secara digital ditransmisikan langsung ke dasbor inventaris Bank Sampah Induk, sehingga tercipta transparansi rantai pasok yang mengurangi ketimpangan informasi antara penyetor dan pengepul (Budiyarto dkk., 2025).

Bagian ini memerlukan koreksi ekonomi yang mendasar. Naskah terdahulu menyatakan bahwa integrasi ini melonjakkan harga jual dari kisaran ribuan rupiah menuju rentang Rp8.000 hingga Rp15.000 per kilogram. Penelusuran harga pasar menunjukkan bahwa rentang tersebut merupakan harga *cacahan atau biji plastik* PET yang telah melalui proses pencucian dan pencacahan, bukan harga botol utuh. Harga botol PET bening yang bersih dan terpilah pada tingkat pelestari sampah berada pada kisaran Rp4.000–Rp6.000 per kilogram, sedangkan PET berwarna berada pada Rp2.000–Rp4.000 per kilogram; setelah menjadi biji plastik barulah harganya mencapai Rp8.000–Rp14.000 per kilogram, dengan PET bening kelas *crusher* pada Rp9.500–Rp13.500 per kilogram.




**Gambar 4.7** Rantai nilai botol PET dan letak sebenarnya nilai tambah purwarupa

Dengan koreksi tersebut, nilai tambah yang benar-benar dihasilkan *Smart Trash Bin* adalah kenaikan dari kelas PET campur kotor pada kisaran Rp1.500–Rp2.000 per kilogram menjadi kelas PET bening bersih terpilah pada kisaran Rp4.000–Rp6.000 per kilogram, yaitu sekitar dua sampai tiga kali lipat. Kenaikan ini tetap bermakna dan layak diperjuangkan, tetapi jauh lebih kecil daripada klaim delapan sampai sepuluh kali lipat pada naskah terdahulu. Untuk mencapai kelas harga biji plastik, diperlukan investasi mesin pencacah dan fasilitas pencucian pada tingkat Bank Sampah Induk — sebuah langkah yang berada di luar cakupan purwarupa ini dan karenanya diusulkan sebagai butir rekomendasi kebijakan tersendiri pada Subbab 5.2.2.

Koreksi ini justru memperkuat argumen ilmiah kajian, bukan melemahkannya. Sumbangan utama instrumentasi presisi terletak pada kemurnian material, sebagaimana dinyatakan Proposisi 3 dan didukung pengujian van Velzen yang menunjukkan bahwa material hasil skema berinsentif jauh lebih bersih daripada material hasil pengumpulan terpilah biasa (dalam Sidorczuk-Pietraszko dkk., 2025). Kemurnian inilah yang menentukan kelas harga, dan kelas harga inilah yang menentukan apakah bank sampah dapat bertahan secara ekonomi.

### 4.3.2 Rantai Pasok Residu Organik ke Fasilitas Biokonversi dan PLTSa Putri Cempo

Penerapan teknologi pengolahan sampah menjadi energi melalui PLTSa di TPA Putri Cempo merupakan intervensi strategis untuk mereduksi volume tonase pembuangan. Fasilitas ini dirancang sebagai proyek kerja sama pemerintah dengan badan usaha berkapasitas sekitar 540 ton sampah per hari dengan keluaran listrik 5 MW yang dijual kepada PT PLN pada harga 13,35 sen dolar AS per kWh (Kementerian Pekerjaan Umum, t.t.). Realisasi di lapangan masih jauh di bawah rancangan: pada Maret 2026 kapasitas yang benar-benar terolah berkisar 50–80 ton per hari (RRI, 2026), dan pada Mei 2026 kalangan DPRD mencatat komitmen operator untuk menaikkannya menjadi 200 ton per hari mulai Juni (DPRD Kota Surakarta, 2025). Dari perspektif termodinamika dan tata kelola operasional, fasilitas pengolahan termal ini bukanlah solusi tunggal yang bebas risiko (WALHI, 2024).

Kelemahan mendasar operasional teknologi pengolahan sampah menjadi energi terletak pada ketergantungannya terhadap kestabilan nilai kalor material yang diolah (WALHI, 2024). Timbulan sampah harian Surakarta masih didominasi campuran antara sampah basah dan kering akibat ketiadaan pemilahan di sumber. Memasukkan sampah organik basah ke dalam reaktor menyebabkan efisiensi termal menurun, sehingga fasilitas terpaksa mengaktifkan subsistem pengeringan tambahan yang menyerap energi internal secara besar.

Argumen tersebut memperoleh dukungan dari data komposisi. Komposisi sampah Kota Surakarta didominasi fraksi organik, dengan sampah makanan sebagai penyumbang terbesar, sementara data Dinas Lingkungan Hidup menunjukkan komposisi menurut jenis berupa organik sekitar 62%, plastik sekitar 13%, dan kertas sekitar 12%. Material organik basah berkadar air tinggi merupakan penghambat utama proses gasifikasi karena membuat mutu gas sintesis menjadi tidak stabil. Dengan demikian, pemisahan di hulu bukan sekadar menguntungkan bank sampah, melainkan merupakan prasyarat teknis bagi membaiknya kinerja fasilitas hilir. Inilah tautan langsung antara gagasan kajian ini dengan persoalan yang sedang diaudit pemerintah pusat.

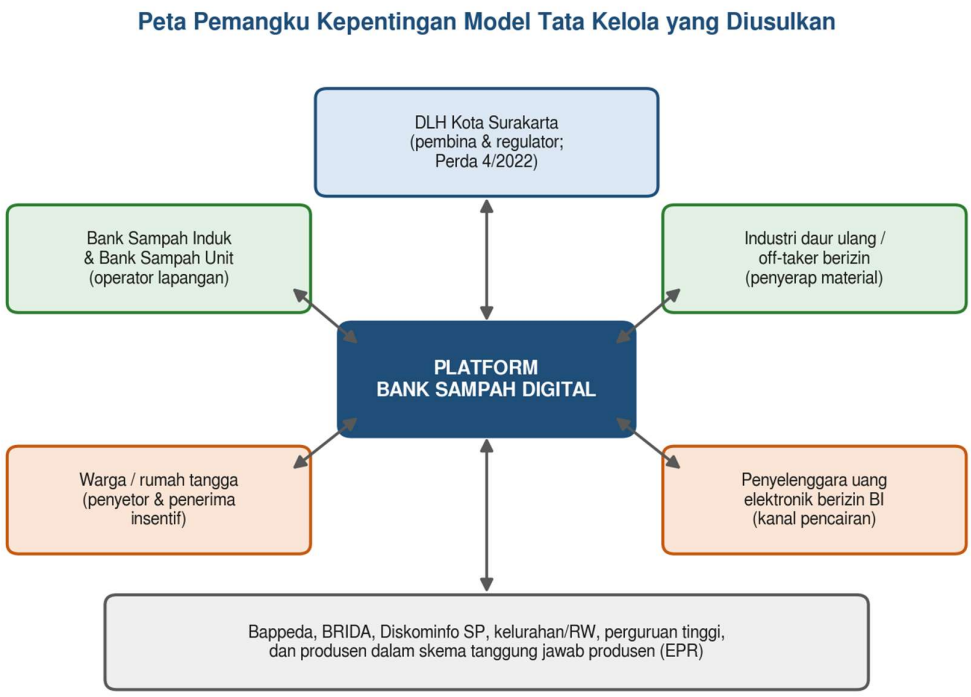
Melalui arsitektur isolasi kompartemen, residu organik dipisahkan secara mekanis sejak awal pembuangan. Dengan adanya sistem peringatan dini dari sensor ultrasonik, fraksi organik dievakuasi secara tepat waktu sebelum memasuki

fase dekomposisi anaerobik yang melepaskan metana. Aliran material organik yang terbebas dari kontaminan struktural membuka dua rute penyaluran. Pertama, material organik murni dapat langsung didistribusikan ke fasilitas biokonversi komunal seperti budidaya larva lalat tentara hitam atau fasilitas pengomposan kota tanpa memerlukan biaya penyortiran sekunder. Kedua, apabila residu tersebut pada akhirnya harus dikirim ke TPA Putri Cempo, material tersebut tidak lagi membawa serta komoditas polimer bernilai tinggi.

Terhadap uraian tersebut perlu ditegaskan kembali koreksi mengenai *tipping fee*. Karena Kota Surakarta menerapkan skema tanpa biaya layanan pengolahan sampah, mencegah botol plastik masuk ke armada pengangkut tidak menghasilkan penghematan langsung pada pos belanja tersebut. Manfaat fiskalnya bersifat tidak langsung, yaitu melalui perpanjangan umur pakai lahan urug yang menunda kebutuhan belanja modal lahan baru, serta melalui membaiknya kinerja fasilitas hilir yang menurunkan risiko beban fiskal di kemudian hari apabila skema pembiayaan proyek berubah setelah audit pemerintah pusat.

### 4.3.3 Keselarasan Kelembagaan dan Peta Pemangku Kepentingan

Model tata kelola yang diusulkan melibatkan enam kelompok pemangku kepentingan dengan peran yang saling melengkapi, sebagaimana digambarkan pada Gambar 4.8.




**Gambar 4.8** Peta pemangku kepentingan model tata kelola yang diusulkan

Keselarasan model ini dengan arah pembangunan daerah dapat diperiksa secara terperinci terhadap Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 9 Tahun 2025 tentang RPJMD 2025–2029, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Keselarasan gagasan kajian dengan misi RPJMD Kota Surakarta 2025–2029

| Misi RPJMD 2025–2029 | Keterkaitan dengan gagasan kajian |
|---|---|
| Misi 3: Daya saing ekonomi untuk kesejahteraan | Pemulihan nilai ekonomi material daur ulang; penguatan penerimaan bank sampah dan pendapatan tambahan rumah tangga |
| Misi 4: Inovasi birokrasi untuk pelayanan publik yang adaptif dan inklusif | Digitalisasi pencatatan setoran dan pelaporan; keterhubungan dengan digitalisasi layanan retribusi persampahan yang telah dirintis DLH |
| Misi 5: Ketahanan kota dan kerja sama wilayah terpadu dan berkelanjutan | Pengurangan beban TPA, perpanjangan umur pakai lahan urug, dan perbaikan mutu umpan fasilitas hilir |
| Misi 1 dan 2 (keterkaitan tidak langsung) | Penurunan risiko kesehatan lingkungan akibat penumpukan sampah organik; penguatan gotong royong pada tingkat RT/RW |

Pada tingkat nasional, gagasan ini bertaut dengan cita ke-8 Asta Cita mengenai keselarasan kehidupan dengan lingkungan dan alam, serta dengan cita ke-2 pada aspek ekonomi hijau. Perlu ditegaskan kembali bahwa Asta Cita merupakan dokumen pemerintah pusat, sehingga rumusan "Asta Cita Kota Surakarta poin ke-8" pada naskah terdahulu tidak tepat dan telah dikoreksi.

Aspek kelembagaan yang paling menentukan, sesuai Proposisi 4, adalah kepastian penyerap material. Tanpa perjanjian tertulis dengan badan usaha berizin yang memuat spesifikasi mutu, mekanisme penetapan harga, dan jaminan penyerapan berkala, perbaikan teknologi hanya akan memindahkan titik kemacetan dari pencatatan ke penyaluran. Temuan ini konsisten dengan hasil Budiyarto dkk. (2025) dan Juriani dan Anugrahini (2026) yang menempatkan ketidaktetapan pasar penyerap sebagai penyebab berulang kegagalan bank sampah. Karena itu perjanjian penyerap ditempatkan sebagai prasyarat, bukan pelengkap, dan menjadi butir rekomendasi kebijakan pertama pada Subbab 5.2.2.

## 4.4 Kelayakan Teknis, Ekonomi, dan Kelembagaan serta Mitigasi Risiko

Subbab ini menjawab tujuan penelitian keempat, yaitu menilai kelayakan gagasan beserta risikonya secara terbuka.

### 4.4.1 Kelayakan Teknis

Dari dimensi rekayasa, purwarupa *Smart Trash Bin* menunjukkan tingkat kelayakan yang tinggi karena dibangun di atas arsitektur mikrokontroler ESP32 dan instrumen metrologi standar yang telah mapan. Penggunaan komponen berbiaya rendah yang dipadukan dengan optimasi algoritma memastikan purwarupa tidak memerlukan biaya perawatan yang mahal, dan sistem mampu beroperasi secara mandiri tanpa memerlukan tenaga manusia untuk penyortiran manual pada tingkat basis.

Meskipun demikian, kelayakan teknis perlu dinyatakan bersama batasnya. Empat batas yang teridentifikasi adalah: (a) ketelitian penimbangan terbatas pada ± 2 gram atau ± 1% pembacaan sehingga tidak sesuai untuk setoran bermassa sangat kecil; (b) keandalan pembacaan volumetrik bergantung pada koreksi suhu yang harus diterapkan; (c) ketersediaan jaringan menjadi titik rawan tunggal apabila tidak disediakan penyangga data lokal; serta (d) daya tahan komponen elektronik di ruang terbuka pada iklim tropis lembap belum diuji dalam jangka panjang. Keempat batas ini tidak membatalkan kelayakan, tetapi menentukan bahwa penerapan harus didahului percontohan terkendali, bukan penyebaran serentak berskala kota.

### 4.4.2 Kelayakan Ekonomi

Analisis kelayakan ekonomi disusun ulang pada revisi ini karena naskah terdahulu bertumpu pada dua asumsi yang tidak tepat, yaitu harga jual pada kelas biji plastik dan penghematan *tipping fee* yang sebenarnya tidak dibayarkan. Perhitungan berikut menggunakan asumsi yang dinyatakan terbuka dan disajikan dalam rentang.

**Tabel 4.3** Perkiraan belanja modal dan biaya operasional per unit

| Komponen | Perkiraan biaya per unit (Rp) |
|---|---|
| Bodi logam dua kompartemen berpelindung cuaca | 2.200.000 – 3.000.000 |
| Mikrokontroler, sel beban, HX711, sensor ultrasonik, sensor suhu | 180.000 – 260.000 |
| Pemindai optik dan aktuator penguncian | 350.000 – 500.000 |
| Catu daya, baterai, dan modul surya kecil | 500.000 – 800.000 |
| Rangkaian, penyelungkup, dan perkabelan | 150.000 – 250.000 |
| Perakitan, pengujian, dan kalibrasi awal | 350.000 – 500.000 |
| **Total belanja modal per unit** | **3.730.000 – 5.310.000** |
| Biaya operasional tahunan (konektivitas, pemeliharaan, tera ulang, komputasi awan) | 1.100.000 – 1.500.000 |

*Sumber: perkiraan penulis berdasarkan harga komponen pasar dalam negeri; bersifat indikatif dan wajib diverifikasi melalui survei harga sebelum penganggaran.*

Sisi penerimaan dihitung dari selisih harga akibat kenaikan kemurnian, yaitu dari kisaran Rp1.750 per kilogram untuk PET campur kotor menjadi Rp5.000 per kilogram untuk PET bening bersih terpilah, sehingga marjin kemurnian sekitar Rp3.250 per kilogram. Uji kepekaan terhadap volume terkumpul disajikan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4** Uji kepekaan kelayakan ekonomi terhadap volume terkumpul

| Volume PET terkumpul | Marjin kemurnian per tahun | Selisih terhadap biaya operasional | Waktu pengembalian modal |
|---|---|---|---|
| 30 kg/unit/bulan | Rp 1.170.000 | Negatif sampai impas | Tidak tercapai |
| 60 kg/unit/bulan | Rp 2.340.000 | Surplus ± Rp 1.040.000 | ± 4,3 tahun |

| Volume PET terkumpul | Marjin kemurnian per tahun | Selisih terhadap biaya operasional | Waktu pengembalian modal |
|---|---|---|---|
| 100 kg/unit/bulan | Rp 3.900.000 | Surplus ± Rp 2.600.000 | ± 1,7 tahun |
| 150 kg/unit/bulan | Rp 5.850.000 | Surplus ± Rp 4.550.000 | ± 1,0 tahun |

*Catatan: perhitungan memakai belanja modal Rp4.500.000 dan biaya operasional Rp1.300.000 per unit per tahun sebagai titik tengah rentang Tabel 4.3.*

Hasil uji kepekaan menghasilkan simpulan yang berbeda secara mendasar dari naskah terdahulu. Pernyataan bahwa belanja modal akan tertutup dalam hitungan bulan tidak dapat dipertahankan. Pada volume rendah sekitar 30 kilogram per unit per bulan, marjin kemurnian bahkan belum menutup biaya operasional, sehingga unit tidak layak berdiri sendiri sebagai usaha. Titik impas operasional baru tercapai pada sekitar 40 kilogram per unit per bulan, dan pengembalian belanja modal dalam waktu di bawah dua tahun memerlukan volume sekitar 100 kilogram per unit per bulan.

Temuan ini mengubah rekomendasi penerapan secara berarti. Penempatan unit tidak boleh disebar merata, melainkan harus dipusatkan pada titik berlalu lintas tinggi seperti kawasan sekitar pasar, terminal, kampus, pusat perbelanjaan, dan ruang publik yang ramai, agar ambang volume tercapai. Selain itu, kelayakan akan jauh lebih kokoh apabila belanja modal tidak sepenuhnya dibebankan pada anggaran daerah, melainkan dibagi bersama produsen kemasan melalui skema tanggung jawab produsen sebagaimana Peraturan Menteri LHK Nomor P.75 Tahun 2019, atau melalui tanggung jawab sosial perusahaan. Skema pembiayaan bersama ini sekaligus konsisten dengan simpulan ulasan Sidorczuk-Pietraszko dkk. (2025) bahwa skema pengembalian berimbalan sebaiknya dipahami sebagai bagian dari kerangka tanggung jawab produsen, bukan sebagai beban tunggal pemerintah daerah.

Perlu ditambahkan pula bahwa perhitungan di atas belum memasukkan manfaat yang tidak dapat dimonetisasi secara langsung, yaitu penghematan waktu kader bank sampah, perpanjangan umur pakai lahan urug, penurunan emisi metana, dan nilai edukasi lingkungan. Ketiadaan manfaat tersebut dalam perhitungan membuat angka pada Tabel 4.4 bersifat konservatif.

### 4.4.3 Kelayakan Kelembagaan

Kelayakan kelembagaan dinilai melalui pemeriksaan apakah setiap unsur model berada dalam kewenangan perangkat daerah. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa seluruh unsur dapat dijalankan tanpa memerlukan pembentukan peraturan daerah baru. Pemberian insentif atas perilaku pemilahan telah memiliki dasar pada bab insentif dan disinsentif Peraturan Daerah Nomor 4 Tahun 2022, sehingga yang diperlukan adalah peraturan wali kota sebagai petunjuk pelaksanaan. Pembinaan bank sampah telah menjadi kewenangan Dinas Lingkungan Hidup berdasarkan Peraturan Menteri LHK Nomor 14 Tahun 2021.

Kerja sama dengan badan usaha penyerap material dapat ditempuh melalui mekanisme kerja sama daerah yang telah baku.

Hambatan kelembagaan yang justru lebih nyata bersifat organisatoris, yaitu keterbatasan kapasitas kader bank sampah dalam mengelola sistem digital, dan risiko bahwa unit yang telah terpasang tidak terpelihara ketika program berganti kepemimpinan. Kedua hambatan ini menuntut adanya penanggung jawab pemeliharaan yang jelas dan anggaran pemeliharaan yang berkelanjutan sejak awal, bukan sekadar anggaran pengadaan.

### 4.4.4 Analisis Risiko dan Mitigasi

**Tabel 4.5** Analisis risiko penerapan dan mitigasinya

| Risiko | Tingkat | Mitigasi yang diusulkan |
|---|---|---|
| Volume setoran di bawah ambang kelayakan | Tinggi | Penempatan selektif pada titik berlalu lintas tinggi; percontohan terkendali sebelum penyebaran; pembiayaan bersama melalui skema tanggung jawab produsen |
| Penurunan partisipasi setelah masa awal | Tinggi | Penambahan lapisan pengakuan sosial tingkat RW; peninjauan berkala nilai konversi; pemantauan longitudinal enam dan dua belas bulan |
| Kerusakan dan perusakan alat di ruang publik | Sedang | Bodi berpelindung, pemasangan pada lokasi terawasi, penganggaran pemeliharaan sejak awal |
| Kecurangan setoran material tanpa nilai | Sedang | Saling kunci pemindai dan sel beban; batas transaksi harian; penandaan pola menyimpang |
| Sengketa akibat galat penimbangan | Sedang | Tera dan tera ulang berkala; pembulatan konservatif; mekanisme pengaduan yang jelas |
| Pelanggaran pelindungan data pribadi | Sedang | Token acak tanpa data pribadi; enkripsi transportasi; masa simpan terbatas; mekanisme penarikan persetujuan |
| Ketidakpastian penyerapan material | Tinggi | Perjanjian tertulis dengan penyerap berizin sebagai prasyarat operasional |
| Kesenjangan akses bagi warga lanjut usia | Sedang | Mempertahankan jalur setoran konvensional melalui kader sebagai pilihan setara |
| Fluktuasi harga material daur ulang | Sedang | Nilai konversi dibaca dari tabel di sisi peladen; peninjauan berkala; dana penyangga pada tingkat Bank Sampah Induk |

Dari tabel tersebut terlihat bahwa risiko tertinggi bukan berasal dari sisi teknologi, melainkan dari sisi volume, keawetan perilaku, dan kepastian penyerapan. Temuan ini sejalan dengan pola literatur pada Subbab 2.2.3 yang menunjukkan bahwa kegagalan bank sampah jarang bersifat teknis. Dengan demikian, jawaban atas tujuan penelitian keempat dapat dinyatakan sebagai berikut: gagasan ini layak secara teknis dan kelembagaan, layak secara ekonomi hanya pada kondisi volume tertentu, dan karenanya harus diterapkan secara bertahap melalui percontohan terkendali dengan indikator keberhasilan yang

bertumpu pada kemurnian material dan keawetan perilaku, bukan pada tonase agregat.

# BAB V
# PENUTUP

## 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan berikut disusun mengikuti urutan subbab pembahasan, sehingga setiap butir merupakan jawaban langsung atas satu tujuan penelitian.

### 5.1.1 Kesimpulan atas Rancang Bangun dan Partisipasi Pemilahan (Subbab 4.1)

Penerapan bank sampah digital berbasis *Smart Trash Bin* di Kota Surakarta dapat menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan partisipasi masyarakat dalam pemilahan sampah dari sumber. Kehadiran dua kompartemen terpisah untuk organik dan anorganik mempermudah warga melakukan pemisahan secara praktis dan terstruktur, sedangkan skema poin pada material anorganik memberikan insentif ekonomi langsung.

Analisis pada Subbab 4.1 menunjukkan bahwa unsur yang paling berubah bukanlah besaran imbalan, melainkan biaya non-moneter partisipasi berupa waktu tunggu, keterikatan jadwal, dan ketidakpastian angka. Rancangan yang menghilangkan keterikatan jadwal dan menyajikan angka terukur dengan batas ketidakpastian yang dinyatakan secara terbuka merupakan sumbangan utama gagasan ini terhadap peningkatan partisipasi. Namun perlu disimpulkan pula bahwa rancangan ini mensyaratkan kepemilikan telepon pintar, sehingga jalur setoran konvensional melalui kader wajib dipertahankan agar tidak terjadi penyisihan warga lanjut usia dan kelompok berpenghasilan rendah.

### 5.1.2 Kesimpulan atas Efektivitas Skema Poin dan Notifikasi (Subbab 4.2)

Sistem notifikasi otomatis pada wadah organik mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah rumah tangga. Sensor volume yang terhubung dengan aplikasi memungkinkan petugas segera mengetahui lokasi wadah yang telah penuh, sehingga pengangkutan dapat dilakukan lebih tepat waktu. Hal ini membantu mengurangi penumpukan, mencegah pembusukan yang menimbulkan bau dan pencemaran, serta memperbaiki mutu umpan bagi fasilitas pengolahan hilir.

Terhadap besaran dampaknya perlu disimpulkan secara jujur. Proyeksi pada Subbab 4.2.4 menunjukkan bahwa bahkan pada skenario optimistis dengan 400 unit terpasang, PET yang teralihkan baru sekitar 3,3 ton per hari atau kurang dari satu persen timbulan yang masuk ke TPA. Klaim reduksi beban TPA yang sangat signifikan sebagaimana tertulis pada naskah terdahulu karena itu tidak dapat dipertahankan. Nilai sesungguhnya gagasan ini terletak pada perannya sebagai instrumen pembentuk kebiasaan memilah dan pada peningkatan kemurnian material, bukan pada tonase agregat. Konsekuensinya, indikator keberhasilan yang

tepat adalah tingkat kemurnian material, jumlah rumah tangga yang berpindah menjadi pemilah, dan keawetan perilaku tersebut, bukan ton per hari.

Disimpulkan pula bahwa angka penghematan bahan bakar sebesar 15% yang tercantum pada gambar dasbor naskah terdahulu tidak memiliki dasar perhitungan dan diperlakukan sebagai ilustrasi antarmuka semata. Besarnya penghematan rute bergantung sepenuhnya pada sebaran tingkat pengisian antartitik dan wajib diukur melalui percontohan.

### 5.1.3 Kesimpulan atas Model Kemitraan dan Tata Kelola (Subbab 4.3)

Keberhasilan bank sampah digital tidak hanya bergantung pada partisipasi masyarakat, tetapi juga pada kemitraan strategis antara pemerintah, masyarakat, bank sampah, dan industri pendaur ulang. Sampah organik yang terkumpul dapat diolah menjadi kompos maupun bahan biokonversi, sedangkan sampah anorganik dapat diproses kembali menjadi produk bernilai ekonomi. Integrasi ini memperkuat rantai ekonomi sirkular yang lebih efisien, transparan, dan berkelanjutan, serta selaras dengan Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 9 Tahun 2025 tentang RPJMD 2025–2029, khususnya misi ketiga, keempat, dan kelima.

Dua koreksi penting disimpulkan pada bagian ini. *Pertama*, nilai tambah ekonomi yang benar-benar dihasilkan instrumen adalah kenaikan kelas harga dari PET campur kotor pada kisaran Rp1.500–Rp2.000 per kilogram menjadi PET bening bersih terpilah pada kisaran Rp4.000–Rp6.000 per kilogram, yaitu sekitar dua sampai tiga kali lipat — bukan delapan sampai sepuluh kali lipat sebagaimana tertulis pada naskah terdahulu, karena rentang Rp8.000–Rp15.000 merupakan harga cacahan atau biji plastik yang menuntut investasi mesin pencacah dan fasilitas pencucian. *Kedua*, PLTSa Putri Cempo dioperasikan dengan skema tanpa biaya layanan pengolahan sampah, sehingga manfaat fiskal gagasan ini tidak terletak pada penghindaran *tipping fee*, melainkan pada perpanjangan umur pakai lahan urug dan perbaikan mutu umpan fasilitas hilir.

Disimpulkan pula bahwa unsur kelembagaan yang paling menentukan adalah kepastian penyerap material. Tanpa perjanjian tertulis dengan badan usaha berizin, perbaikan teknologi hanya memindahkan titik kemacetan dari pencatatan ke penyaluran.

### 5.1.4 Kesimpulan atas Kelayakan dan Risiko (Subbab 4.4)

Gagasan ini layak secara teknis dengan empat batas yang dinyatakan terbuka, yaitu ketelitian penimbangan pada ± 2 gram atau ± 1% pembacaan, keharusan koreksi suhu pada pengukuran volumetrik, kebutuhan penyangga data lokal, dan belum teruji daya tahan jangka panjang pada iklim tropis lembab. Gagasan ini juga layak secara kelembagaan karena seluruh unsurnya berada dalam kewenangan perangkat daerah dan telah memiliki dasar hukum pada bab insentif dan disinsentif Peraturan Daerah Nomor 4 Tahun 2022 tentang

Pengelolaan Sampah, sehingga cukup memerlukan peraturan wali kota sebagai petunjuk pelaksanaan.

Kelayakan ekonomi bersifat bersyarat. Uji kepekaan menunjukkan bahwa pada volume 30 kilogram per unit per bulan marjin kemurnian belum menutup biaya operasional; titik impas operasional baru tercapai pada sekitar 40 kilogram per unit per bulan, dan pengembalian belanja modal di bawah dua tahun memerlukan volume sekitar 100 kilogram per unit per bulan. Pernyataan pada naskah terdahulu bahwa belanja modal tertutup dalam hitungan bulan karena itu dikoreksi. Konsekuensi kebijakannya adalah bahwa unit harus ditempatkan secara selektif pada titik berlalu lintas tinggi dan pembiayaannya sebaiknya dibagi bersama produsen kemasan melalui skema tanggung jawab produsen.

Terakhir, disimpulkan bahwa risiko tertinggi penerapan tidak berasal dari sisi teknologi, melainkan dari volume setoran, keawetan perilaku, dan kepastian penyerapan material. Temuan ini konsisten dengan pola literatur yang menunjukkan bahwa kegagalan bank sampah jarang bersifat teknis.

## 5.2 Rekomendasi

### 5.2.1 Rekomendasi Penelitian

Kajian ini memiliki keterbatasan yang perlu ditutup oleh penelitian lanjutan. Keterbatasan tersebut mencakup: purwarupa baru diuji pada skala laboratorium dan belum diuji lapangan; data perilaku warga masih bersumber dari observasi dan wawancara terbatas, bukan dari pengukuran sebelum dan sesudah intervensi; serta proyeksi ekonomi bersifat *ex-ante* dengan harga material yang fluktuatif. Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian lanjutan direkomendasikan sebagai berikut.

1. **Uji lapangan terkendali dengan kelompok pembanding.** Penelitian berikutnya perlu memasang unit pada sejumlah RW terpilih dan membandingkannya dengan RW pembanding yang setara secara sosial ekonomi, dengan pengukuran sebelum dan sesudah intervensi. Rancangan kuasi-eksperimen ini akan mengubah proposisi pada Subbab 2.5 menjadi hipotesis yang dapat diuji secara inferensial.
2. **Pemantauan longitudinal keawetan perilaku.** Mengingat tingginya tingkat putus pakai pada intervensi berbasis aplikasi, penelitian lanjutan perlu mengukur partisipasi pada bulan ketiga, keenam, dan kedua belas untuk menguji apakah pengaruh insentif bertahan atau meluruh.
3. **Pengujian ketertelusuran metrologi.** Diperlukan penelitian yang menguji purwarupa terhadap standar acuan bersertifikat, termasuk uji histeresis, rayapan, dan pergeseran titik nol akibat suhu, sebagai persiapan menuju tera oleh unit metrologi legal daerah.
4. **Analisis daur hidup dan neraca karbon.** Belum ada perhitungan jejak karbon dari produksi, operasi, dan pengangkutan unit. Penelitian lanjutan perlu

memastikan bahwa manfaat lingkungan yang diklaim tidak terhapus oleh dampak produksi perangkat itu sendiri.

5. **Kajian ekonomi dengan data realisasi.** Perhitungan pada Tabel 4.4 perlu diperbarui menggunakan data volume dan harga aktual dari percontohan, disertai analisis kepekaan terhadap gejolak harga material daur ulang.
6. **Kajian keadilan akses.** Diperlukan penelitian khusus mengenai hambatan yang dihadapi warga lanjut usia, penyandang disabilitas, dan warga tanpa telepon pintar, agar rancangan tidak memperlebar kesenjangan digital.
7. **Kajian keamanan siber dan pelindungan data.** Penelitian lanjutan perlu melakukan uji penetrasi terhadap arsitektur sistem serta penilaian dampak pelindungan data pribadi sesuai Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022 tentang Pelindungan Data Pribadi.

### 5.2.2 Rekomendasi Kebijakan

Rekomendasi berikut disusun per pemangku kepentingan dan dibatasi pada tindakan yang berada dalam kewenangan masing-masing pihak menurut peraturan yang berlaku. Untuk kebijakan yang sudah berjalan, rekomendasi diarahkan pada peningkatan atau perbaikan kinerja, bukan pada pembentukan program baru.

**a. Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta**

1. Menyusun peraturan wali kota sebagai petunjuk pelaksanaan bab insentif dan disinsentif dalam Peraturan Daerah Nomor 4 Tahun 2022 tentang Pengelolaan Sampah. Ketentuan tersebut sudah ada tetapi belum dioperasionalkan; yang diperlukan adalah aturan turunan yang memuat bentuk insentif, dasar perhitungan, mekanisme pencairan, dan mekanisme pengaduan.
2. Melakukan pemutakhiran dan verifikasi status 131 bank sampah yang tercatat, memilah antara yang aktif dan tidak aktif, serta menyusun program revitalisasi yang terukur. Karena pembinaan bank sampah sudah menjadi kewenangan yang berjalan, rekomendasi ini bersifat perbaikan kinerja atas program yang telah ada.
3. Menempatkan unit percontohan secara selektif pada titik berlalu lintas tinggi, dengan sasaran volume sekurang-kurangnya 100 kilogram PET per unit per bulan sebagaimana ambang kelayakan pada Tabel 4.4, dan tidak menyebarnya secara merata.
4. Menganggarkan biaya pemeliharaan dan tera ulang sejak awal, tidak hanya biaya pengadaan, agar unit tidak menjadi aset menganggur setelah tahun pertama.
5. Menetapkan indikator kinerja program berbasis kemurnian material dan jumlah rumah tangga pemilah, bukan berbasis tonase agregat.
6. Melanjutkan dan memperluas digitalisasi layanan retribusi persampahan yang telah dirintis, serta menyinkronkan basis datanya dengan basis data

kependudukan sebagaimana direkomendasikan kajian BRIDA (2024), agar potensi penerimaan daerah dapat dioptimalkan.

**b. Badan Perencanaan Pembangunan Daerah dan BRIDA Kota Surakarta**

1. Memastikan indikator pengurangan sampah di sumber tercantum secara eksplisit dalam dokumen rencana kerja tahunan sebagai penjabaran misi kelima RPJMD 2025–2029.
2. Menjadikan percontohan ini sebagai bagian dari agenda riset daerah melalui portal E-Riset, dengan kewajiban pelaporan data terbuka agar hasilnya dapat diuji ulang oleh perguruan tinggi.
3. Menyusun kajian pembiayaan bersama dengan produsen kemasan berdasarkan Peraturan Menteri LHK Nomor P.75 Tahun 2019 tentang Peta Jalan Pengurangan Sampah oleh Produsen, agar belanja modal tidak sepenuhnya membebani anggaran daerah.

**c. Bank Sampah Induk dan bank sampah unit**

1. Mengikat perjanjian tertulis dengan penyerap material berizin yang memuat spesifikasi mutu, mekanisme penetapan harga, dan jaminan penyerapan berkala, sebagai prasyarat sebelum unit dioperasikan.
2. Mengusulkan pengadaan mesin pencacah dan fasilitas pencucian pada tingkat Bank Sampah Induk agar material dapat naik ke kelas harga cacahan sebagaimana Gambar 4.7, karena inilah lompatan nilai terbesar dalam rantai pasok.
3. Meninjau tabel nilai konversi poin secara berkala mengikuti pergerakan harga pasar, dan menyediakan dana penyangga kecil agar nilai yang diterima warga tidak berfluktuasi tajam.
4. Mempertahankan layanan setoran konvensional melalui kader sebagai pilihan yang setara bagi warga yang tidak menggunakan telepon pintar.

**d. Dinas Komunikasi, Informatika, Statistik, dan Persandian**

1. Melakukan penilaian dampak pelindungan data pribadi atas rancangan sistem sebelum diterapkan, sesuai Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022 tentang Undang-Undang tentang Pelindungan Data Pribadi, dan memastikan tidak ada data pribadi yang tertanam dalam token kode QR.
2. Memastikan interoperabilitas sistem dengan arsitektur sistem pemerintahan berbasis elektronik yang telah berjalan di Kota Surakarta, agar tidak lahir aplikasi terpisah yang sulit dipelihara.

**e. Unit metrologi legal daerah**

- Melakukan tera dan tera ulang berkala atas unit yang keluarannya menentukan besaran imbalan, sesuai Undang-Undang Nomor 2 Tahun 1981 tentang Metrologi Legal, serta menerbitkan tanda tera yang dapat dilihat warga sebagai penjamin kepercayaan.

**f. Kelurahan, RT/RW, dan masyarakat**

1. Menyelenggarakan sosialisasi berkelanjutan yang menekankan bahwa insentif merupakan pelengkap, bukan pengganti, dari nilai gotong royong menjaga lingkungan, guna mencegah pendesakan motivasi intrinsik.
2. Menetapkan penanggung jawab pemeliharaan unit pada tingkat RW agar perawatan tidak bergantung pada kehadiran petugas dinas.

**g. Perguruan tinggi di Kota Surakarta**

1. Menempatkan pendampingan bank sampah digital sebagai tema kuliah kerja nyata tematik dan pengabdian masyarakat, sebagaimana direkomendasikan kajian BRIDA (2024), untuk menutup keterbatasan kapasitas kader.
2. Melaksanakan penelitian lanjutan sebagaimana Subbab 5.2.1 dan mempublikasikan datanya secara terbuka.

**h. Produsen kemasan dan pelaku usaha**

- Berpartisipasi dalam pembiayaan bersama unit dan dalam penyerapan material sebagai pelaksanaan peta jalan pengurangan sampah oleh produsen, melanjutkan praktik kemitraan pengumpulan kemasan yang telah pernah berjalan di Kota Surakarta.

Seluruh rekomendasi di atas telah diperiksa kesesuaiannya dengan kewenangan masing-masing pihak dan tidak memerlukan perubahan peraturan perundang-undangan pada tingkat yang lebih tinggi, sehingga dapat dijalankan dengan baik dan benar oleh perangkat daerah Kota Surakarta.

# DAFTAR PUSTAKA


Adji, B. K., Octodhiyanto, I., & Rahmayanti, R. (2022). Microplastic pollution in Rawa Jombor Reservoir, Klaten, Central Java, Indonesia: Accumulation in aquatic fauna, heavy metal interactions, and health risk assessment. *Water, Air, & Soil Pollution, 233*(7), 261. https://doi.org/10.1007/s11270-022-05572-2

Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 50*(2), 179–211. https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T

Antara. (2019, 14 Februari). *Pemkot Surakarta harapkan "tipping fee" PLTSa ditanggung pusat*. Antara Jawa Tengah. https://jateng.antaranews.com

Ariyanti, N. P. K., Priyanto, S. A., & Salsabila, H. N. (2025). The effect of population density on the level of public awareness in 3R-based domestic waste management: A study in the densely populated settlement of Sangkrah Village, Surakarta City. *Mahogany Journal of Development Studies*.

Badan Riset dan Inovasi Daerah (BRIDA) Kota Surakarta. (2024). *Kajian optimalisasi retribusi pelayanan persampahan Kota Surakarta*. Surakarta: BRIDA Kota Surakarta. https://brida.surakarta.go.id/e-riset

Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering, 33*(5), 308–320. https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124

Budiyarto, A., Clarke, B., & Ross, K. (2025). Overview of waste bank application in Indonesian regencies. *Waste Management & Research, 43*(3), 306–321. https://doi.org/10.1177/0734242X241242697

Calabrese, A., Costa, R., Levialdi Ghiron, N., Menichini, T., Miscoli, V., & Tiburzi, L. (2021). Operating modes and cost burdens for the European deposit-refund systems: A systematic approach for their analysis and design. *Journal of Cleaner Production, 288*, 125600. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125600

Dewan Perwakilan Rakyat Daerah (DPRD) Kota Surakarta. (2024). *Komisi III tinjau gunungan sampah di lokasi TPA Putri Cempo Mojosongo*. Surakarta: Sekretariat DPRD Kota Surakarta. https://dprd.surakarta.go.id

Dewan Perwakilan Rakyat Daerah (DPRD) Kota Surakarta. (2025). *Kinerja PLTSa masih jauh dari harapan, DPRD Kota Surakarta desak percepatan pengolahan sampah*. Surakarta: Sekretariat DPRD Kota Surakarta. https://dprd.surakarta.go.id

Dewan Perwakilan Rakyat Republik Indonesia. (2025, 15 November). *Panja Lingkungan Hidup Komisi XII soroti mandeknya PLTSa Putri Cempo Surakarta*. https://www.dpr.go.id

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition* (Vol. 1). Cowes: Ellen MacArthur Foundation.

Fahriza, R., & Yuliana, E. (2024). Smart waste management: Revolutionizing waste bank in Bandung (Indonesia). Dalam *Business through AI, technology education and current challenges*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73632-2_57

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy — A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production, 143*, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Hermawan, I., dkk. (2025). Penguatan literasi lingkungan melalui tempat sampah pintar berbasis Internet of Things. *Bubungan Tinggi: Jurnal Pengabdian Masyarakat, 7*(4). https://doi.org/10.20527/btjpm.v7i4.16150

Jaringan Dokumentasi dan Informasi Hukum (JDIH) Kota Surakarta. (2025). *Visi dan misi Pemerintah Kota Surakarta berdasarkan Peraturan Daerah Nomor 9 Tahun 2025 tentang RPJMD Kota Surakarta Tahun 2025–2029*. https://jdih.surakarta.go.id/visi_misi

Juriani, T., & Anugrahini, T. (2026). The roles and challenges of a community-based waste bank: A case of Bank Sampah Teratai in South Tangerang, Indonesia. *ARISTO, 14*(1), 355–371. https://journal.umpo.ac.id/index.php/aristo

Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2024). *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN): Data timbulan dan komposisi sampah Kota Surakarta*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup. https://sipsn.kemenlh.go.id

Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. (t.t.). *Detail proyek KPBU PLTSa Putri Cempo Surakarta*. Direktorat Jenderal Pembiayaan Infrastruktur Pekerjaan Umum. https://simpulkpbu.pu.go.id

Laubinger, F., Brown, A., Dubois, M., & Börkey, P. (2022). *Deposit-refund systems and the interplay with additional mandatory extended producer responsibility policies* (OECD Environment Working Papers No. 208). Paris: OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/a80f4b26-en

Liputan6. (2022, 26 Februari). *Mengapa banyak bank sampah yang tidak aktif di Solo?* https://www.liputan6.com

Meyerowitz-Katz, G., Ravi, S., Arnolda, L., Feng, X., Maberly, G., & Astell-Burt, T. (2020). Rates of attrition and dropout in app-based interventions for chronic disease: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Medical Internet Research, 22*(9), e20283. https://doi.org/10.2196/20283

Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (edisi ke-3). Thousand Oaks: SAGE Publications.

Murtyas, S., Handayani, K. N., Sho, K., & Hagishima, A. (2025). Exploring pro-environmental behaviors and health-oriented mindsets in urban slum upgrading projects: A case study of Surakarta City, Indonesia. *Urban Science, 9*(4), 131. https://doi.org/10.3390/urbansci9040131

Pandyaswargo, A. H., & Rachman, I. (2025). Do Indonesians separate their waste? Can smart tech bridge the gap? Dalam *Proceedings of the IEEE International Conference*. https://ieeexplore.ieee.org

Pemerintah Kota Surakarta. (2025). *Menteri LHK tinjau PLTSa Putri Cempo, apresiasi inovasi pengelolaan sampah Kota Surakarta*. Surakarta: Pemerintah Kota Surakarta. https://surakarta.go.id

Pemerintah Kota Surakarta. (2026). *Wali Kota Respati Ardi soroti lonjakan sampah, apel pascalebaran digelar di TPA Putri Cempo*. Surakarta: Pemerintah Kota Surakarta. https://surakarta.go.id

Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 4 Tahun 2022 tentang Pengelolaan Sampah.

Peraturan Daerah Kota Surakarta Nomor 9 Tahun 2025 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Kota Surakarta Tahun 2025–2029.

Peraturan Menteri Dalam Negeri Nomor 7 Tahun 2021 tentang Tata Cara Perhitungan, Penganggaran dalam APBD, Pelaksanaan, Penatausahaan, Pertanggungjawaban, dan Pelaporan Dana Alokasi Khusus.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.75 Tahun 2019 tentang Peta Jalan Pengurangan Sampah oleh Produsen.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Sampah pada Bank Sampah.

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 35 Tahun 2018 tentang Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan.

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga.

Picuno, C., Gerassimidou, S., You, W., Martin, O., & Iacovidou, E. (2025). The potential of deposit refund systems in closing the plastic beverage bottle loop: A review. *Resources, Conservation and Recycling, 212*, 107962. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107962

Putera, S. E., Dirgantara, M. G., & Ni'mah, N. (2026). Waste banks as social movements: A case study of Morse Indah Waste Bank in Banjarmasin. *Priviet Social Sciences Journal, 6*(3). https://journal.privietlab.org/index.php/PSSJ/article/view/970

Radio Republik Indonesia (RRI). (2026, 30 Maret). *Belum optimal, Menteri Lingkungan Hidup akan audit PLTSa Putri Cempo*. https://rri.co.id

Rosi, S. D., & Sandria, A. (2025). Multi-actor governance of waste-to-energy: A case study of the Putri Cempo waste-to-energy power plant in Surakarta City. *Industrial and Domestic Waste Management, 5*(2), 195–209.

Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist, 55*(1), 68–78. https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68

Saptutyningsih, E., & Amalia, I. (2024). Social capital and household willingness to pay for improved household waste management: A contingent valuation method. *E3S Web of Conferences*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202412401004

Sasongko, Y. P. D., Haryono, C. G., & Herlina, H. (2025). Circular economy integration in the Daulat Sampah program by stakeholders in Trisik Beach, Yogyakarta. *Humaniora*. https://journal.binus.ac.id/index.php/Humaniora

Sendari, S., Rahmawati, Y., Sucipto, P. W. A., Wibowo, D. A., A'ini, Q., Pramesti, F. C., Ramadani, B. M. F., Ramadan, B. S., Mokthar, N. B., & Wibowo, F. S. (2025). Smart weighing for waste management system using integration Internet of Things and Artificial Intelligence to assist circular economics. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology, 8*(2), 754–771. https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v8i2.23959

Septiani, T., Prasetyani, D., & Hadiwiyono, V. (2024). Sociopreneurship business model in waste management by Surakarta Waste Bank: A contribution of sustainability. *Indonesian Journal of Business and Entrepreneurship, 10*(3), 544. https://doi.org/10.17358/ijbe.10.3.544

Sidorczuk-Pietraszko, E., Piontek, W., & Larsson, A. (2025). Are deposit–return schemes an optimal solution for beverage container collection in the European Union? An evidence review. *Sustainability, 17*(19), 8791. https://doi.org/10.3390/su17198791

Solotrust. (2018, 7 Oktober). *Pemda harus alokasikan anggaran tipping fee PLTSa Putri Cempo*. https://solotrust.com

Supriatna, J., & Lenz, R. (2025). Sustainable waste management. Dalam *Environmental management in Indonesia*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76642-8_10

Surya Indo Utama. (2026). *Harga biji plastik daur ulang PET dan jenis lainnya*. https://siu-bijiplastik.com

Sya'diyah, S., Pranoto, & Utami, T. (2025). Effectiveness of waste bank management in Kapanewon Bantul. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1489*, 012055. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1489/1/012055

Tirto. (2026, 28 Maret). *PLTSa Putri Cempo Surakarta akan diaudit Kementerian Lingkungan Hidup*. https://tirto.id

Tundjungsari, V., Putranto, B. P. D., Ulum, M. B., & Anwar, N. (2025). An integrated model for circular waste management using the Internet of Things, semantic web, and gamification (Circonomy): Case study in Indonesia. *JMIR Serious Games, 13*, e66781. https://doi.org/10.2196/66781

Tuzzahra, N. N., & Ainun, S. (2020). Kajian sisa umur pakai Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Putri Cempo Kota Surakarta. *Jurnal Teknik Lingkungan, 24*(1), 59–68.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 1981 tentang Metrologi Legal.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2022 tentang Pelindungan Data Pribadi.

Wahana Lingkungan Hidup Indonesia (WALHI). (2024). *Sowing the seeds of destruction: Review of waste-to-energy national strategic project in Indonesia*. Jawa Barat: WALHI Jawa Barat.

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (edisi ke-6). Thousand Oaks: SAGE Publications.

Yusmaman, W. M., Widiyanto, H., Rohmah, S. N., & Akbarsyah, M. A. (2024). Urgensi reduksi sampah organik sebelum dibuang ke TPA dalam kerangka ekonomi sirkular di Kota Surakarta. *Jurnal Bengawan Solo, 3*(2), 72–87. https://doi.org/10.58684/jbs.v3i2.82

Zhou, G., Gu, Y., Wu, Y., Gong, Y., Mu, X., Han, H., & Chang, T. (2020). A systematic review of the deposit-refund system for beverage packaging: Operating mode, key parameter and development trend. *Journal of Cleaner Production, 251*, 119660. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119660