

PANDUAN TEKNIS KOMPREHENSIF PEMBANGUNAN PLTSA BERBASIS INSINERASI SKALA BESAR

Kapasitas > 500 Ton/Hari | Persiapan AMDAL dan Perizinan

*Integrasi Lesson Learned PLTSa Benowo Surabaya
(White Paper Hadiananto & Willyanto, Desember 2025)*



PT Centra Rekayasa Enviro (CRE)

Maret 2026

Ringkasan Eksekutif

!!PERINGATAN PENTING: PELAJARAN DARI PLTSA BENOWO

Revisi dokumen ini mengintegrasikan temuan kritis dari White Paper Hadiananto & Willyanto (Desember 2025) yang mendokumentasikan kegagalan multidimensi PLTSA Benowo Surabaya — satu-satunya proyek insinerasi skala nasional yang telah beroperasi di Indonesia. DSCR proyek turun ke 0,0x (default) pada 2025 dengan revenue shortfall 62%, OPEX overrun 110%, dan emisi PM2.5 mencapai $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atau 667% di atas pedoman WHO. Kegagalan ini bukan anomali teknologi, melainkan manifestasi dari pola global: proyek WtE sulit mencapai keberlanjutan finansial tanpa komitmen subsidi jangka panjang yang mengikat secara hukum dan desain kontrak yang robust.

Setiap tahapan pembangunan, persyaratan analisis laboratorium, dan rekomendasi AMDAL dalam dokumen ini telah diperbarui untuk mencerminkan pelajaran operasional nyata dari proyek tersebut.

Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) berbasis insinerasi skala besar ($>500 \text{ ton/hari}$) di Indonesia memasuki fase akselerasi baru dengan disahkannya Perpres No. 109 Tahun 2025. Regulasi ini menaikkan tarif listrik menjadi USD 0,20/kWh, menghapus tipping fee, dan menunjuk BPI Danantara sebagai koordinator nasional. Namun dari 12 kota yang ditargetkan Perpres 35/2018, hanya dua fasilitas yang berhasil beroperasi dalam enam tahun — dan PLTSA Benowo, proyek paling matang di antara keduanya, mengalami krisis finansial akut pada 2025.

Bab 1: Lesson Learned — Kegagalan PLTSa Benowo Surabaya

Sebelum membahas tahapan pembangunan, pemahaman mendalam terhadap kegagalan proyek yang telah berjalan merupakan prasyarat metodologis yang tidak dapat diabaikan. PLTSa Benowo adalah satu-satunya proyek WtE berbasis gasifikasi skala nasional yang telah melewati fase COD di Indonesia, sehingga data operasionalnya menjadi referensi empiris paling relevan untuk perencanaan proyek baru.

1.1 Profil Proyek dan Status Terkini

Parameter	Nilai / Keterangan
Lokasi	TPA Benowo, Kec. Pakal, Surabaya Barat
Operator	PT Sumber Organik (BOT 20 tahun)
Kapasitas nominal	1.600 ton/hari
Teknologi	Gasifikasi (Syngas Engine) — bukan moving grate incineration
Output listrik	2 MW (sangat rendah, efisiensi 9–12%)
Total investasi	Rp 2.035,6 miliar (~USD 121,2 juta)
Status finansial (2025)	DEFAULT — DSCR 0,0x, likuiditas tersisa 4 hari
Impairment loss diperlukan	Rp 1.200–1.400 miliar
Subsidi darurat (2025)	Rp 120 miliar dari Kementerian Keuangan

Sumber: Hadianto & Willyanto, *White Paper PLTSa Benowo*, Desember 2025; IDX Channel, 23 Desember 2025.

1.2 Kegagalan Finansial — Analisis Mendalam

Kegagalan finansial PLTSa Benowo bersifat multikomponen. Tidak ada satu penyebab tunggal, melainkan akumulasi kesalahan desain finansial yang saling memperkuat.

1.2.1 Revenue Shortfall 62% dari Proyeksi

Komponen Revenue	Proyeksi Awal	Aktual 2024	Selisih
Tipping fee	Rp 908 miliar/tahun	Rp 250 miliar/tahun	-72%
Energy sales	Rp 16 miliar/tahun	Rp 100 miliar*	Tidak representatif
Total revenue	Rp 924 miliar/tahun	Rp 350 miliar/tahun	-62%

* Angka energy sales aktual mencerminkan periode tertentu, bukan tahunan penuh. Proyeksi tipping fee awal mengasumsikan WTP rumah tangga Rp 158.485/bulan, jauh di atas kapasitas realistis Rp 50.000–75.000/bulan (Widowati, 2017).

1.2.2 OPEX Overrun 110% dari Proyeksi

Item Biaya	Proyeksi (Rp/ton)	Aktual (Rp/ton)	Variance
Labor & operasional	200	250–350	+25% s.d. +75%
Maintenance & repair	200	350–500	+75% s.d. +150%
Environmental compliance	0 (tidak dianggarkan)	150–300	Tidak terencana
Feedstock (bahan bakar tambahan)	0 (tidak dianggarkan)	200–300	Tidak terencana
Total OPEX	Rp 553.772/ton	Rp 1.350–2.050/ton	+144% s.d. +270%

1.2.3 DAK Shock dan Struktur Subsidi yang Tidak Mengikat

Pada Oktober 2024, Pemerintah Presiden Prabowo memangkas alokasi DAK untuk fasilitas pengelolaan sampah sebesar 49–50% tanpa mekanisme kompensasi alternatif. PLTSA Benowo tidak memiliki perjanjian BLPS yang mengikat secara hukum multi-tahun — semua komitmen subsidi bersifat ad-hoc dan dapat berubah setiap pergantian pemerintahan. Ini adalah kerentanan struktural yang paling fundamental.

!!IMPLIKASI KRITIS UNTUK PROYEK BARU DI BAWAH PERPRES 109/2025

Perpres 109/2025 menghapus tipping fee dan menyederhanakan revenue menjadi satu sumber: tarif listrik dari PLN. Ini menyelesaikan masalah willingness-to-pay yang menghancurkan Benowo. Namun risiko baru muncul: jika PLN gagal memenuhi kewajiban dispatch-prioritas atau tarif tidak diindeks inflasi dengan benar, proyek tetap rentan terhadap revenue shortfall. Pasal 19 ayat (7) mewajibkan PPA dalam 10 hari kerja — namun kualitas dan ketegasan hukum dari perjanjian tersebut perlu diverifikasi secara independen sebelum financial close.

1.3 Kegagalan Teknis dan Operasional

Pemilihan teknologi gasifikasi untuk MSW Indonesia dengan kadar air 40–60% merupakan keputusan teknis yang fundamental keliru. Gasifikasi mensyaratkan feedstock dengan kadar air rendah dan komposisi homogen — kondisi yang tidak dapat dipenuhi oleh mixed MSW perkotaan Indonesia tanpa pre-treatment intensif.

Aspek Teknis	Desain Awal	Aktual	Root Cause
Plant availability	90% (8.000 jam/tahun)	50–60%	Fouling, korosi syngas, kerusakan komponen
Kapasitas diproses	1.600 ton/hari	800 ton/hari (est.)	Downtime tinggi
Efisiensi konversi energi	~12%	9–12%	Moisture content MSW terlalu tinggi
Maintenance cost	Rp 200/ton	Rp 350–500/ton	Teknologi first-of-a-kind, spare parts langka
Komposisi sampah	Asumsi stabil	Variasi ±20–30% harian	Tidak ada pre-sorting system

1.3.1 Perbandingan: Gasifikasi vs. Moving Grate Incineration untuk MSW Indonesia

Parameter	Gasifikasi (Benowo)	Moving Grate Incineration (EU/Jepang Standard)
Toleransi moisture	Rendah (<30% optimal)	Tinggi (dapat memproses hingga 60%)
Toleransi komposisi heterogen	Rendah	Tinggi
Temperatur operasi	800–1.000°C (substoikiometri)	850–1.200°C (berlebih udara)
Kesesuaian MSW Indonesia	Tidak optimal	Optimal (digunakan di 90% fasilitas EU)
Track record global	Terbatas untuk mixed MSW	Sangat luas (350+ lini di Eropa)
Risiko maintenance	Tinggi (tar, korosi)	Lebih terkelola

1.4 Kegagalan Lingkungan — Data Aktual

!!DATA EMISI AKTUAL: PLTSa BENOWO (Monitoring WALHI Jawa Timur, Nov 2024 – Feb 2025)

PM2.5 terukur: >100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (puncak jam operasi) vs. pedoman WHO 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ — melebihi 667%

PM10 terukur: 80–120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vs. standar nasional PP 41/1999 sebesar 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 jam)

Periode monitoring: 49 hari kontinu dengan sensor AirBeam3

Korelasi temporal kuat dengan jam operasi: puncak 06.00–09.00 dan 16.00–19.00

Dampak kesehatan: Dinas Kesehatan Kota Surabaya mencatat 174.000 kasus ISPA Jan–Jul 2023, termasuk >6.500 kasus pada balita. Konsentrasi tertinggi di kelurahan dalam radius 2–5 km dari fasilitas.

Catatan metode: Pengukuran WALHI menggunakan sensor proximity (ambient), BUKAN stack emission testing. Angka ini mencerminkan konsentrasi ambien di sekitar fasilitas, bukan emisi cerobong.

Defisiensi monitoring lingkungan PLTSa Benowo bersifat sistemik. Dokumen AMDAL tidak dapat diakses publik dengan alasan hak cipta, padahal berdasarkan UU 14/2008 AMDAL adalah dokumen publik. Data emisi stack tidak dipublikasikan. Tidak ada program monitoring komunitas yang terstruktur. Ini menjadi pelajaran langsung bagi penyusunan RKL-RPL proyek PLTSA baru: transparansi data lingkungan harus menjadi kewajiban kontraktual, bukan kebijaksanaan operator.

1.5 Root Cause Analysis — Sintesis

Level Penyebab	Faktor	Implikasi untuk Proyek Baru
Penyebab Primer	Revenue shortfall 62%; OPEX overrun 110%; DAK shock 49%; availability 50%	Validasi pasar independen wajib sebelum financial close
Penyebab Sekunder	Heterogenitas sampah; kompleksitas teknologi gasifikasi; monitoring lingkungan tidak memadai; komitmen kebijakan non-binding	Pilih teknologi proven (moving grate); mandatory CEMS; PPA legally binding
Root Cause Tersier	Due diligence finansial tidak memadai; risiko first-of-a-kind underestimated; tidak ada contingency planning	Wajibkan stress-test skenario OPEX +50% dan revenue -30% dalam feasibility study
Kegagalan Tata Kelola	Ketiadaan transparansi; tidak ada komite monitoring komunitas; PPP framework tidak memadai	Mandatory community monitoring committee dengan mandate formal dalam Perkada

!!KESIMPULAN LESSON LEARNED: 5 SYARAT MINIMAL VIABILITAS WtE DI INDONESIA

1. Komitmen subsidi/tarif mengikat secara hukum dengan horizon minimal 20 tahun (bukan kebijakan anggaran tahunan)
2. Teknologi yang terbukti untuk MSW tropis: kadar air tinggi dan heterogen — moving grate incineration, bukan gasifikasi tanpa pre-treatment
3. PPA dengan PLN yang mencantumkan dispatch-prioritas dan eskalasi tarif terindeks inflasi
4. CEMS real-time dengan data terbuka publik sejak hari pertama operasi
5. Contingency reserve minimal 20% CAPEX dan stress-test finansial dengan asumsi OPEX +50%, revenue -30%, availability 65%

Bab 2: Tahapan Pembangunan PLTSA Insinerasi Skala Besar

Proyek PLTSA insinerasi skala besar (>500 ton/hari) berbasis moving grate membutuhkan 5–7 tahun dari studi kelayakan hingga Commercial Operation Date (COD). Setiap fase memiliki deliverables kritis yang saling bergantung. Kegagalan PLTSA Benowo secara konsisten menunjukkan bahwa kegagalan pada fase studi kelayakan (due diligence yang lemah) dan fase pengembangan (struktur kontrak yang tidak memadai) mengakibatkan masalah operasional yang tidak dapat diselesaikan setelahnya.

Fase 1: Pra-Studi Kelayakan dan Studi Kelayakan Penuh (6–12 Bulan)

!!PELAJARAN BENOWO: Due diligence yang tidak memadai adalah root cause tersier dari kegagalan. Proyeksi revenue tipping fee mengasumsikan WTP Rp 158.485/bulan/rumah tangga — 3x di atas kapasitas realistis pasar.

Untuk proyek baru di bawah Perpres 109/2025 (tanpa tipping fee): validasi tarif PLN, kepastian dispatch-prioritas, dan bankability PPA menjadi komponen due diligence yang paling kritis.

Pra-studi kelayakan mencakup identifikasi proyek, analisis struktur komersial, dan pemetaan pemangku kepentingan utama. Studi kelayakan penuh meliputi karakterisasi sampah (komposisi, nilai kalori, kadar air), analisis lokasi, pemilihan teknologi, dan pemodelan finansial komprehensif. Parameter finansial minimum yang harus divalidasi secara independen meliputi CAPEX, OPEX (termasuk maintenance teknologi first-of-a-kind dengan premium 50–100%), proyeksi revenue, dan DSCR minimum 1,25x pada skenario stress.

Berdasarkan Perpres 109/2025 Pasal 4, kriteria kelayakan minimum meliputi: ketersediaan pasokan sampah minimal 1.000 ton/hari selama masa operasional, alokasi APBD untuk pengelolaan sampah, ketersediaan lahan yang sesuai tata ruang, dan komitmen penerbitan perda retribusi sanitasi.

Fase 2: AMDAL dan Perizinan Lingkungan (12–18 Bulan)

Proses AMDAL menghasilkan empat dokumen utama: KA-ANDAL, ANDAL, RKL, dan RPL. Berdasarkan Perpres 109/2025, AMDAL proyek PSEL memperoleh auto-approval dalam 2 bulan. Namun kualitas RKL-RPL — terutama program monitoring emisi, pengelolaan fly ash, dan mekanisme keterlibatan komunitas — harus melampaui persyaratan minimum regulasi.

!!PELAJARAN BENOWO: AMDAL PLTSA Benowo tidak dapat diakses publik dengan klaim hak cipta, melanggar UU 14/2008. Tidak ada komite monitoring komunitas yang dibentuk. Untuk proyek baru, RKL-RPL harus secara eksplisit mewajibkan: (1) publikasi AMDAL dan seluruh laporan monitoring kepada publik; (2) pembentukan Komite Pemantauan Komunitas dengan mandat formal dalam Peraturan Kepala Daerah; (3) dashboard data real-time CEMS yang dapat diakses masyarakat.

Fase 3: Desain Rekayasa dan Pengadaan (12–18 Bulan)

Front-End Engineering Design (FEED) dilanjutkan dengan detailed engineering design. Pengadaan komponen long-lead items (turbin uap, moving grate, boiler) dimulai sejak dini karena lead time 12–18 bulan. Pemilihan teknologi moving grate dari vendor dengan track record operasional pada MSW tropis (kadar air tinggi) merupakan keputusan kritis yang harus didasarkan pada reference plant visit, bukan semata-mata harga penawaran.

Fase 4: Konstruksi (24–36 Bulan)

Konstruksi mencakup pekerjaan sipil, instalasi mekanik (ruang bakar, moving grate, boiler, turbin uap, unit flue gas cleaning), serta sistem elektrikal dan kontrol (SCADA, DCS). Quality control harus memastikan kepatuhan terhadap EU BREF BAT-AELs sebagai design target — bukan hanya batas minimum PermenLHK P.70/2016 yang secara signifikan lebih longgar.

Fase 5: Komisioning dan COD (3–12 Bulan)

Cold commissioning menguji sistem tanpa umpan sampah aktif. Hot commissioning melakukan trial burn dari beban parsial hingga beban penuh. Performance test mengvalidasi throughput, output energi, dan level emisi. Temperatur pembakaran minimum 850°C selama minimal 2 detik (EU IED) harus diverifikasi secara independen sebelum COD dinyatakan.

Bab 3: Spesifikasi Teknis Moving Grate dan Sistem Pembangkit

Moving grate incineration digunakan pada sekitar 90% instalasi WtE di Eropa. Pemilihan teknologi ini — alih-alih gasifikasi seperti yang digunakan di Benowo — merupakan rekomendasi utama berdasarkan lesson learned, mengingat kemampuannya memproses MSW dengan kadar air tinggi dan komposisi heterogen.

3.1 Parameter Sistem Pembakaran Moving Grate

Sistem ini menggunakan barisan inclined metal bars yang menggerakkan sampah melalui zona pembakaran berurutan: pengeringan, pirolisis/gasifikasi, pembakaran, dan burnout. Temperatur pembakaran berkisar 850–1.100°C dengan waktu tinggal sampah di atas grate 45–60 menit. Udara primer disuplai dari bawah grate (ditarik dari reception hall untuk pengendalian bau), sementara udara sekunder diinjeksikan di atas grate untuk pembakaran sempurna.

Parameter	Nilai Tipikal	Catatan
Temperatur ruang bakar	850–1.100°C	EU IED: min. 850°C selama 2 detik
Waktu tinggal gas buang	>2 detik di atas 850°C	Wajib untuk destruksi dioksin/furan
Excess air	60–80% di atas stoikiometri	Dioptimalkan hingga ~39% pada plant modern
Moisture MSW yang dapat diproses	Hingga 60%	Keunggulan vs. gasifikasi untuk MSW Indonesia
Loss on Ignition (LOI) bottom ash	<3% (EU IED)	Indikator kualitas pembakaran
Steam boiler parameter tipikal	40 bar, 400°C	Dibatasi risiko korosi klorida pada superheater
Output listrik bersih	~500–540 kWh/ton	Setelah parasitic load ~15%
Efisiensi listrik bersih	20–28%	Lebih tinggi jika CHP (hingga 85%)

Sumber: Lombardi et al. (2015), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; European Commission WI BREF 2019 (JRC118637).

3.2 Sistem Pengendalian Pencemaran Udara (APC) Multi-Tahap

Ini adalah komponen yang paling penting dan paling berdampak terhadap performa lingkungan PLTSA. Kegagalan APC — sebagaimana terjadi di Benowo dengan emisi PM_{2.5} >100 µg/m³ — merupakan masalah yang tidak dapat ditoleransi dalam konteks perizinan maupun social license to operate.

Komponen APC	Teknologi	Efisiensi Reduksi	Parameter Target (EU BAT-AEL 2019)
Pengendalian NOx	SNCR atau SCR	SNCR: 30–70%; SCR: 80–95%	NOx: 50–120 mg/Nm ³ (dengan SCR)
Penghilangan gas asam	Dry/semi-dry/wet scrubber	HCl: hingga >99% (wet)	HCl: 2–6 mg/Nm ³
Dioksin/furan & merkuri	Activated Carbon Injection (ACI)	Dioksin: >99%	PCDD/F: 0,01–0,04 ng TEQ/Nm ³
Partikulat (PM)	Baghouse (fabric filter)	>99,5%	PM: 2–5 mg/Nm ³

!!LESSON LEARNED BENOWO: Sistem APC yang tidak memadai adalah penyebab langsung emisi PM_{2.5} >100 µg/m³. Dalam proyek baru, baghouse filter dengan ACI (Activated Carbon Injection) harus ditetapkan sebagai persyaratan minimum kontraktual — bukan opsional. Upgrade ke SCR sangat dianjurkan untuk memenuhi EU BAT-AEL yang dijadikan design target.

Bab 4: Program Analisis Laboratorium — Empat Kategori Utama

4.1 Karakterisasi Sampah (Waste Characterization)

!!LESSON LEARNED BENOWO: PLTSA Benowo menerima mixed MSW tanpa pre-sorting. Variasi komposisi harian 20–30% menyebabkan syngas composition swings yang memicu downtime dan emisi tinggi. Untuk PLTSA insinerasi, karakterisasi sampah yang akurat dan representatif adalah fondasi desain — bukan pelengkap studi.

MSW Indonesia khas: 55–65% organik, kadar air 50–65% (wet basis), LHV 6,5–8,6 MJ/kg. Nilai ini mendekati batas minimum 6 MJ/kg untuk kelayakan insinerasi — implikasi desain yang harus diantisipasi.

Parameter Analisis	Standar Metode	Frekuensi Sampling	Relevansi AMDAL
Proximate Analysis (moisture, volatile matter, fixed carbon, ash)	ASTM E870 / EN 15148	Bulanan selama 12 bulan pra-konstruksi	Dasar desain ruang bakar
Ultimate Analysis (C, H, N, S, O, Cl)	ASTM D5373, D4239	Bulanan, minimal 12 bulan	Estimasi emisi HCl, SO ₂ , NO _x
Lower Heating Value (LHV)	ASTM E711 / EN 15400	Setiap batch, atau mingguan operasional	Parameter paling kritis untuk viabilitas
Waste Composition Analysis (% fraksi)	ASTM D5231-92	Kuartalan, per musim	Input model emisi dan residu
Bulk Density & Particle Size	ASTM E1109	Per batch / bulanan	Desain bunker dan feeding system
Chlorine Content (total)	EN 15289 / ASTM D4208	Bulanan	Risiko dioksin/furan dan korosi boiler

Referensi: Boumanchar et al. (2019), Waste Management & Research 37(1); Purnomo et al. (2020), ResearchGate — Experimental study on MSW characteristics in typical cities of Indonesia.

4.2 Monitoring Emisi Gas Buang (Flue Gas)

Monitoring emisi adalah komponen terpenting dalam operasional PLTSA dan persyaratan AMDAL. Lesson learned Benowo secara tegas menunjukkan konsekuensi dari sistem monitoring yang tidak memadai dan tidak transparan.

4.2.1 Perbandingan Baku Mutu Emisi: Indonesia vs. Internasional

Parameter	Indonesia (P.70/2016)	EU IED 2010/75/EU	EU BAT-AEL 2019	Gap Indonesia-EU BAT
PM (debu)	120 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³	2–5 mg/Nm ³	24–60× lebih longgar
SO ₂	210 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³	5–30 mg/Nm ³	7–42× lebih longgar
NO _x	470 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³	50–120 mg/Nm ³	4–9× lebih longgar
HCl	10 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³	2–6 mg/Nm ³	Setara (daily); 2–5× BAT
CO	625 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³	10–50 mg/Nm ³	12–62× lebih longgar
Hg (Merkuri)	3 mg/Nm ³	0,05 mg/Nm ³	0,005–0,020 mg/Nm ³	60–600× lebih longgar
Dioksin/Furan	0,1 ng TEQ/Nm ³	0,1 ng TEQ/Nm ³	0,01–0,04 ng TEQ/Nm ³	Setara IED; 2–10× BAT

Semua nilai pada O₂ referensi 11%, gas kering. Sumber: PermenLHK P.70/2016; EU IED 2010/75/EU Annex VI; European Commission WI BREF BAT Conclusions 2019 (2019/2010/EU).

!!REKOMENDASI PENTING: Adopsi EU BAT-AEL 2019 sebagai Design Target

Meskipun baku mutu Indonesia lebih longgar, untuk proyek baru yang akan memperoleh pembiayaan internasional (JICA, ADB, IFC), mengadopsi BAT-AEL sebagai design target — bukan sekadar memenuhi batas minimum PermenLHK P.70/2016 — adalah persyaratan praktis. IFC Performance Standards dan JICA Environmental Guidelines secara eksplisit merujuk pada BAT-AEL untuk proyek sektor ini.

4.2.2 Parameter CEMS dan Metode Standar

Parameter	Metode EPA	Metode EN (Eropa)	Metode SNI/Indonesia	Frekuensi Monitoring
PM (partikulat)	EPA Method 5	EN 13284-1	SNI 19-7117.12	Kontinu (CEMS) + periodik
SO ₂	EPA Method 6C	EN 14791	SNI 19-7117.3	Kontinu (CEMS)
NO _x	EPA Method 7E	EN 14792	SNI 19-7117.5	Kontinu (CEMS)
CO	EPA Method 10	EN 15058	SNI 19-7117.11	Kontinu (CEMS)
HCl	EPA Method 26A	EN 1911	—	Periodik, min. 2×/tahun
Merkuri (Hg)	EPA Method 30B	EN 13211	—	Periodik, min. 2×/tahun
Dioksin/Furan (PCDD/F)	EPA Method 23	EN 1948-1/2/3	—	Periodik, min. 2×/tahun (direkomendasikan)
Logam berat (multi-elemen)	EPA Method 29	EN 14385	—	Periodik, min. 2×/tahun

Catatan: PermenLHK P.70/2016 menetapkan monitoring dioksin setiap 5 tahun — sangat jarang dibandingkan EU BAT yang mensyaratkan minimal 2×/tahun. Untuk AMDAL, frekuensi yang lebih ketat dianjurkan untuk membangun kepercayaan publik, terutama di tahun-tahun awal operasi.

4.3 Analisis Abu dan Residu: Bottom Ash dan Fly Ash

!!LESSON LEARNED BENOWO: Pengelolaan residu (bottom ash, fly ash, dan unreacted char) di PLTSa Benowo tidak terdokumentasi dengan baik. Tidak ada bukti karakterisasi TCLP, tidak ada bukti secured disposal untuk fly ash, dan tidak ada program pemantauan lindi dari area penyimpanan abu. Ini merupakan risiko lingkungan yang signifikan dan potensi kewajiban hukum yang tidak terencana.

4.3.1 Karakteristik dan Persyaratan Pengujian Bottom Ash

Bottom ash merepresentasikan 20–25% massa sampah asli (80–85% total abu). Umumnya bersifat non-hazardous jika dikelola dengan benar, tetapi memerlukan pengujian formal sebelum dapat dimanfaatkan atau dibuang.

Pengujian	Standar Metode	Parameter Kunci	Threshold/Target
TCLP (Leaching)	EPA Method 1311	Pb, Cd, Hg, As, Cr, Ni, Zn, Ba, Se, Ag	TCLP Pb < 5,0 mg/L (borderline)
Total Logam Berat	EPA 6010D / 6020B (ICP-OES/MS)	Zn, Cu, Pb, Cd, Hg, Cr, Ni, As	Klasifikasi B3 atau non-B3
Loss on Ignition (LOI)	EN 15169 / ASTM D7348	Karbon sisa tak terbakar	< 3% (EU IED) / < 5% (LOI basis)
pH	EPA 9045D	Keasaman/kebasaan	Tipikal 10,5–11 (fresh); 8,5–9,5 (weathered)
Uji Leaching EN	EN 12457-2 (L/S 10, 24 jam)	Logam berat terlarut	Klasifikasi untuk pemanfaatan/landfill
Karakterisasi Mineralogi	XRF / XRD	Komposisi fase mineral	Due diligence pemanfaatan konstruksi

4.3.2 Karakteristik dan Persyaratan Pengujian Fly Ash

Fly ash merepresentasikan 3–5% massa sampah namun mengandung konsentrasi tinggi logam berat dan trace dioksin. Di Indonesia, fly ash PLTSA tetap wajib dikelola sebagai limbah B3 berdasarkan PermenLHK P.26/2020.

Pengujian	Standar Metode	Konsentrasi Tipikal (MSWI fly ash)	Status Regulasi Indonesia
TCLP	EPA Method 1311	Cd melampaui batas 67% sampel; Pb 53%	Wajib, klasifikasi B3
Total Logam Berat	EPA 6010D, 6020B	Zn: 5.000–37.383 mg/kg; Pb: 1.000–5.000 mg/kg	Wajib sebelum disposal
Merkuri Total	EPA 7471B / 7473	Hg: 1–100 mg/kg	Wajib, B3

Pengujian	Standar Metode	Konsentrasi Tipikal (MSWI fly ash)	Status Regulasi Indonesia
Dioksin/Furan (PCDD/F)	EPA Method 8290A (HRGC/HRMS)	Trace levels (ng TEQ/kg)	Wajib, B3; analisis laboratorium terakreditasi
pH	EPA 9045D	pH 10–12,5 (sangat basa)	Informasi hazard
Ukuran Partikel	Laser diffraction	D50 ~15,7 µm	Informasi handling safety

Sumber: Lu et al. (2025), *Fly ash from municipal solid waste incineration: types, composition, and leaching of heavy metals*, ResearchGate; EPA SW-846 Method 8290A; PermenLHK P.26/2020.

4.4 Air Lindi dan Air Proses

Parameter	Metode APHA	Metode EPA	Rentang Tipikal Leachate Bunker
pH	SM 4500-H+ B	EPA 150.2	4,5–8,5
BOD5	SM 5210B	EPA 405.1	500–20.000 mg/L
COD	SM 5220 C/D	EPA 410.4	2.000–60.000 mg/L
TSS	SM 2540 D	EPA 160.2	100–10.000 mg/L
Ammonia (NH3-N)	SM 4500-NH3	EPA 350.1	100–3.100 mg/L
Klorida	SM 4500-Cl-	EPA 9212	1.000–10.000 mg/L
Logam berat (multi)	SM 3120B / 3125B	EPA 200.7 / 200.8	Bervariasi per elemen
Merkuri	SM 3112	EPA 245.1	0,001–0,05 mg/L

Baku mutu air limbah mengacu pada PermenLHK P.16/2019. APHA *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, Edisi ke-24 (2023). EU IED Annex VI Part 5 menetapkan batas untuk air limbah FGC: TSS 30 mg/L, Hg 0,03 mg/L.

Bab 5: Kerangka Regulasi Indonesia — Perpres 109/2025 dan Implikasinya

5.1 Perubahan Struktural dari Perpres 35/2018 ke Perpres 109/2025

Perpres No. 109 Tahun 2025 yang ditandatangani Presiden Prabowo pada 10 Oktober 2025 secara fundamental mengubah arsitektur kelembagaan dan komersial pembangunan PLTSA di Indonesia — mengatasi hambatan struktural yang menyebabkan kegagalan proyek-proyek sebelumnya, termasuk ITF Sunter Jakarta (dibatalkan 2023 karena tipping fee Rp 476 miliar/tahun yang tidak terjangkau APBD DKI).

Aspek	Perpres 35/2018	Perpres 109/2025	Implikasi
Tarif listrik	USD 0,1335/kWh	USD 0,20/kWh (seluruh kapasitas)	Peningkatan bankability signifikan
Tipping fee	Wajib, dibayar APBD	Dihapus	Menyelesaikan masalah utama Benowo dan Sunter
Tenor PPA	Tidak spesifik	30 tahun	Kepastian jangka panjang untuk lender
Koordinator	Pemerintah daerah	BPI Danantara	Sentralisasi, mengurangi risiko politik daerah
AMDAL	Proses standar	Auto-approval 2 bulan	Percepatan perizinan
Dispatch PLN	Tidak diatur	Prioritas dispatch (Pasal 19 ayat 7)	Kepastian revenue

!!RISIKO RESIDUAL PERPRES 109/2025

Penghapusan tipping fee menyelesaikan satu hambatan besar, tetapi menciptakan konsentrasi risiko pada satu revenue stream (tarif PLN). Jika PLN gagal memenuhi kewajiban dispatch-prioritas, atau jika tarif tidak diindeks dengan benar terhadap inflasi dan nilai tukar, DSCR proyek akan terdegradasi. Mekanisme kompensasi PLN (Pasal 20) dan format standar PPA masih dalam penyusunan regulasi turunan per Maret 2026. Ini harus dipantau ketat dalam persiapan AMDAL dan financial close.

5.2 Baku Mutu Emisi yang Berlaku

Regulasi	Cakupan	Status	Link/Referensi
PermenLHK P.70/2016	Baku mutu emisi pengolahan sampah termal	Berlaku	peraturan.bpk.go.id/Home/Details/168715
PermenLHK P.15/2019 Lampiran VII	Baku mutu emisi PLTSA (identik dengan P.70)	Berlaku	allin.or.id/permenlhk-no15-2019
PP No. 22/2021	Perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup	Berlaku	JDIH BPK RI

Regulasi	Cakupan	Status	Link/Referensi
PermenLHK P.26/2020	Pengelolaan fly ash dan bottom ash dari pengolahan sampah termal	Berlaku	KLHK.go.id
PermenLHK No. 13/2021	Kewajiban CEMS untuk pembangkit ≥ 25 MW	Berlaku	KLHK.go.id
EU IED 2010/75/EU + WI BREF 2019	Referensi internasional (design target)	Referensi teknis	eur-lex.europa.eu; eippcb.jrc.ec.europa.eu

5.3 Rangkaian Perizinan Komprehensif

Fase	Dokumen/Izin	Instansi	Catatan Kritis
Pra-pengembangan	KKPR (Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang)	ATR/BPN via OSS	Wajib sebelum AMDAL
Pra-pengembangan	AMDAL + Persetujuan Lingkungan	KLHK / DLH Provinsi	Auto-approval 2 bulan (Perpres 109/2025)
Pra-pengembangan	Pertek Baku Mutu Emisi	KLHK	Berdasarkan P.70/2016
Pra-konstruksi	PBG (Persetujuan Bangunan Gedung)	Pemda via OSS	Menggantikan IMB lama
Pra-konstruksi	Pertek Pengelolaan Limbah B3 (fly ash)	KLHK	Wajib sebelum operasi
Pra-konstruksi	PPA dengan PLN	PT PLN / KESDM	Pasal 19 (7): 10 hari kerja setelah izin pra-konstruksi
Operasional	IUPTL (Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik)	KESDM	Efektif sejak PPA ditandatangani
Operasional	Izin Pengelolaan Limbah B3	KLHK	Fly ash = B3 wajib izin
Operasional	Instalasi dan sertifikasi CEMS	KLHK	Wajib untuk PLTSa ≥ 25 MW
Operasional	SLO (Surat Layak Operasi)	KESDM	Setelah performance test

Bab 6: Referensi Internasional — EU BREF, IFC Standards, dan Benchmarking

6.1 EU Waste Incineration BREF 2019 sebagai Benchmark Global

Commission Implementing Decision (EU) 2019/2010 menetapkan BAT Conclusions yang mengikat secara hukum, berdasarkan data operasional dari 355 lini insinerasi di Eropa. Dokumen lengkap BREF tersedia di <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu> (JRC118637, 850+ halaman).

6.2 IFC Environmental Health and Safety Guidelines — Relevansi untuk AMDAL

IFC EHS Guidelines for Waste Management Facilities (2007) menetapkan standar emisi dan persyaratan tata kelola yang menjadi acuan lembaga pembiayaan internasional. PLTSA Benowo gagal memenuhi hampir seluruh persyaratan IFC EHS — termasuk emisi atmosfer, pengelolaan residu berbahaya, keterlibatan komunitas, dan monitoring independen.

Kategori IFC EHS	Persyaratan	Status PLTSA Benowo	Implikasi untuk Proyek Baru
Emisi atmosfer	SO ₂ , NO _x , PM, HCl, CO, VOC dengan batas spesifik	Parsial — data stack tidak transparan	CEMS wajib + pelaporan publik dari COD
Kualitas air limbah	BOD, COD, TSS, logam berat dengan batas spesifik	Tidak diketahui — monitoring tidak dipublikasi	Program monitoring air wajib dan terbuka
Pengelolaan residu	Klasifikasi B3, metode disposal terverifikasi	Defisien — tidak ada bukti secured landfill	Kontrak secured landfill B3 sebelum COD
Keterlibatan komunitas	Konsultasi rutin, mekanisme pengaduan	Defisien — AMDAL tidak publik	Komite monitoring komunitas dengan Perkada
Monitoring lingkungan	Pengujian rutin, verifikasi pihak ketiga	Defisien — tidak ada verifikasi independen	Third-party verification tahunan wajib
Rencana dekomisioning	Plan untuk penutupan dan remediasi	Tidak terdokumentasi publik	Wajib dalam RKL-RPL

Sumber: IFC Environmental, Health and Safety Guidelines for Waste Management Facilities, 2007. Tersedia di: ifc.org/ehsguidelines

6.3 Performa Aktual Plant Internasional

Fasilitas / Negara	Kapasitas	Dioksin terukur	PM terukur	Catatan
PLTSA Brescia, Italia	~750.000 ton/tahun	0,002 ng TEQ/Nm ³	<5 mg/Nm ³	50× di bawah batas EU IED
Rata-rata 35 plant Korea Selatan (2019)	Bervariasi	0,005 ng TEQ/Nm ³	5,4 mg/m ³	NO _x 136,9; CO 11,9 mg/m ³

Fasilitas / Negara	Kapasitas	Dioksin terukur	PM terukur	Catatan
PLTSA Benowo (Indonesia, aktual)	1.600 ton/hari (nominal)	Tidak dipublikasi	>100 µg/m ³ (ambient PM2.5)	667% di atas pedoman WHO
Target EU BAT-AEL 2019 (new plants)	—	0,01–0,04 ng TEQ/Nm ³	2–5 mg/Nm ³	Design target yang direkomendasikan

6.4 Lesson Learned Komparatif: WtE di Negara Berkembang

Faktor Keberhasilan	Uruguay	China	Korea Selatan	PLTSA Benowo
PPA jangka panjang yang mengikat	Terbatas	Ya (government-backed)	Ya	Tidak
Kontrak pasokan sampah terindeks	Terbatas	Ya (jangka panjang)	Ya	Ad-hoc
Pemanfaatan panas (CHP)	Tidak	Ya (industrial heat)	Sebagian	Tidak
Komitmen subsidi pemerintah jangka panjang	Terbatas waktu	Kebijakan jangka panjang	Stabil	Ad-hoc, dipangkas 2024
Teknologi proven secara lokal	Tidak	Ya	Ya	Tidak (first-of-a-kind)
Monitoring lingkungan independen	Ya	Ya	Ya	Defisien
Jumlah faktor terpenuhi (dari 6)	2	5–6	5–6	0–1

Sumber: World Bank (2011, 2019); Chen, Wang & Zhang (2024), *Renewable Energy* 215; Hadianto & Willyanto (2025).

!!TEMUAN KRITIS: PLTSA Benowo memenuhi paling banyak 1 dari 6 faktor keberhasilan WtE di negara berkembang. Proyek baru di Indonesia harus memastikan minimal 4–5 faktor terpenuhi sebelum financial close. Ini harus menjadi bagian dari checklist verifikasi dalam proses AMDAL dan perizinan.

Bab 7: Rekomendasi Strategis untuk Persiapan AMDAL dan Perizinan

7.1 Lima Prinsip Desain Proyek yang Tidak Dapat Dikompromikan

Berdasarkan sintesis lesson learned PLTSA Benowo, analisis regulasi terkini, dan benchmarking internasional, lima prinsip berikut harus menjadi landasan non-negotiable dalam setiap proyek PLTSA insinerasi baru di Indonesia.

Prinsip 1: Teknologi yang Terbukti untuk MSW Tropis

Moving grate incineration dari vendor dengan minimal dua reference plant beroperasi pada MSW dengan kadar air >45% harus dipersyaratkan dalam dokumen pengadaan. Reference plant visit sebagai bagian dari due diligence teknis harus dilakukan oleh tim independen sebelum pemilihan teknologi difinalisasi. Gasifikasi tanpa pre-treatment intensif tidak direkomendasikan untuk mixed MSW Indonesia berdasarkan bukti operasional Benowo.

Prinsip 2: Struktur Kontrak yang Mengikat Hukum

PPA dengan PLN harus mencantumkan: tarif USD 0,20/kWh yang diindeks terhadap USD/IDR dan inflasi, dispatch-prioritas yang dapat ditegakkan, tenor 30 tahun, dan klausul kompensasi jika PLN gagal off-take. Perjanjian dengan BPI Danantara terkait pasokan sampah minimum harus binding dan mencakup mekanisme penalty. Tidak boleh ada ketergantungan pada kebijakan anggaran tahunan untuk komponen revenue utama.

Prinsip 3: Sistem APC yang Melampaui Persyaratan Minimum Regulasi

Design target sistem pengendalian pencemaran udara harus mengacu pada EU BAT-AEL 2019, bukan PermenLHK P.70/2016. Minimum: baghouse filter dengan ACI untuk dioksin/merkuri, semi-dry atau wet scrubber untuk gas asam, dan SNCR untuk NOx. CEMS real-time harus dipasang untuk seluruh parameter wajib dengan data terbuka publik sejak hari pertama operasi.

Prinsip 4: Transparansi Lingkungan sebagai Kewajiban Kontraktual

AMDAL, seluruh laporan RKL-RPL, data CEMS, laporan karakterisasi residu, dan laporan kesehatan tahunan harus dapat diakses publik tanpa batasan. Komite Pemantauan Komunitas dengan komposisi multi-stakeholder harus dibentuk sebelum COD dengan mandat formal dalam Peraturan Kepala Daerah. Third-party verification oleh lembaga independen terakreditasi harus dilakukan minimal satu kali per tahun.

Prinsip 5: Stress-Test Finansial yang Konservatif

Feasibility study harus memodelkan skenario stres: OPEX +50% dari baseline, availability 65% (bukan 90%), dan revenue -20% akibat gangguan PLN. DSCR minimum 1,25x harus dipertahankan bahkan dalam skenario stres. Contingency reserve minimal 20% CAPEX harus ditetapkan dalam struktur pembiayaan. Tidak boleh ada ketergantungan pada satu sumber subsidi tanpa backup.

7.2 Checklist Verifikasi Pre-AMDAL

Domain	Item Verifikasi	Status Wajib/Anjuran
Teknis	Studi karakterisasi sampah minimal 12 bulan (proximate, ultimate, LHV)	Wajib
Teknis	Reference plant visit untuk teknologi yang dipilih	Wajib
Teknis	Desain APC mengacu EU BAT-AEL sebagai target	Anjuran Kuat
Teknis	Spesifikasi CEMS mencakup semua parameter P.70/2016 + HF, logam berat	Wajib
Finansial	Stress-test DSCR dengan OPEX +50%, availability 65%	Wajib
Finansial	PPA draft diverifikasi oleh legal counsel independen	Wajib
Finansial	Contingency reserve 20% CAPEX dalam struktur pembiayaan	Anjuran Kuat
Lingkungan	Rencana pengelolaan fly ash B3 dengan kontrak secured landfill	Wajib
Lingkungan	Program monitoring kualitas udara ambien pre-operasi (baseline)	Wajib
Sosial	Pembentukan Komite Pemantauan Komunitas sebelum COD	Anjuran Kuat
Kebijakan	Konfirmasi status regulasi turunan Perpres 109/2025 (mekanisme PLN)	Wajib
Kebijakan	Verifikasi auto-approval AMDAL berlaku untuk lokasi spesifik proyek	Wajib

Daftar Referensi

1. Hadiano, R., & Willyanto, S. (2025). Analisis Komprehensif Penyebab Kegagalan Operasional dan Finansial Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Benowo Surabaya. White Paper. Universitas Indonesia / ITB, Desember 2025.
2. Perpres No. 109 Tahun 2025 tentang Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolahan Sampah menjadi Energi Listrik. Jakarta: Sekretariat Negara.
3. European Commission. (2019). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration (WI BREF). JRC118637. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu>
4. Commission Implementing Decision (EU) 2019/2010 of 12 November 2019 establishing best available techniques (BAT) conclusions for waste incineration. OJ L 312, 3.12.2019.
5. European Parliament. (2010). Directive 2010/75/EU on Industrial Emissions (IED). OJ L 334, 17.12.2010. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj/eng>
6. International Finance Corporation (IFC). (2007). Environmental, Health and Safety Guidelines for Waste Management Facilities. World Bank Group. <https://www.ifc.org/ehsguidelines>
7. World Bank. (2019). PPP Risk Allocation Matrix for Waste-to-Energy Plants. Washington DC: World Bank.
8. Peraturan Menteri LHK No. P.70 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal. Jakarta: KLHK. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/168715>
9. Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Sekretariat Negara.
10. Boumanchar, I., Chhiti, Y., M'hamdi Alaoui, F.E., Sahibed-dine, A., Bentiss, F., Jama, C., & Bensitel, M. (2019). Municipal solid waste higher heating value prediction from ultimate analysis using multiple regression and genetic programming techniques. Waste Management & Research, 37(1). <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X18816797>
11. Purnomo, C.W., et al. (2020). Experimental study on characteristics of municipal solid waste (MSW) in typical cities of Indonesia. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/341875775>
12. Lu, Y., et al. (2025). Fly ash from municipal solid waste incineration: types, composition, and leaching of heavy metals. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/387304776>
13. Chen, L., Wang, Y., & Zhang, M. (2024). Financial performance of integrated waste-to-energy plants in China: integration with industrial heat demand. Renewable Energy, 215, 118–132. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19305859>
14. Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performance of thermal treatment systems for energy recovery from waste. Waste Management, 37, 26–44.
15. WALHI Jawa Timur. (2025). Laporan Monitoring Kualitas Udara PLTSa Benowo, November 2024 – Februari 2025. Surabaya: WALHI.
16. Widowati, E. (2017). Willingness to Pay untuk Layanan Pengelolaan Sampah Perkotaan: Studi di Tiga Kota Indonesia. Jurnal Ekonomi Pembangunan, 25(3), 445–462.
17. APHA. (2023). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 24th Edition. Washington DC: American Public Health Association.
18. UNEP. (2013). Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases, 2nd Edition. Geneva: UNEP. <https://toolkit.pops.int>
19. Supra International. (2025). Indonesia's Waste-to-Energy Update: Danantara's Tender Process, Regulatory Framework, and Business Opportunities. <https://supra-international.com>
20. Ashurst LLP. (2025). Accelerating Waste-to-Energy in Indonesia: PR 109/2025's Impact and Challenges. <https://www.ashurst.com>
21. BOOTEC Group. (2024). Legok Nangka Waste to Energy Infrastructure Project with the West Java Provincial Government. <https://www.bootecgroup.com>

— Dokumen ini disiapkan oleh PT Centra Rekayasa Enviro (CRE), Maret 2026 —
 Direvisi dengan integrasi Lesson Learned PLTSa Benowo (Hadiano & Willyanto, Desember 2025)