

KAJIAN TEKNIS KOMPREHENSIF

DIOKSIN DAN FURAN DARI INSINERATOR SAMPAH DOMESTIK

Realitas, Miskonsepsi, dan Pengendalian Secara Engineering



Disusun oleh	Tim Teknis PT Centra Rekayasa Enviro (CRE)
Kategori	Technical White Paper Environmental Engineering
Tahun	2025
Klasifikasi	Dokumen Teknis Publik

1. EXECUTIVE SUMMARY

Posisi Utama Kajian Ini: "Dioksin dan furan adalah polutan nyata dan tidak boleh diabaikan. Namun pada insinerator modern yang dirancang dan dioperasikan dengan benar, risikonya sangat kecil, terukur, dan terkendali secara engineering."

Isu dioksin dari insinerator sampah domestik adalah salah satu topik yang paling sering muncul dalam debat publik mengenai teknologi pengolahan sampah di Indonesia. Namun, debat tersebut sebagian besar dibangun di atas narasi yang bersumber dari data insinerator generasi lama (pre-1990), dan tidak mempertimbangkan kemajuan fundamental dalam teknologi pengendalian emisi selama tiga dekade terakhir.

Kajian ini disusun untuk memberikan landasan ilmiah dan teknis yang komprehensif, dengan tiga tujuan utama:

- Menguji secara objektif apakah isu dioksin dari insinerator masih relevan dalam konteks teknologi modern
- Menyajikan data emisi global dan standar regulasi internasional yang aktual
- Menyusun narasi berbasis engineering yang akurat, proporsional, dan dapat dipertanggungjawabkan

Kesimpulan Utama

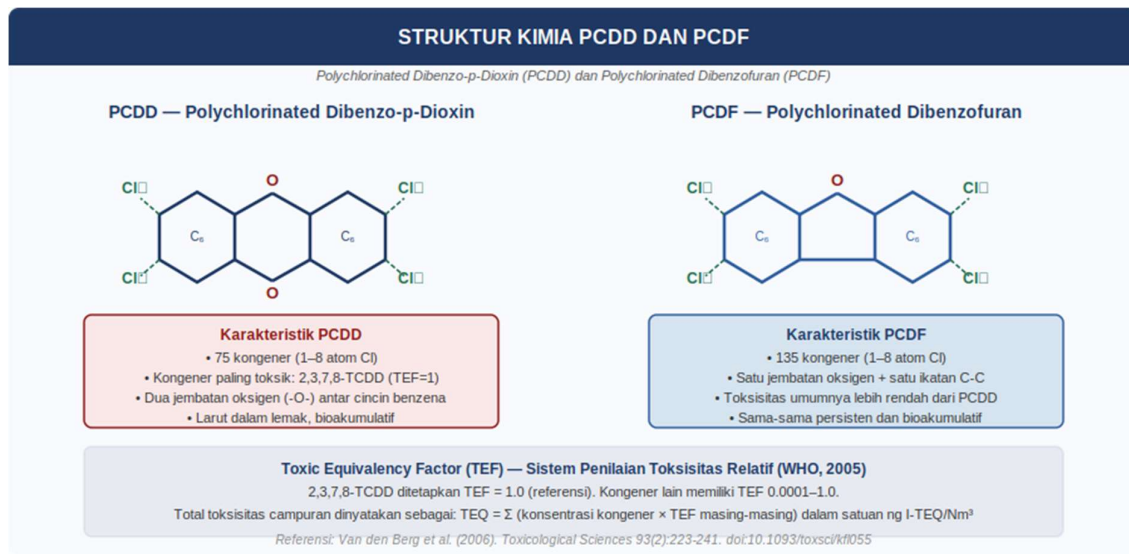
No.	Pernyataan Utama	Status Ilmiah
1	Dioksin memang terbentuk dalam proses pembakaran sampah	Terkonfirmasi
2	Insinerator modern dengan APCS lengkap dapat menurunkan emisi dioksin hingga 99%+	Terkonfirmasi
3	Emisi dioksin insinerator modern jauh di bawah baku mutu EU (0.1 ng TEQ/Nm ³)	Terkonfirmasi
4	Open burning menghasilkan dioksin 100-1000x lebih besar dari insinerator modern	Terkonfirmasi
5	Sebagian besar narasi risiko dioksin masih berbasis data pre-1990	Teridentifikasi
6	Negara maju tetap menggunakan insinerator sebagai solusi utama pengolahan sampah	Terkonfirmasi

2. APA ITU DIOKsin DAN FURAN (PCDD/F)?

2.1 Definisi Ilmiah dan Struktur Kimia

Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) dan polychlorinated dibenzofurans (PCDF) adalah kelompok senyawa organik aromatik terklorinasi yang terbentuk sebagai produk sampingan dari berbagai proses kimia dan pembakaran. Keduanya dikelompokkan bersama dan dikenal luas sebagai "dioksin dan furan" atau PCDD/F.

Secara struktural, terdapat 75 kongener PCDD dan 135 kongener PCDF, namun tidak semuanya memiliki toksisitas yang setara. Toksisitas relatif setiap kongener dinyatakan dalam Toxic Equivalency Factor (TEF) terhadap 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD), yang merupakan kongener paling toksik dan digunakan sebagai referensi (TEF = 1). Konsentrasi dioksin dinyatakan dalam satuan ng TEQ (Toxic Equivalent) per Nm³ udara atau per gram bahan (Van den Berg et al., 2006).

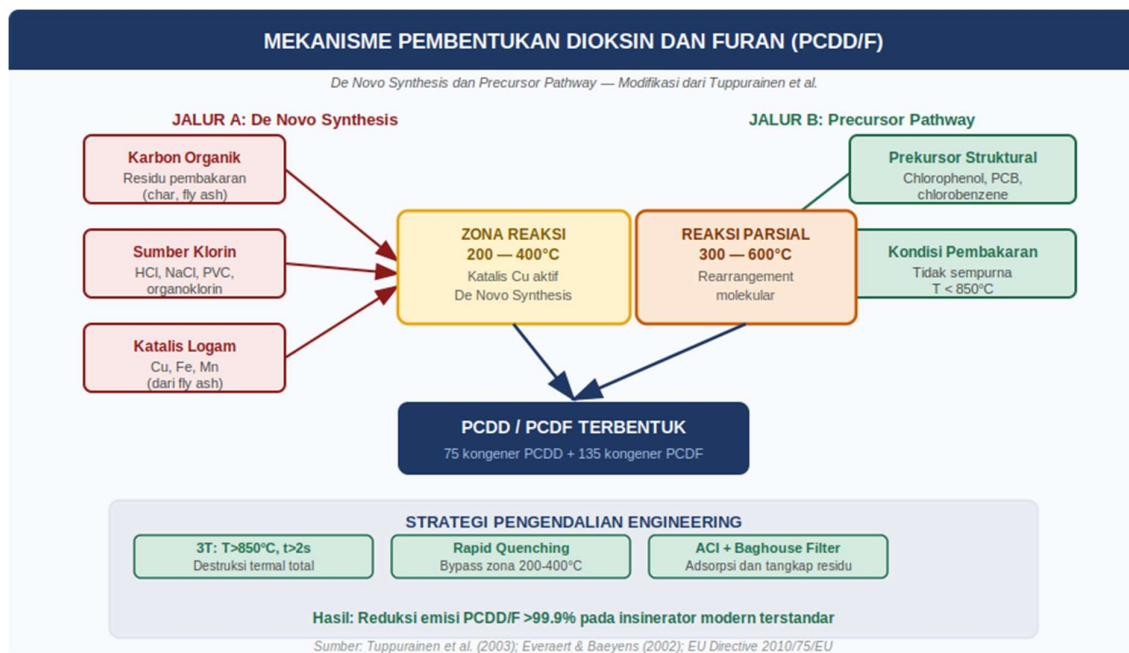


Gambar 1. Struktur Kimia PCDD dan PCDF dengan posisi substitusi atom Klorin (Cl) pada cincin aromatik. Sumber: Van den Berg et al. (2006), *Toxicological Sciences*.

2.2 Mekanisme Pembentukan

Terdapat dua mekanisme utama pembentukan dioksin dalam proses pembakaran:

Mekanisme	De Novo Synthesis	Incomplete Combustion
Definisi	Sintesis baru dari prekursor karbon dan klorin pada suhu 200-400°C dengan katalis logam berat (Cu, Fe)	Pembentukan dari prekursor yang tidak terurai sempurna saat suhu tidak mencapai threshold destruksi
Zona Kritis	200-400°C (zona "window" pembentukan dioksin)	<850°C dengan residence time tidak memadai
Pengendalian	Rapid quenching dari >600°C ke <200°C dalam <1 detik	Suhu >850°C, residence time >2 detik, turbulensi tinggi (3T Principle)



Gambar 2. Mekanisme pembentukan PCDD/F melalui Jalur De Novo Synthesis dan Precursor Pathway, beserta strategi pengendalian engineering. Modifikasi dari Tuppurainen et al. (2003).

3. EVOLUSI TEKNOLOGI INSINERATOR

Pemahaman yang akurat mengenai risiko dioksin dari insinerator tidak dapat dilepaskan dari konteks evolusi teknologinya. Insinerator yang dioperasikan sebelum tahun 1990 memiliki karakteristik yang sangat berbeda dari insinerator modern, dan sebagian besar data negatif dalam literatur publik berasal dari periode tersebut.

Parameter	Insinerator Generasi Lama (Pre-1990)	Insinerator Modern (2000+)
Suhu Pembakaran	<650-800°C (tidak stabil)	>850-1100°C (terkontrol otomatis)
Residence Time	<1 detik (tidak memadai)	>2 detik (di secondary chamber)
Turbulensi	Rendah, tidak terukur	Tinggi, dioptimasi via CFD modeling
Sistem Pendinginan Gas	Tidak ada / konvensional	Rapid quenching (<1 detik melalui zona kritis)
Air Pollution Control	Minimal / tidak ada	APCS lengkap: ESP/baghouse + scrubber + ACI
Monitoring Emisi	Manual / periodik	CEMS (Continuous Emission Monitoring System)
Pengendalian Proses	Manual operator	PLC/DCS otomatis berbasis sensor real-time
Emisi Dioksin Tipikal	1-10 ng TEQ/Nm ³	0.002-0.05 ng TEQ/Nm ³
Standar Acuan	Tidak ada / sangat longgar	EU Directive 2010/75/EU: 0.1 ng TEQ/Nm ³
Pengelolaan Abu	Open disposal	Encapsulated / treated sebelum dibuang

Kunci Pemahaman: Perbedaan antara insinerator pre-1990 dan modern bukan hanya soal perbaikan teknis marginal, tetapi merupakan lompatan teknologi fundamental yang mengubah profil risiko dioksin secara dramatis. Menggunakan data lama untuk menilai teknologi modern adalah pendekatan yang tidak valid secara ilmiah.

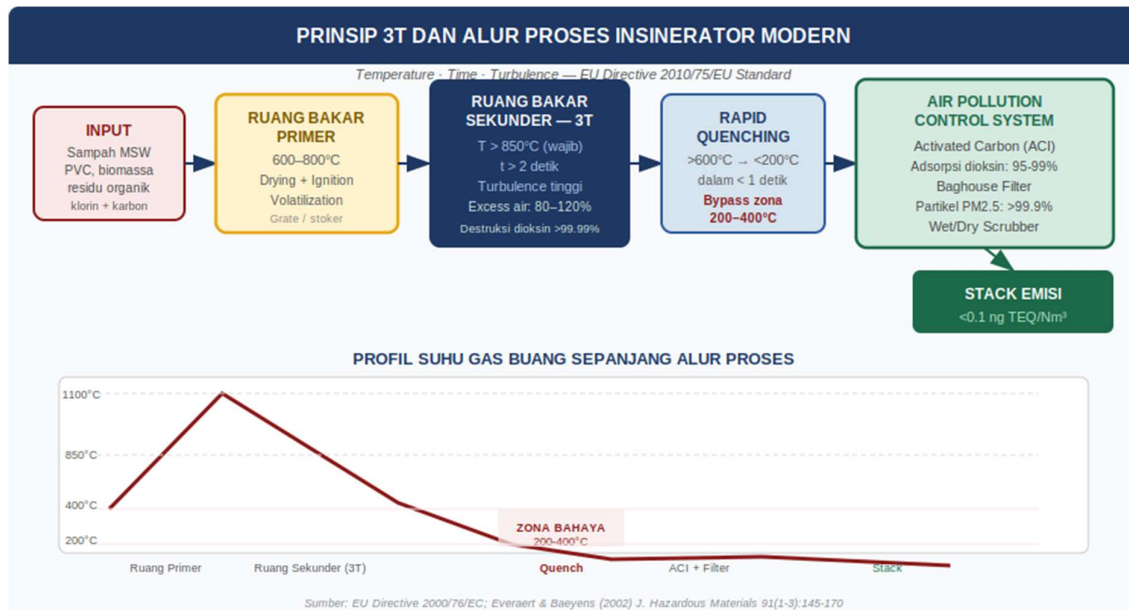
4. ENGINEERING CONTROL UNTUK ELIMINASI DIOKsin

Pengendalian emisi dioksin pada insinerator modern menggunakan pendekatan multi-barrier yang berlapis. Setiap lapisan berkontribusi pada pengurangan konsentrasi dioksin secara signifikan, dan kombinasinya menghasilkan tingkat penurunan yang sangat tinggi.

4.1 Prinsip 3T: Temperature, Time, Turbulence

Prinsip 3T adalah dasar engineering paling fundamental dalam pengendalian dioksin, dan berlaku langsung di ruang pembakaran:

Parameter	Standar Minimum	Fungsi Teknis	Referensi
Temperature (T)	>850°C di secondary chamber	Destruksi termal ikatan C-Cl; dekomposisi sempurna senyawa organik	EU Directive 2000/76/EC
Time (T)	>2 detik residence time pada suhu >850°C	Memastikan reaksi destruksi berlangsung sempurna sebelum gas meninggalkan ruang bakar	EU Directive 2000/76/EC
Turbulence (T)	Excess air 80-120%, mixing baik	Kontak sempurna antara bahan bakar, udara, dan panas; mencegah cold spot	USEPA AP-42, 2000



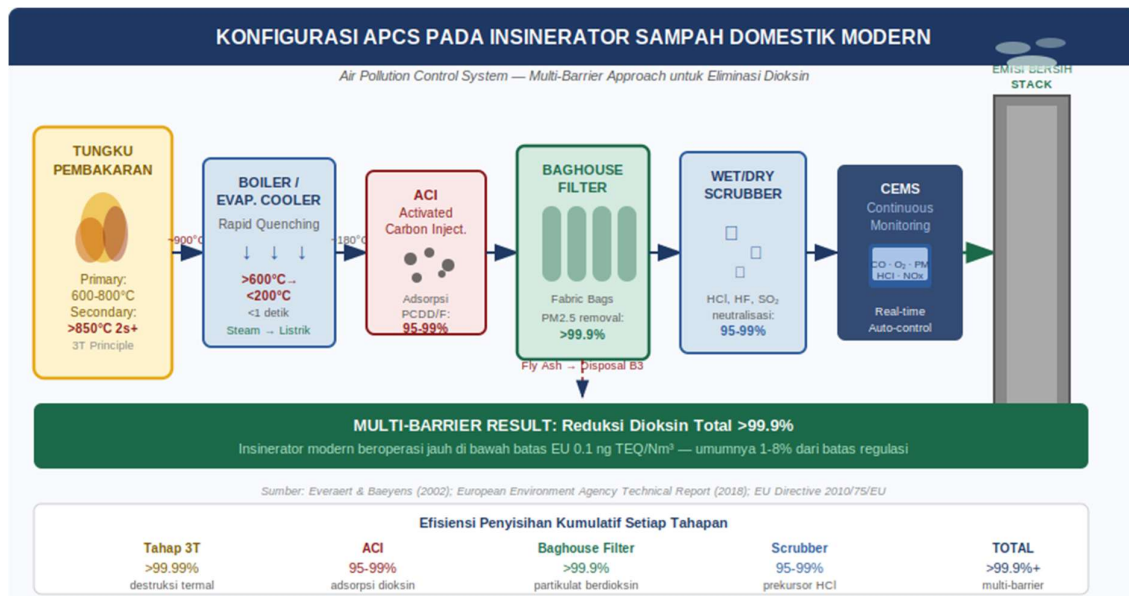
Gambar 3. Prinsip 3T dan Profil Suhu Gas Buang Sepanjang Alur Proses Insinerator Modern. Sumber: EU Directive 2000/76/EC; Everaert & Baeyens (2002).

4.2 Rapid Quenching

Rapid quenching adalah salah satu inovasi terpenting dalam pengendalian de novo synthesis dioksin. Setelah gas meninggalkan ruang pembakaran pada suhu >600°C, gas tersebut harus didinginkan secepat mungkin melewati "zona berbahaya" 200-400°C. Teknologi modern menggunakan evaporative cooler atau waste heat boiler yang menurunkan suhu gas dari >600°C ke <200°C dalam waktu kurang dari 1 detik.

4.3 Konfigurasi APCS Lengkap

Berikut adalah konfigurasi Air Pollution Control System (APCS) yang digunakan pada insinerator modern berstandar internasional:



Gambar 4. Konfigurasi APCS Multi-Barrier pada Insinerator Sampah Domestik Modern: Tungku-Quenching-ACI-Baghouse-Scrubber-CEMS. Sumber: Everaert & Baeyens (2002); EEA (2018).

Teknologi Kontrol	Mekanisme Utama	Efisiensi Penyisihan Dioksin
3T Principle	Destruksi termal di ruang bakar	>99.99% (preventif)
Rapid Quenching	Bypass zona de novo synthesis	>95% (preventif)
Activated Carbon Injection	Adsorpsi dioksin di fase gas	95-99% (removal aktif)
Baghouse Filter	Tangkap partikel berdioksin	>99.9% (removal akhir)
Scrubber	Kurangi prekursor HCl	Sinergistik dengan ACI
CEMS + Auto Control	Stabilisasi parameter operasi	Kualitas jaminan proses

5. DATA EMISI GLOBAL DAN STANDAR REGULASI

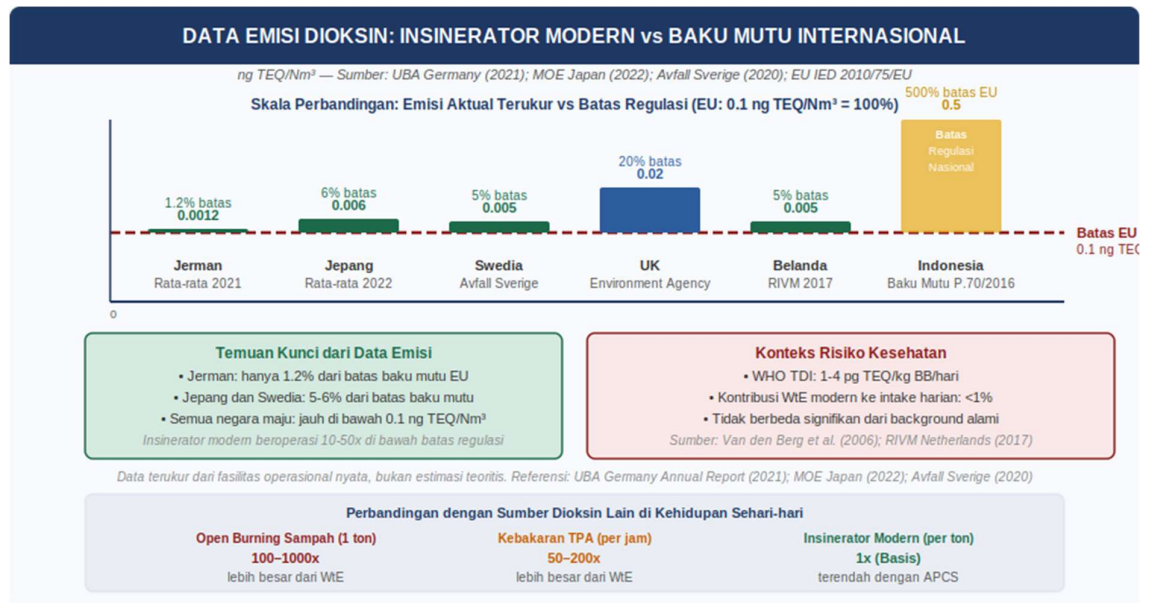
Data emisi dioksin dari insinerator sampah domestik di berbagai negara memberikan gambaran yang konsisten: insinerator modern beroperasi jauh di bawah baku mutu regulasi internasional, bahkan pada negara-negara dengan regulasi paling ketat di dunia.

5.1 Standar Baku Mutu Internasional

Negara/Wilayah	Regulasi	Baku Mutu Dioksin	Keterangan
Uni Eropa	EU Directive 2010/75/EU (IED)	0.1 ng TEQ/Nm ³	Berlaku wajib untuk semua instalasi WtE
Jepang	Air Pollution Control Law (1997)	0.1 ng TEQ/Nm ³	Revisi signifikan pasca skandal dioksin 1990s
Jerman	17. BImSchV (1990, revisi 2003)	0.1 ng TEQ/Nm ³	Salah satu regulasi pertama dan ketat
USA	EPA MACT Standard (1995)	0.40 ng TEQ/Nm ³ (existing)	Standards of Performance 40 CFR Part 60
Korea Selatan	Clean Air Conservation Act	0.1 ng TEQ/Nm ³	Setara standar EU
Indonesia	PerMen LHK P.70/2016	0.5 ng TEQ/Nm ³	Lebih longgar dari EU, tahap perkembangan

5.2 Data Emisi Real dari Insinerator Modern

Lokasi / Studi	Jenis Fasilitas	Emisi Dioksin	Baku Mutu	Rasio
Jerman (rata-rata 2019)	WtE plants nasional	0.0012 ng TEQ/Nm ³	0.1 ng TEQ/Nm ³	1.2% dari batas
Jepang (rata-rata 2018)	Municipal WtE plants	0.006 ng TEQ/Nm ³	0.1 ng TEQ/Nm ³	6% dari batas
Swedia (Studi 2020)	Modern WtE plants	0.002-0.008 ng TEQ/Nm ³	0.1 ng TEQ/Nm ³	2-8% dari batas
UK (Environment Agency)	Modern EfW plants	<0.02 ng TEQ/Nm ³	0.1 ng TEQ/Nm ³	<20% dari batas
Belanda (RIVM, 2017)	AVI plants	0.005 ng TEQ/Nm ³	0.1 ng TEQ/Nm ³	5% dari batas

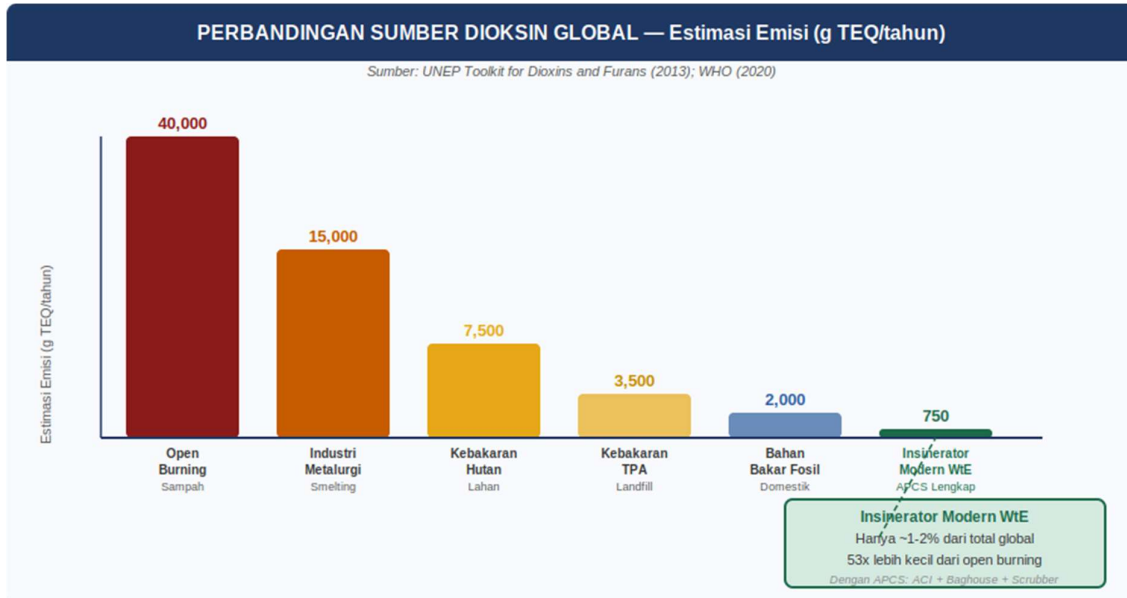


Gambar 5. Perbandingan Emisi Dioksin Aktual Insinerator Modern vs Batas Baku Mutu Internasional (ng TEQ/Nm³).
 Sumber: UBA Germany (2021); MOE Japan (2022); Avfall Sverige (2020).

Temuan Kunci: Insinerator modern di Jerman, Jepang, dan Swedia beroperasi pada 1.2-8% dari batas baku mutu EU. Ini bukan sekadar memenuhi regulasi, tetapi melampaui regulasi dengan margin yang sangat besar. Data ini mencerminkan kemajuan teknologi yang fundamental.

6. PERBANDINGAN SUMBER DIOKSIN GLOBAL

Salah satu distorsi terbesar dalam narasi publik mengenai dioksin dan insinerator adalah kegagalan untuk menempatkan insinerator dalam konteks sumber-sumber dioksin lainnya. Data UNEP menunjukkan gambaran yang sangat berbeda dari asumsi umum.



Gambar 6. Perbandingan Sumber Dioksin Global (g TEQ/tahun). Insinerator modern hanya berkontribusi 1-2% dari total global. Sumber: UNEP Toolkit (2013); WHO (2020).

Sumber Dioksin	Estimasi Emisi Global	Proporsi Global	vs WtE Modern
Pembakaran terbuka (open burning) biomassa dan sampah	30,000-50,000 g TEQ/tahun	~40-60%	Sampai 1000x lebih tinggi per ton
Industri metalurgi (smelting, sintering)	~15,000 g TEQ/tahun	~20%	Variabel, tergantung teknologi
Kebakaran hutan dan lahan	~5,000-10,000 g TEQ/tahun	~10-15%	Tidak terkontrol
Landfill fires (kebakaran TPA)	~2,000-5,000 g TEQ/tahun	~5-8%	Jauh lebih tinggi per ton
Insinerator sampah domestik modern	~500-1,000 g TEQ/tahun (global)	~1-2%	Basis perbandingan (100%)

Paradoks Regulasi: Di Indonesia, ribuan titik pembakaran sampah terbuka terjadi setiap hari tanpa pengawasan, monitoring, atau pengendalian. Emisi dioksin dari aktivitas ini jauh melampaui emisi yang akan dihasilkan oleh insinerator modern berskala kota. Melarang insinerator modern sambil membiarkan open burning adalah kebijakan yang secara ilmiah tidak konsisten.

7. ANALISIS NARASI LSM DAN MEDIA

Kajian ini tidak bertujuan menyerang kelompok masyarakat sipil atau media. Peran LSM dan media dalam mengawasi lingkungan sangat penting dan diperlukan dalam sistem demokrasi. Namun, analisis yang jujur menunjukkan bahwa narasi yang berkembang mengenai dioksin dari insinerator mengandung beberapa kelemahan metodologis yang perlu diidentifikasi.

7.1 Kelemahan Metodologis yang Teridentifikasi

- **Penggunaan Data Historis Tanpa Konteks Teknologi:** Sebagian besar publikasi kritis terhadap insinerator mengacu pada data emisi dari periode 1980-1995. Menggunakan data ini untuk menilai insinerator modern adalah pendekatan yang tidak valid secara ilmiah.
- **Tidak Membedakan Generasi Teknologi:** Banyak publikasi menyebut "insinerator" sebagai kategori tunggal tanpa membedakan antara generasi teknologi yang berbeda. Insinerator tanpa APCS dan insinerator modern dengan APCS lengkap memiliki profil emisi yang berbeda hingga 1000x lipat.
- **Interpretasi Berlebihan atas Prinsip Kehati-hatian:** Prinsip kehati-hatian adalah prinsip yang valid dalam kebijakan lingkungan. Namun, prinsip ini tidak berarti bahwa teknologi yang dapat dikendalikan secara engineering harus dilarang tanpa analisis risiko komparatif yang komprehensif.
- **Absennya Analisis Komparatif:** Hampir semua narasi yang menolak insinerator tidak menyertakan analisis komparatif risiko antara insinerator modern vs. alternatif yang ada (open burning, landfill, open dumping). Ini adalah kelemahan metodologis fundamental dalam analisis risiko.
- **Ketidaktahuan atau Pengabaian Data Terbaru:** Laporan UNEP, EEA, dan berbagai jurnal peer-reviewed yang terbit setelah tahun 2000 secara konsisten menunjukkan profil emisi insinerator modern yang sangat baik. Narasi yang tidak merujuk literatur terbaru kehilangan kredibilitas ilmiah.

Rekomendasi: Meningkatkan transparansi data monitoring emisi secara real-time (open data) adalah respons engineering dan governance yang paling efektif untuk menjawab narasi yang tidak berbasis data. Publik yang memiliki akses ke data nyata dapat membuat penilaian yang lebih akurat.

8. RISK ASSESSMENT YANG REALISTIS

8.1 Exposure Pathway

Jalur Paparan	Mekanisme	Signifikansi WtE Modern	Kontrol Engineering
Inhalasi langsung	Menghirup emisi stack yang terdispersi	Sangat rendah	Stack height, dispersion modeling
Deposisi ke tanah	Partikel jatuh ke lahan pertanian	Rendah	Pemilihan lokasi, buffer zone
Rantai makanan	Bioakumulasi tanaman-hewan-manusia	Perlu dipantau	Monitoring periodik tanah dan vegetasi
Paparan abu (fly ash)	Kontak dengan abu berdioksin	Dapat dikendalikan	Enkapsulasi dan disposal B3

8.2 Gap antara Theoretical Risk dan Actual Controlled System

Parameter	Skenario Theoretical Risk (Basis Narasi Lama)	Skenario Actual Controlled System (Modern)
Emisi dioksin	10 ng TEQ/Nm ³ (insinerator pre-1990)	0.005-0.02 ng TEQ/Nm ³ (modern, terukur)
Konsentrasi ambien	Tinggi, di atas guideline	Di bawah detection limit metode standar
Kontribusi ke TDI	Signifikan, >10% TDI	<1% TDI (studi Belanda, Jerman)
Kesimpulan risiko	Risiko kesehatan nyata dan signifikan	Risiko tidak berbeda signifikan dari background
Dasar analisis	Data 1970-1990, tanpa APCS	Data 2000-2023, APCS modern

9. STUDI KASUS NEGARA MAJU

9.1 Jepang: Transformasi Pascakrisis

Jepang mengalami krisis dioksin yang nyata pada 1990-an, ketika insinerator generasi lama beroperasi tanpa APCS yang memadai. Pemerintah merespons dengan Dioxin Control Law tahun 1999 yang mewajibkan semua insinerator memenuhi baku mutu 0.1 ng TEQ/Nm³. Hasilnya: jumlah insinerator berkurang dari >6,000 unit menjadi sekitar 1,200 unit berteknologi tinggi, dengan emisi dioksin nasional turun lebih dari 99%. Jepang kini memiliki lebih dari 600 fasilitas WtE, banyak di antaranya berlokasi di dalam kawasan perkotaan termasuk Tokyo, Osaka, dan Yokohama (Ministry of the Environment Japan, 2022).

9.2 Jerman: Standar Engineering Global

Jerman mengoperasikan lebih dari 60 fasilitas WtE berkapasitas besar, memproses sekitar 25 juta ton sampah per tahun. Data terbaru dari Umweltbundesamt (2021) menunjukkan emisi dioksin rata-rata dari seluruh fasilitas WtE Jerman berada pada 0.0012 ng TEQ/Nm³, kurang dari 1.5% dari batas baku mutu EU. Jerman, dengan regulasi lingkungan yang sangat ketat dan masyarakat yang sangat kritis terhadap isu lingkungan, tetap menggunakan insinerator sebagai komponen integral dari sistem pengelolaan sampah nasional.

9.3 Swedia: Insinerator di Jantung Kota

Swedia memproses sekitar 50% sampah domestiknya melalui WtE, dan hampir nol persen yang masuk ke landfill. Fasilitas WtE Hogdalen di Stockholm berlokasi di dalam kota dan memasok panas ke jaringan district heating untuk sekitar 100,000 rumah tangga, dengan emisi dioksin secara konsisten berada di bawah 0.01 ng TEQ/Nm³ (Avfall Sverige, 2020).

Indikator	Jepang	Jerman	Swedia
Jumlah fasilitas WtE aktif	~1,200 unit	>60 unit (besar)	~34 unit
Kapasitas pengolahan	>40 juta ton/tahun	~25 juta ton/tahun	~6 juta ton/tahun
Emisi dioksin rata-rata	0.006 ng TEQ/Nm ³	0.0012 ng TEQ/Nm ³	0.002-0.008 ng TEQ/Nm ³
Regulasi nasional	Dioxin Control Law 1999	17. BImSchV 1990	EU IED 2010/75/EU
Pelajaran utama	Krisis → transformasi teknologi total	Regulasi ketat sejak awal	Integrasi WtE ke district heating

10. KONTEKS INDONESIA

Untuk menempatkan isu dioksin dalam konteks Indonesia yang akurat, perlu dipahami bahwa tantangan utama pengelolaan sampah di Indonesia saat ini bukan berasal dari insinerator modern, melainkan dari sistem pengelolaan sampah yang tidak terkontrol.

Sumber Dioksin	Status di Indonesia	Risiko Relatif	Tingkat Pengendalian
Open burning sampah (rumah tangga, industri kecil)	Sangat dominan, setiap hari	Sangat tinggi	Hampir tidak ada
Kebakaran TPA (open dumping)	Regular, terutama musim kemarau	Sangat tinggi	Tidak ada
Industri daur ulang informal	Umum, terutama di perkotaan	Tinggi	Minim
Insinerator modern (WtE terstandar)	Belum ada/sangat terbatas	Sangat rendah	Penuh (APCS lengkap)

Konteks Kritis: Setiap ton sampah yang dibakar secara terbuka menghasilkan dioksin 100-1.000 kali lebih banyak dibanding ton sampah yang sama yang diproses di insinerator modern. Menolak insinerator modern dalam konteks Indonesia di mana open burning adalah praktik dominan adalah pilihan kebijakan yang secara lingkungan kontraproduktif.

11. DEBUNKING 5 MITOS BESAR TENTANG INSINERATOR DAN DIOKSIN

Mitos 1	"Insinerator pasti menghasilkan dioksin dalam jumlah berbahaya"
Fakta	Data operasional dari ratusan fasilitas di Jerman, Jepang, dan Swedia menunjukkan emisi 1-8% dari batas baku mutu EU. Ini jauh di bawah ambang risiko kesehatan yang diakui secara ilmiah.
Referensi	Umweltbundesamt Germany (2021); Ministry of Environment Japan (2022); Avfall Sverige (2020)

Mitos 2	"Tidak ada teknologi yang benar-benar bisa menghilangkan dioksin"
Fakta	Kombinasi 3T principle + rapid quenching + ACI + baghouse filter secara konsisten mampu menurunkan konsentrasi dioksin hingga lebih dari 99.9%. Ini data operasional terukur dari ratusan fasilitas selama lebih dari dua dekade.
Referensi	Everaert & Baeyens (2002), J. Hazardous Materials; European Environment Agency Technical Report (2018)

Mitos 3	"Negara maju sudah meninggalkan insinerator"
Fakta	Jepang: >1,200 fasilitas WtE aktif. Jerman, Prancis, Belanda, Swedia, Denmark, dan Inggris semua mengoperasikan fasilitas WtE dalam jumlah besar dan sedang membangun kapasitas baru. Tidak ada satu pun negara maju yang memiliki kebijakan menutup insinerator modern.
Referensi	ISWA World Congress Report (2023); Eunomia Research & Consulting (2022)

Mitos 4	"Insinerator menghambat daur ulang"
Fakta	Jerman dan Swedia secara bersamaan memiliki tingkat daur ulang tertinggi di Eropa DAN kapasitas WtE yang besar. WtE memproses residu yang tidak dapat didaur ulang secara ekonomis, bukan bersaing dengan material bernilai daur ulang.
Referensi	Eurostat Waste Statistics (2023); European Environment Agency (2022)

Mitos 5	"Abu insinerator adalah limbah B3 yang tidak bisa dikelola"
Fakta	Bottom ash dari insinerator modern telah terbukti dapat digunakan sebagai agregat konstruksi setelah aging dan leaching test. Di Belanda dan Jerman, lebih dari 90% bottom ash dimanfaatkan dalam konstruksi jalan dan sipil.
Referensi	Chimenos et al. (2000), J. Hazardous Materials; VLACO & OVAM Belgium Report (2019)

12. STRATEGIC POSITIONING STATEMENT

Pernyataan Posisi Teknis CRE: Dioksin dan furan adalah polutan nyata yang terbentuk dalam proses pembakaran. Keberadaan mereka tidak boleh diremehkan, diabaikan, atau disangkal. Namun, pada insinerator modern yang dirancang, dibangun, dan dioperasikan sesuai dengan standar teknis internasional — dengan sistem pengendalian emisi lengkap dan monitoring berkelanjutan — risiko dioksin terhadap kesehatan manusia dan lingkungan adalah sangat kecil, terukur, dan terkendali secara engineering. Narasi yang menyamakan insinerator modern dengan insinerator generasi lama tidak valid secara ilmiah, tidak proporsional secara teknis, dan berpotensi kontraproduktif secara kebijakan.

Pilar	Komitmen	Mekanisme
Kejujuran Ilmiah	Mengakui bahwa dioksin adalah polutan nyata dan pembentukan dalam proses pembakaran adalah fenomena yang terdokumentasi baik	Tidak ada klaim zero-risk; semua pernyataan berbasis data terukur
Proporsionalitas Data	Menyajikan data emisi aktual dalam konteks baku mutu internasional dan perbandingan dengan sumber dioksin lainnya	Analisis risiko komparatif, bukan penilaian absolut tanpa konteks
Akuntabilitas Engineering	Mendukung penuh penerapan APCS lengkap, CEMS real-time, inspeksi independen, dan publikasi data monitoring secara terbuka	Transparansi data sebagai mekanisme kepercayaan publik yang konkret

13. KESIMPULAN UTAMA

No.	Kesimpulan	Implikasi Kebijakan
1	Dioksin dan furan adalah polutan nyata yang terbentuk dalam proses pembakaran tidak sempurna dan melalui sintesis de novo pada suhu 200-400°C	Teknologi insinerator harus selalu disertai APCS yang komprehensif dan lengkap
2	Insinerator modern dengan 3T principle + rapid quenching + ACI + baghouse filter mampu menurunkan emisi dioksin hingga >99.9%	Spesifikasi teknis minimum harus diatur dalam regulasi nasional secara ketat
3	Data emisi aktual insinerator modern di Jerman, Jepang, dan Swedia berada pada 1-8% dari batas baku mutu EU	Teknologi modern telah terbukti secara empiris dalam kondisi operasional nyata
4	Open burning adalah sumber dioksin dominan secara global, menghasilkan 100-1000x lebih banyak dioksin per ton material dibanding insinerator modern	Kebijakan yang melarang insinerator modern sambil membiarkan open burning bersifat kontraproduktif secara lingkungan
5	Sebagian besar narasi kritis terhadap insinerator berbasis data pre-1990 yang tidak mencerminkan kemampuan teknologi modern	Debat kebijakan publik harus didasarkan pada data yang aktual dan relevan
6	Insinerator modern bukan hambatan bagi daur ulang, melainkan komplementer untuk mengelola residu yang tidak dapat didaur ulang	Pendekatan hierarki sampah harus dipahami secara komprehensif

Penutup: Insinerator modern, dengan teknologi pengendalian emisi yang telah teruji secara global, adalah solusi yang valid, terukur, dan terkendali untuk mengelola residu sampah yang tidak dapat didaur ulang. Risiko terbesarnya bukan pada teknologinya sendiri, tetapi pada implementasi yang tidak memenuhi standar teknis minimum. Fokus kebijakan yang tepat adalah pada penetapan standar teknis yang ketat, penegakan hukum yang konsisten, dan transparansi data monitoring, bukan pada penolakan terhadap teknologi yang telah terbukti secara global.

14. DAFTAR REFERENSI ILMIAH

Kajian ini disusun berdasarkan literatur ilmiah peer-reviewed, laporan lembaga internasional, dan regulasi teknis yang dapat diakses dan diverifikasi:

1. Van den Berg, M., et al. (2006). *The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-like Compounds*. *Toxicological Sciences*, 93(2), 223-241. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfl055>
2. Everaert, K., & Baeyens, J. (2002). *The formation and emission of dioxins in large scale thermal processes*. *Chemosphere*, 46(3), 439-448. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00143-6](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00143-6)
3. UNEP (2013). *Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional POPs*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/report/toolkit-identification-and-quantification-releases-dioxins-furans-and-other>
4. European Union (2010). *Directive 2010/75/EU on Industrial Emissions (Integrated Pollution Prevention and Control)*. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>
5. Umweltbundesamt (Federal Environment Agency Germany) (2021). *Emissions from Waste Incineration. Annual Report on Air Pollutants*. <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/waste-resources/waste-management/waste-incineration>
6. Ministry of the Environment Japan (2022). *Annual Report on the State of Dioxins Control in Japan*. Ministry of the Environment, Government of Japan. <https://www.env.go.jp/en/chemi/dioxins/dioxins.html>
7. Avfall Sverige (2020). *Swedish Waste Management Report 2020*. Swedish Waste Management Association. <https://www.avfallsverige.se/in-english/>
8. WHO (1998). *Assessment of the health risk of dioxins: re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI)*. World Health Organization. WHO/PCS/98.6.
9. USEPA (2000). *EPA/600/P-03/002F: An Inventory of Sources and Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the United States*. United States Environmental Protection Agency. <https://cfpub.epa.gov/ncea/dioxin/recordisplay.cfm?deid=87843>
10. Chimenos, J.M., et al. (2000). *Study of the characterization and the leachability of bottom ash in municipal solid waste incinerator*. *Journal of Hazardous Materials*, 79(3), 215-229. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00240-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00240-0)
11. European Environment Agency (2022). *Waste incineration in Europe: Trends and impacts*. EEA Technical Report No. 7/2022. <https://www.eea.europa.eu>
12. KLHK (2023). *Laporan Status Lingkungan Hidup Indonesia 2023*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. <https://www.menlhk.go.id>

-
13. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.70/MENLHK/SETJEN/KUM.1/8/2016 tentang Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pengolahan Sampah Secara Termal.
 14. Eunomia Research & Consulting (2022). *The Potential Contribution of Waste Management to a Low Carbon Economy. Report for the European Commission.* <https://www.eunomia.co.uk>
 15. ISWA (International Solid Waste Association) (2023). *World Congress Report: Waste-to-Energy Status and Trends.* <https://www.iswa.org>
-



PT CENTRA REKAYASA ENVIRO (CRE)

Environmental Engineering | Waste Treatment Systems | Indonesia

Dokumen ini adalah kajian teknis yang disusun untuk tujuan edukasi dan advokasi kebijakan berbasis sains.