

# TINJAUAN TEKNOLOGI PRODUKSI METANOL DARI SAMPAH DOMESTIK (*MUNICIPAL SOLID WASTE*): STATUS KEMATANGAN TEKNIS, KELAYAKAN KOMERSIAL, DAN IMPLIKASI BAGI INDONESIA

---

**Penulis:** S. Willyanto, Alumni ITB TK79 – WA no. +62 812-1068-3355

---

**Diterbitkan:** 20 Pebruari 2026

---

## ABSTRAK

Pengelolaan sampah domestik (*municipal solid waste/MSW*) dan transisi energi menuju bahan bakar rendah karbon merupakan dua tantangan besar yang dihadapi secara global, termasuk Indonesia. Teknologi konversi MSW menjadi metanol (*waste-to-methanol/WtM*) menawarkan pendekatan yang mengatasi kedua isu tersebut secara simultan. Artikel ini menyajikan tinjauan komprehensif terhadap status kematangan teknis (*Technology Readiness Level/TRL*) dan kelayakan komersial teknologi WtM berdasarkan analisis terhadap literatur ilmiah, data proyek komersial, dan studi tekno-ekonomi terkini. Dua jalur teknologi utama yang dievaluasi adalah: (1) gasifikasi MSW menghasilkan syngas yang kemudian disintesis menjadi metanol, dan (2) konversi fraksi organik MSW menjadi biogas yang kemudian di-*reform* menjadi metanol. Temuan menunjukkan bahwa secara teknis, teknologi gasifikasi MSW-ke-metanol telah mencapai TRL 7–8 dengan demonstrasi skala komersial oleh Enerkem di Edmonton, Kanada (2014–2024). Namun, fasilitas tersebut ditutup akibat yield produksi yang jauh di bawah target dan masalah finansial. Studi tekno-ekonomi NREL (2023) mengindikasikan harga jual minimum (*minimum selling price/MSP*) metanol dari MSW sebesar US\$0,55/kg – hampir dua kali lipat metanol berbasis gas alam (US\$0,30/kg) — dengan yield 0,48 kg metanol per kg MSW. Di sisi lain, proyek biogas-ke-metanol di Shanghai (beroperasi Desember 2025) dengan kapasitas 100.000 ton/tahun menunjukkan jalur alternatif yang lebih menjanjikan secara ekonomi dengan pengurangan biaya produksi lebih dari 30%. Indonesia, yang menghasilkan 33,8–43,2 juta ton MSW per tahun dengan tingkat pengelolaan hanya 32%, memiliki potensi besar untuk mengadopsi teknologi ini, terutama didukung oleh Peraturan Presiden No. 109/2025 yang memperluas cakupan *waste-to-energy* ke bahan bakar terbarukan. Namun, tantangan berupa heterogenitas sampah, kebutuhan investasi tinggi (>€800 juta untuk skala 240.000 ton metanol/tahun), dan keterbatasan infrastruktur *pre-treatment* masih menjadi hambatan signifikan.

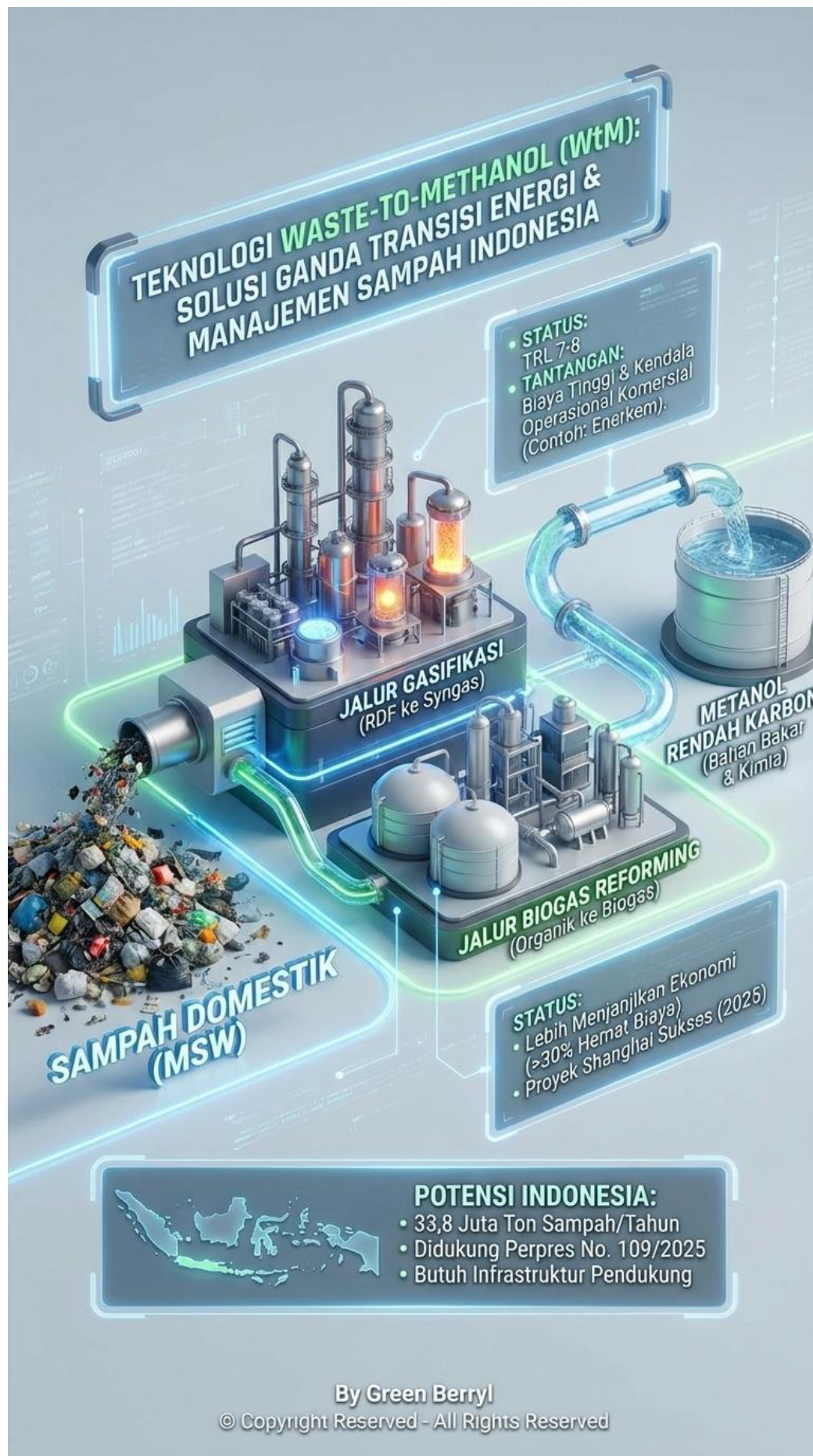
**Kata Kunci:** sampah domestik; metanol; gasifikasi; waste-to-methanol; teknologi konversi sampah; analisis tekno-ekonomi

---

## ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) management and the energy transition toward low-carbon fuels are two major global challenges, including for Indonesia. Waste-to-methanol (WtM) technology offers an approach that simultaneously addresses both issues. This article presents a comprehensive review of the technical maturity (Technology Readiness Level/TRL) and commercial viability of WtM technology based on analysis of scientific literature, commercial project data, and recent techno-economic studies. Two primary technological pathways are evaluated: (1) MSW gasification producing syngas subsequently synthesized into methanol, and (2) conversion of the organic fraction of MSW into biogas subsequently reformed into methanol. Findings indicate that technically, MSW-to-methanol gasification technology has reached TRL 7–8 with commercial-scale demonstration by Enerkem in Edmonton, Canada (2014–2024). However, the facility was retired due to production yields far below targets and financial difficulties. The NREL techno-economic study (2023) indicates a minimum selling price (MSP) of MSW-derived methanol at US\$0.55/kg – *nearlytwicethatofnaturalgas – basedmethanol(US\$0.30/kg)*—with a yield of 0.48 kg methanol per kg MSW. Meanwhile, a biogas-to-methanol project in Shanghai (operational December 2025) with a capacity of 100,000 tons/year demonstrates a more economically promising alternative pathway with production cost reductions exceeding 30%. Indonesia, generating 33.8–43.2 million tons of MSW annually with only 32% managed, has significant potential for adopting this technology, particularly supported by Presidential Regulation No. 109/2025 expanding waste-to-energy scope to renewable fuels. However, challenges including waste heterogeneity, high capital requirements (>€800 million for 240,000 tons methanol/year scale), and limited pre-treatment infrastructure remain significant barriers.

**Keywords:** municipal solid waste; methanol; gasification; waste-to-methanol; waste conversion technology; techno-economic analysis



# 1. PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pengelolaan sampah domestik (*municipal solid waste/MSW*) merupakan salah satu tantangan terbesar dalam pembangunan berkelanjutan, terutama di negara berkembang dengan urbanisasi tinggi. Data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) menunjukkan bahwa Indonesia menghasilkan 33,79 juta ton sampah pada tahun 2024, dan angka ini bahkan mencapai 43,23 juta ton pada 2023—tertinggi dalam enam tahun terakhir (SIPSN, 2025). Dari total timbulan tersebut, sekitar 50,8% bersumber dari rumah tangga, dengan komposisi terbesar berupa sampah makanan (39,36%), plastik (19,64%), kayu/ranting (12,62%), dan kertas/karton (11,16%) (KLHK, 2025). Yang lebih mengkhawatirkan, Kementerian Lingkungan Hidup menyatakan bahwa berdasarkan verifikasi di seluruh Tempat Pembuangan Akhir (TPA) nasional, hanya 9–10% sampah yang benar-benar terkelola dengan baik (Nurofiq, 2025), dan kapasitas TPA diproyeksikan akan jenuh pada tahun 2028 (Rohmatullah, 2025).

Di sisi lain, permintaan global terhadap metanol—bahan kimia dasar yang digunakan sebagai bahan baku industri kimia, bahan bakar transportasi, dan pelarut—terus meningkat. Menurut International Renewable Energy Agency (IRENA) dan Methanol Institute, permintaan metanol global diproyeksikan tumbuh lima kali lipat hingga 2050, didorong oleh penggunaan metanol terbarukan dalam pelayaran (*maritime*), transportasi darat, penerbangan, dan aplikasi kimia (Repsol, 2025). Regulasi internasional seperti FuelEU Maritime dan International Maritime Organization (IMO) menetapkan target pengurangan intensitas karbon energi dalam transportasi maritim sebesar 40% pada 2030 dan 75% pada 2050, menjadikan metanol hijau sebagai kandidat utama pengganti bahan bakar fosil konvensional.

Konvergensi antara krisis pengelolaan sampah dan kebutuhan metanol rendah karbon memunculkan konsep *waste-to-methanol* (WtM)—suatu pendekatan yang mengubah sampah domestik menjadi metanol, sekaligus mengurangi volume sampah ke TPA dan menghasilkan produk bernilai ekonomi tinggi (Green Network Asia, 2026). Konsep ini pada dasarnya mengintegrasikan dua rantai teknologi yang sudah mapan secara individual—konversi termokimia sampah dan sintesis metanol katalitik—namun integrasinya pada skala komersial masih menjadi tantangan besar.

## 1.2 Rumusan Masalah

Meskipun konsep WtM telah dikembangkan sejak lebih dari dua dekade, pertanyaan fundamental mengenai apakah teknologi ini sudah *proven* secara komersial masih diperdebatkan. Beberapa proyek telah dibangun dan beroperasi, namun tidak semua mencapai keberhasilan yang diharapkan. Oleh karena itu, artikel ini berupaya menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

1. Sejauh mana tingkat kematangan teknis (TRL) teknologi konversi MSW menjadi metanol?
2. Bagaimana performa tekno-ekonomi dari proyek-proyek WtM yang sudah beroperasi maupun yang sedang dalam pengembangan?
3. Jalur teknologi mana yang paling menjanjikan untuk diterapkan?
4. Bagaimana implikasi dan peluang penerapan teknologi WtM di Indonesia?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi dan mengevaluasi jalur-jalur teknologi utama konversi MSW menjadi metanol; (2) menganalisis status kematangan teknis dan kelayakan komersial berdasarkan data proyek aktual dan studi teko-ekonomi; (3) memetakan tantangan teknis, ekonomi, dan regulasi; serta (4) merumuskan rekomendasi strategis untuk penerapan teknologi WtM di Indonesia.

### 1.4 Kebaruan (*Novelty*)

Berbeda dari tinjauan literatur sebelumnya yang umumnya berfokus pada aspek teknis gasifikasi atau sintesis metanol secara terpisah, artikel ini menyajikan tinjauan integratif yang mencakup: (a) evaluasi kritis terhadap proyek-proyek WtM terkini termasuk yang gagal (Enerkem Edmonton) dan yang berhasil (Shanghai biogas-to-methanol); (b) perbandingan jalur gasifikasi langsung versus biogas-reforming berdasarkan data aktual 2024–2026; dan (c) kontekstualisasi terhadap kondisi persampahan dan regulasi Indonesia terbaru (PP No. 109/2025).

---

---

## 2. KAJIAN PUSTAKA

### 2.1 Metanol: Sifat, Kegunaan, dan Pasar Global

Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) adalah alkohol paling sederhana dengan titik didih  $64,7^\circ\text{C}$ , densitas  $0,791 \text{ g/cm}^3$ , dan nilai kalor bawah (*lower heating value/LHV*) sekitar  $19,9 \text{ MJ/kg}$ . Secara global, produksi metanol mencapai 110 juta metrik ton per tahun (MMT/tahun) (Beckham et al., 2023), dengan mayoritas ( $>60\%$ ) diproduksi dari gas alam melalui *steam methane reforming* (SMR) dan sebagian signifikan dari gasifikasi batu bara, terutama di Tiongkok. Metanol digunakan sebagai bahan baku produksi formaldehida, asam asetat, metil tert-butyl eter (MTBE), dimetil eter (DME), olefin, dan berbagai produk kimia lainnya (Curcio, 2024).

Dalam konteks transisi energi, metanol menarik perhatian sebagai bahan bakar alternatif karena: (a) berwujud cair pada kondisi ambient sehingga mudah disimpan dan didistribusikan; (b) dapat digunakan langsung dalam mesin pembakaran internal dengan modifikasi minimal; (c) menghasilkan emisi  $\text{NO}_x$  dan partikulat lebih rendah dibanding bahan bakar fosil konvensional; dan (d) dapat diproduksi dari sumber karbon terbarukan (Johnson Matthey, 2025).

### 2.2 Sampah Domestik (MSW) sebagai Bahan Baku

MSW terdiri dari fraksi organik (sampah makanan, limbah taman), kertas/karton, plastik, logam, kaca, tekstil, dan material lainnya. Karakterisasi MSW sebagai bahan baku gasifikasi menunjukkan komposisi tipikal (basis kering): C 38,8–44,3%, H 6,9–7,4%, O 28,9–37,1%, N 0,5%, S 0,3%, dan abu 14,5–18,3%, dengan LCV 20,8–25,3 MJ/kg (Afzal et al., 2023). Perbedaan mendasar antara MSW dan bahan baku konvensional (gas alam, batu bara) terletak pada:

- **Heterogenitas tinggi:** Komposisi MSW bervariasi secara signifikan antar wilayah, musim, dan tingkat pendapatan masyarakat
- **Kandungan oksigen tinggi (25–40%):** Menghasilkan konsentrasi  $\text{CO}_2$  tinggi (30–41%) dalam syngas, memerlukan unit pemisahan  $\text{CO}_2$  tambahan
- **Kandungan abu tinggi ( $>15\%$ ):** Menghasilkan residu padat yang memerlukan penanganan dan pembuangan
- **Kontaminan beragam:** Mengandung sulfur, halida, logam berat, dan tar yang meracuni katalis

Persiapan bahan baku (*feedstock preparation*) menjadi tahap kritis, meliputi: penyortiran (pemisahan logam, kaca, material non-gasifiable), pencacahan (*shredding*), pengeringan, dan homogenisasi. Material yang telah dipreparasi umumnya disebut *Refuse-Derived Fuel* (RDF) dalam bentuk pelet berukuran 2–5 cm (Curcio, 2024).

## 2.3 Jalur Teknologi Konversi MSW ke Metanol

Berdasarkan tinjauan literatur, terdapat tiga jalur utama konversi MSW menjadi metanol:

### 2.3.1 Jalur Gasifikasi Langsung

Jalur ini melibatkan gasifikasi RDF pada suhu 600–1000°C dengan agen gasifikasi (uap air, oksigen, atau kombinasinya) untuk menghasilkan syngas ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), yang kemudian dimurnikan dan dikonversi menjadi metanol melalui katalis. Tahapan proses meliputi: (a) gasifikasi → (b) pembersihan gas (*tar removal*, desulfurisasi, pemisahan partikulat) → (c) pengkondisian syngas (*water-gas shift*, pemisahan  $\text{CO}_2$ ) → (d) sintesis metanol pada 80 bar dan 220°C dengan katalis berbasis Cu-Zn-Al → (e) distilasi (Afzal et al., 2023; Curcio, 2024). Tipe gasifier yang umum digunakan meliputi *fixed/moving bed*, *bubbling fluidized bed* (BFB), *circulating fluidized bed* (CFB), dan *entrained flow*. Gasifier tipe *fluidized bed* lebih disukai untuk MSW karena keseragaman pencampuran, inersia termal tinggi, dan konversi karbon yang lebih baik (Curcio, 2024).

### 2.3.2 Jalur Biogas-Reforming

Fraksi organik MSW (sampah makanan, limbah taman) difermentasi secara anaerobik dalam biodigester menghasilkan biogas dengan komposisi tipikal ~70%  $\text{CH}_4$  dan ~30%  $\text{CO}_2$ . Biogas kemudian dimurnikan dan di-*reform* (steam reforming atau dry reforming) untuk menghasilkan syngas, yang selanjutnya disintesis menjadi metanol. Keunggulan jalur ini adalah feedstock lebih homogen dibanding RDF, sehingga permasalahan pembersihan gas lebih sederhana. Inovasi terbaru berupa teknologi BESTm (*Biogas Energy Science and Technology to Methanol*) dari East China University of Science and Technology mampu mengkonversi kedua komponen biogas ( $\text{CH}_4$  dan  $\text{CO}_2$ ) menjadi metanol tanpa membuang fraksi  $\text{CO}_2$ , sehingga mencapai konversi karbon penuh (*full-carbon conversion*) (Chen et al., 2026).

### 2.3.3 Jalur Carbon Capture and Utilization (CCU)

$\text{CO}_2$  dari gas buang insinerasi sampah ditangkap (*carbon capture*) dan dikombinasikan dengan hidrogen hijau (dari elektrolisis air menggunakan energi terbarukan) untuk menghasilkan metanol melalui reaksi  $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ . JFE Engineering dan Mitsubishi Gas Chemical berhasil mendemonstrasikan jalur ini di Jepang, mengkonfirmasi bahwa  $\text{CO}_2$  dari gas buang insinerasi sampah dapat dikonversi menjadi metanol dengan tingkat kemurnian  $\text{CO}_2$  tangkapan >99,5% dan tingkat pemulihan >90% (JFE Engineering, 2022). Jalur ini memiliki keunggulan berupa produk metanol dengan intensitas karbon sangat rendah (*green methanol*), namun memerlukan suplai hidrogen hijau dalam jumlah besar dan biaya elektroliser yang masih tinggi.

## 2.4 Penelitian Terdahulu

Sejumlah studi telah menganalisis kelayakan tekno-ekonomi konversi MSW ke metanol. Afzal et al. (2023) dalam studi NREL melakukan TEA dan LCA untuk jalur gasifikasi MSW dan *mixed plastic waste* (MPW), menemukan MSP metanol dari MSW sebesar US\$0,55/kg dengan yield 0,48 kg/kg. Sun et al. (2022) mengusulkan tiga sistem MtM dan menunjukkan bahwa sistem MSW-ke-metanol dengan *carbon capture and storage* (MTMC) memiliki emisi CO<sub>2</sub> paling rendah. Eisavi et al. (2022) mengusulkan sistem produksi metanol mendekati nol emisi CO<sub>2</sub> yang mengintegrasikan berbagai komponen dengan potensi produksi 393 ton metanol dari 179 ton CH<sub>4</sub>. Namun, evaluasi kritis terhadap kinerja aktual proyek komersial WtM masih sangat terbatas dalam literatur.

---

## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *systematic literature review* (SLR) yang dikombinasikan dengan analisis data sekunder dari proyek komersial dan pra-komersial WtM di seluruh dunia. Pendekatan ini dipilih karena kesesuaiannya untuk memetakan dan mengevaluasi status teknologi yang masih dalam tahap awal komersialisasi.

### 3.2 Sumber Data

Data dikumpulkan dari empat kategori sumber:

1. **Basis data ilmiah:** Artikel peer-reviewed dari ScienceDirect, Scopus, dan Google Scholar menggunakan kata kunci “municipal solid waste” AND “methanol” AND (“gasification” OR “waste-to-methanol”) dengan rentang publikasi 2018–2026
2. **Laporan teknis:** Studi tekno-ekonomi dari National Renewable Energy Laboratory (NREL), IEA Bioenergy, dan International Renewable Energy Agency (IRENA)
3. **Data proyek komersial:** Informasi publik dari pengembang proyek (Enerkem, GIDARA Energy, Repsol, NextChem/MyRechemical, JFE Engineering), termasuk press release, laporan tahunan, dan dokumen insolvabilitas
4. **Data regulasi dan statistik Indonesia:** Peraturan Presiden No. 109/2025, data SIPSN-KLHK, dan laporan Bappenas

### 3.3 Kriteria Seleksi

Dari total 127 artikel yang ditemukan pada pencarian awal, 42 artikel diseleksi berdasarkan kriteria inklusi: (a) membahas konversi MSW (bukan biomassa murni atau batu bara) ke metanol; (b) menyajikan data teknis kuantitatif (yield, efisiensi, biaya); (c) dipublikasikan dalam jurnal terindeks Scopus/WoS atau laporan dari institusi terakreditasi; dan (d) berbahasa Inggris atau Indonesia.

### 3.4 Kerangka Analisis

Evaluasi dilakukan menggunakan dua kerangka utama:

1. **Technology Readiness Level (TRL):** Skala 1–9 yang dikembangkan NASA dan diadopsi secara luas, di mana TRL 1–3 = riset dasar, TRL 4–6 = pengembangan teknologi, TRL 7–8 = demonstrasi, dan TRL 9 = operasional komersial penuh
  2. **Analisis Tekno-Ekonomi Komparatif:** Membandingkan parameter kunci antar proyek meliputi kapasitas input/output, yield produksi, CAPEX, OPEX, MSP, dan proyeksi pengurangan emisi
-

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemetaan Proyek WtM Global

Tabel 1 menyajikan ringkasan proyek-proyek WtM utama yang telah atau sedang dikembangkan secara global hingga Februari 2026.

**Tabel 1.** Proyek-Proyek *Waste-to-Methanol* Utama di Dunia (Per Februari 2026)

No	Proyek	Lokasi	Teknologi	Kapasitas Input (ton MSW/tahun)	Output Metanol (ton/tahun)	Status	Tahun
1	Enerkem Alberta Biofuels	Edmonton, Kanada	Gasifikasi fluidized bed	~100.000	38.000 (desain)	<b>Ditutup</b>	2014–2024
2	Varenes Carbon Recycling	Québec, Kanada	Gasifikasi Enerkem	200.000	125.000	Dalam konstruksi ; <b>perlindungan kreditur (CCAA)</b>	2023–*
3	Ecoplanta	Tarragona, Spanyol	Gasifikasi Enerkem + katalis Clariant	400.000	240.000	Dalam konstruksi (FID Jan 2025)	Target 2029
4	Advanced Methanol Amsterdam (AMA)	Amsterdam, Belanda	Gasifikasi HTW® 2.0	~360.000	90.000	Izin lingkungan diperoleh (2023); konstruksi	*
5	Advanced Methanol Rotterdam (AMR)	Rotterdam, Belanda	Gasifikasi HTW® 2.0	~360.000	90.000	Tahap pengembangan	*
6	NextChem/MyRechemical Empoli	Empoli, Italia	Oksidasi parsial + JM katalis	256.000	125.000	Tahap engineering	*

No	Proyek	Lokasi	Teknologi	Kapasitas Input (ton MSW/tahun)	Output Metanol (ton/tahun)	Status	Tahun
7	Shanghai Biogas-to-Methanol	Shanghai, Tiongkok	BESTm (biogas reforming)	~800.000 (sampah makanan basah)	100.000	<b>Beroperasi komersial</b> (Des 2025)	2025
8	JFE-MGC CCU Demo	Tokyo, Jepang	CCU (CO <sub>2</sub> tangkapan + H <sub>2</sub> hijau)	N/A (dari gas buang insinerator)	Skala demo	Demonstrasi berhasil	2022

Sumber: Disintesis dari berbagai sumber (Enerkem, 2024; Repsol, 2025; GIDARA Energy, 2023; NextChem, 2022; Shanghai Municipal Gov., 2026; JFE Engineering, 2022)

## 4.2 Evaluasi Kritis Proyek-Proyek Kunci

### 4.2.1 Enerkem Edmonton: Pelajaran dari Kegagalan Komersial Pertama

Fasilitas Enerkem Alberta Biofuels (EAB) di Edmonton merupakan pabrik WtM skala komersial pertama di dunia, diresmikan pada 2014 dengan investasi yang didukung oleh kota Edmonton dalam perjanjian 25 tahun. Fasilitas ini dirancang untuk memproses fraksi non-recyclable MSW dari kota Edmonton menjadi metanol, yang kemudian dikonversi menjadi etanol.

#### Kinerja aktual vs. target:

Parameter	Target Desain	Realisasi Aktual
Produksi biofuel/tahun	36–38 juta liter	Total kumulatif ~5 juta liter (selama ~9 tahun)
Durasi operasi	25 tahun (2014–2039)	~10 tahun (2014–2024)
Kontinuitas produksi	Operasi kontinu	Intermiten, sering <i>shutdown</i>

Pada Januari 2024, Enerkem mengumumkan pensiun (*retirement*) fasilitas EAB, menyatakan bahwa tujuan utama—mendemonstrasikan teknologi pada skala komersial—telah tercapai (Enerkem, 2024). Namun, dari perspektif komersial, fasilitas ini gagal total: produksi aktual hanya sekitar 1,4% dari proyeksi kumulatif, dan perjanjian 25 tahun diputus 11 tahun lebih awal (CBC News, 2024).

Analisis penyebab kegagalan mengidentifikasi beberapa faktor:

1. **Heterogenitas feedstock:** MSW dari kota Edmonton sangat bervariasi komposisinya antar musim dan batch, menyebabkan ketidakstabilan kondisi gasifikasi
2. **Kontaminan dalam syngas:** Tingginya pengotor (tar, sulfur, halida) dalam syngas dari MSW memerlukan sistem pembersihan yang lebih ekstensif dari perkiraan semula
3. **Masalah *scale-up*:** Transisi dari skala pilot ke skala komersial mengungkapkan permasalahan teknis yang tidak teridentifikasi pada tahap sebelumnya
4. **Beban finansial:** Biaya operasional dan pemeliharaan yang tinggi tidak diimbangi dengan pendapatan dari produksi yang minim

Implikasi lebih lanjut dari kegagalan ini tercermin pada nasib perusahaan Enerkem secara keseluruhan. Proyek besar berikutnya—Varenes Carbon Recycling (VCR) di Québec, dengan investasi CAD \$875 juta yang didukung Shell, Suncor, dan Proman—mengalami pembengkakan biaya signifikan. VCR masuk perlindungan kreditur (CCAA) pada Maret 2025, dan Enerkem sendiri menyusul pada Mei 2025 dengan total liabilitas ~CAD \$432 juta (Deloitte, 2025). Proses restrukturisasi saat ini berlangsung melalui mekanisme *stalking horse* SISP.

#### 4.2.2 *Ecoplanta Tarragona: Proyek FOAK Terbesar di Eropa*

Meskipun Enerkem mengalami kebangkrutan, teknologi gasifikasinya tetap diadopsi untuk proyek *Ecoplanta*—fasilitas WtM pertama skala komersial di Eropa. Repsol, yang menjadi pemegang saham Enerkem pada 2022, mengambil alih kepemimpinan proyek dan mengamankan hak atas teknologi gasifikasi tersebut.

*Ecoplanta* merepresentasikan pendekatan yang lebih matang dan di-*de-risk* secara komprehensif dibandingkan Edmonton, dengan beberapa keunggulan strategis:

- **Integrasi vertikal:** Repsol berperan sebagai produsen sekaligus *offtaker*, mengurangi risiko pemasaran
- **Lokasi strategis:** Terintegrasi dengan kompleks industri petrokimia Repsol di Tarragona, memungkinkan sinergi energi, utilitas, dan logistik
- **Dukungan pendanaan publik:** Memperoleh €106 juta dari EU Innovation Fund dari lebih dari 300 proyek yang diajukan
- **Teknologi katalis terbukti:** Menggunakan katalis MegaMax™ dari Clariant untuk sintesis metanol, yang telah dioptimalkan untuk syngas dari MSW dengan kandungan pengotor lebih tinggi

Estimasi pengurangan emisi adalah 3,4 juta ton CO<sub>2</sub>-eq dalam 10 tahun pertama operasi, dengan target operasional pada 2029 (Repsol, 2025; Clariant, 2025; Mission Possible Partnership, 2025).

#### 4.2.3 GIDARA Energy: Platform Teknologi HTW® 2.0

GIDARA Energy menggunakan teknologi gasifikasi *High-Temperature Winkler* (HTW®) yang memiliki rekam jejak operasional lebih panjang dibanding teknologi Enerkem, dengan 4 fasilitas sebelumnya yang telah menggunakan HTW® untuk produksi syngas bersih dari berbagai bahan baku. Dua proyek utama GIDARA—Advanced Methanol Amsterdam (AMA) dan Advanced Methanol Rotterdam (AMR)—masing-masing menargetkan produksi 90.000 ton metanol/tahun dari sampah non-recyclable.

AMA memperoleh izin lingkungan pada Mei 2023 dari Port of Amsterdam, namun jadwal konstruksi dan operasional telah mengalami penundaan dari target awal (2025). Keunggulan GIDARA terletak pada *proven track record* teknologi HTW® dan kedekatan dengan infrastruktur permintaan (pelabuhan Amsterdam/Rotterdam yang membutuhkan metanol untuk *maritime fuel*).

#### 4.2.4 Shanghai Biogas-to-Methanol: Terobosan dari Jalur Alternatif

Proyek di Shanghai Chemical Industry Park, Jinshan—beroperasi komersial sejak 29 Desember 2025—merepresentasikan paradigma berbeda dari proyek-proyek gasifikasi di atas. Dengan kapasitas 100.000 ton metanol hijau per tahun, fasilitas ini merupakan yang terbesar di dunia dalam memproduksi metanol dari sampah makanan perkotaan (Shanghai Municipal Government, 2026).

Aspek teknis yang menonjol:

- **Teknologi BESTm:** Dikembangkan oleh Prof. Chen De dari East China University of Science and Technology, mengintegrasikan *electric-driven biogas mixed reforming*, sintesis metanol hijau, distilasi *coupled heat pump*, dan optimasi integrasi termal
- **Konversi karbon penuh:** Mengkonversi baik fraksi CH<sub>4</sub> maupun CO<sub>2</sub> dalam biogas menjadi metanol, menghindari pelepasan CO<sub>2</sub> ke atmosfer
- **Rasio konversi:** ~8 ton sampah makanan basah menghasilkan 1 ton metanol hijau
- **Pengurangan biaya:** Menurunkan biaya produksi >30% dibanding jalur konvensional; pada harga listrik 0,1–0,2 yuan/kWh, mendekati biaya metanol berbasis batu bara
- **Sertifikasi:** Telah memperoleh ISCC EU dan ISCC PLUS, membuka akses ke pasar Eropa

Keberhasilan proyek ini mengindikasikan bahwa jalur biogas-reforming dari fraksi organik MSW—yang memiliki feedstock lebih homogen—mungkin lebih layak secara teknis dan ekonomis dibanding gasifikasi langsung seluruh MSW (Biofuels Digest, 2026; China Daily, 2026).

### 4.3 Analisis Tekno-Ekonomi Komparatif

Studi NREL (Afzal et al., 2023) menyediakan kerangka analisis tekno-ekonomi yang komprehensif untuk membandingkan jalur gasifikasi MSW dan *mixed plastic waste* (MPW). Tabel 2 merangkum hasil utama.

**Tabel 2.** Perbandingan Parameter Tekno-Ekonomi Jalur Gasifikasi MSW vs. MPW ke Metanol (Basis: 240 MT/hari)

Parameter	MSW-Metanol	MPW-Metanol	Metanol Konvensional (Gas Alam)
Yield (kg metanol/kg feedstock)	0,48	1,47	N/A
Produksi metanol (MT/hari)	114,5	353,8	N/A
Total Capital Investment (juta US\$)	79	149	N/A
OPEX tahunan (juta US\$)	11	62	N/A
MSP metanol (US\$/kg)	0,55	0,70	~0,30
Emisi CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /kg metanol)	1,7 (tanpa kredit landfill); -0,9 (dengan kredit)	1,1	~0,5
Rasio H <sub>2</sub> /CO syngas pada outlet gasifier	0,6	2,1	N/A
Konsentrasi CO <sub>2</sub> dalam syngas	30–41%	~5%	N/A

Sumber: Diadaptasi dari Afzal et al. (2023)

Temuan kunci dari analisis ini:

- Yield MSW jauh lebih rendah:** 0,48 kg/kg vs. 1,47 kg/kg untuk MPW, karena MSW memiliki kandungan karbon rendah (44% vs. 86%), oksigen tinggi (29% vs. <0,01%), dan abu tinggi (18% vs. <0,1%)
- MSP MSW-metanol masih ~2× metanol fosil:** Meskipun biaya feedstock MSW diasumsikan nol (bahkan bisa mendapat *tipping fee*), biaya kapital dan operasional unit tambahan (pemisahan CO<sub>2</sub>, penanganan abu, desulfurisasi bulk) mendorong MSP tetap tinggi
- Variabel paling berpengaruh:** Yield syngas dan harga feedstock merupakan dua faktor yang paling mempengaruhi MSP; peningkatan yield syngas memberikan dampak terbesar terhadap penurunan MSP
- CAPEX MSW lebih rendah:** Meskipun yield lebih rendah, TCI jalur MSW (US79M) lebih rendah dari MPW (US149M) karena tidak memerlukan *indirect gasification* dan biaya feedstock nol menurunkan OPEX secara drastis

#### 4.4 Perbandingan Jalur Teknologi

Berdasarkan evaluasi proyek dan studi tekno-ekonomi, Tabel 3 merangkum perbandingan ketiga jalur teknologi utama.

**Tabel 3.** Perbandingan Jalur Teknologi WtM

Aspek	Gasifikasi Langsung MSW	Biogas-Reforming (OFMSW)	CCU (CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> Hijau)
TRL	7–8	8–9	6–7
Feedstock	RDF (semua fraksi non-recyclable)	Fraksi organik (sampah makanan)	CO <sub>2</sub> dari insinerator + H <sub>2</sub> hijau
Yield metanol	0,40–0,50 kg/kg MSW	~0,125 kg/kg sampah basah	Bergantung pada suplai H <sub>2</sub>
Keunggulan utama	Memproses fraksi heterogen; volume besar	Feedstock homogen; biaya lebih rendah; teknologi lebih matang	Intensitas karbon sangat rendah
Kelemahan utama	CAPEX sangat tinggi; gas cleaning kompleks; belum proven komersial	Hanya untuk fraksi organik; memerlukan sortasi	Sangat bergantung pada harga H <sub>2</sub> hijau; memerlukan insinerator eksisting
Proyek rujukan	Enerkem, Ecoplanta, GIDARA	Shanghai BESTm	JFE-MGC (Jepang)
Estimasi CAPEX	>€800 juta (240 kt/tahun output)	Lebih rendah (data spesifik terbatas)	Tinggi (dominasi biaya elektroliser)

#### 4.5 Implikasi dan Peluang untuk Indonesia

##### 4.5.1 Konteks Persampahan Indonesia

Indonesia menghadapi krisis persampahan yang akut. Data SIPSN 2024 menunjukkan timbulan 33,79 juta ton (dari 311 kab/kota; angka riil kemungkinan lebih tinggi karena 203 kab/kota belum tercakup), dengan hanya 32,36% terkelola—terdiri dari 1,35% melalui pengurangan dan 31,01% melalui penanganan (SIPSN, 2025). Emisi metana dari sektor persampahan Indonesia mencapai 26 Mt CO<sub>2</sub>-eq/tahun pada 2022, dengan 83% berasal dari lokasi pembuangan yang tidak terkelola (Republic of Indonesia, 2024).

Komposisi MSW Indonesia—didominasi sampah makanan (39,36%) dan plastik (19,64%)—sebenarnya kompatibel dengan kedua jalur WtM: fraksi organik untuk jalur biogas-reforming, dan fraksi non-recyclable (plastik, kertas kotor, tekstil) untuk jalur gasifikasi.

#### 4.5.2 Kerangka Regulasi

Peraturan Presiden No. 109/2025 tentang Penanganan Sampah Perkotaan melalui Pengolahan Sampah menjadi Energi Terbarukan Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan merepresentasikan pergeseran signifikan dari regulasi sebelumnya (PP No. 35/2018 yang hanya fokus pada PLTSa/listrik). PP 109/2025 memperluas cakupan konversi sampah ke bioenergi, bahan bakar terbarukan (*renewable fuel*), dan produk sampingan lainnya—yang secara eksplisit membuka peluang untuk proyek WtM.

Namun, ketentuan teknis spesifik untuk konversi sampah ke bahan bakar terbarukan (termasuk metanol) masih akan ditetapkan lebih lanjut oleh Menteri ESDM, sehingga masih terdapat ketidakpastian regulasi. Selain itu, PP 109/2025 mensyaratkan jaminan pasokan sampah minimal 1.000 ton/hari sepanjang masa operasional, penyediaan lahan oleh pemerintah daerah, dan alokasi anggaran dari APBD—syarat yang menuntut komitmen kuat pemerintah daerah.

#### 4.5.3 Rekomendasi Strategis

Berdasarkan temuan analisis, direkomendasikan pendekatan bertahap (*phased approach*) untuk penerapan WtM di Indonesia:

##### **Fase 1 (2026–2029): Proyek Percontohan Biogas-to-Methanol**

- Prioritaskan jalur biogas-reforming dari sampah makanan, mereplikasi model Shanghai
- Lokasi ideal: kota-kota besar dengan TPA yang mendekati kapasitas penuh dan potensi pasokan sampah organik tinggi (Jakarta, Surabaya, Bandung, Semarang)
- Kapasitas awal: 10.000–30.000 ton metanol/tahun
- Estimasi investasi: US\$50–100 juta (berdasarkan skalasi proporsional dari proyek Shanghai)

##### **Fase 2 (2029–2035): Scale-up dan Integrasi**

- Berdasarkan pelajaran dari Fase 1, evaluasi kelayakan gasifikasi RDF untuk fraksi non-recyclable
- Integrasikan dengan infrastruktur pelabuhan untuk memenuhi permintaan metanol maritim (mendukung target FuelEU Maritime)
- Kembangkan rantai pasokan RDF melalui penguatan sistem sortasi di TPA

##### **Fase 3 (2035+): Komersialisasi Penuh**

- Pabrik WtM skala penuh (>100.000 ton/tahun) yang mengintegrasikan jalur gasifikasi dan biogas-reforming
- Eksplorasi jalur CCU jika biaya hidrogen hijau mencapai kompetitif (<US\$2/kg)

#### 4.6 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan: (1) data kinerja aktual dari proyek-proyek yang sedang beroperasi (khususnya Shanghai) masih terbatas dan belum dipublikasikan dalam jurnal peer-reviewed; (2) analisis tekno-ekonomi berbasis simulasi (NREL) menggunakan asumsi harga dan kondisi operasional AS yang mungkin tidak langsung berlaku untuk konteks Indonesia; (3) aspek sosial seperti penerimaan masyarakat dan ketersediaan SDM terampil belum dieksplorasi secara mendalam; dan (4) evaluasi komparatif dengan alternatif pengolahan sampah lainnya (insinerasi, pirolisis, composting) berada di luar cakupan penelitian ini.

---

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan komprehensif terhadap status kematangan teknis dan kelayakan komersial teknologi konversi sampah domestik (MSW) menjadi metanol, dapat disimpulkan bahwa:

1. **Secara teknis, teknologi WtM telah proven pada TRL 7–8.** Gasifikasi MSW menjadi syngas dan sintesis syngas menjadi metanol merupakan dua tahapan yang masing-masing sudah mapan. Integrasinya telah didemonstrasikan pada skala komersial (Enerkem Edmonton), mengkonfirmasi kelayakan teknis proses end-to-end.
  2. **Secara komersial, belum ada fasilitas WtM gasifikasi yang beroperasi secara menguntungkan dan berkelanjutan hingga Februari 2026.** Fasilitas perintis Enerkem di Edmonton hanya memproduksi ~1,4% dari target kumulatifnya dan ditutup setelah 10 tahun. Perusahaan pengembangnya kemudian masuk perlindungan kreditur. MSP metanol dari MSW ( $US0,55/kg$ ) masih hampir  $2 \times$  lipat metanol fosil ( $US0,30/kg$ ).
  3. **Jalur biogas-reforming menunjukkan prospek lebih menjanjikan** dalam jangka pendek-menengah, sebagaimana dibuktikan oleh keberhasilan operasional proyek Shanghai (100.000 ton/tahun) yang mampu menekan biaya produksi >30% dengan feedstock lebih homogen.
  4. **Indonesia memiliki potensi besar** untuk mengadopsi teknologi WtM mengingat volume MSW yang masif (33–43 juta ton/tahun), tingkat pengelolaan yang masih sangat rendah (9–32%), dominasi fraksi organik (39,4%) yang cocok untuk jalur biogas-reforming, dan dukungan regulasi baru (PP 109/2025). Namun, diperlukan pendekatan bertahap yang dimulai dari jalur biogas-reforming sebelum menuju gasifikasi skala penuh, dengan investasi dalam infrastruktur pre-treatment dan sortasi sampah sebagai prasyarat fundamental.
  5. **Proyek Ecoplanta (Spanyol, target 2029) akan menjadi indikator krusial** bagi masa depan WtM gasifikasi komersial. Keberhasilan atau kegagalannya akan menentukan arah perkembangan industri WtM secara global.
-

## DAFTAR PUSTAKA

- Afzal, S., Singh, A., Nicholson, S.R., Uekert, T., DesVeaux, J.S., Tan, E.C.D., Dutta, A., Carpenter, A.C., Baldwin, R.M., & Beckham, G.T. (2023). Techno-economic analysis and life cycle assessment of mixed plastic waste gasification for production of methanol and hydrogen. *Green Chemistry*, 25, 5068–5085. <https://doi.org/10.1039/d3gc00679d>
- Biofuels Digest. (2026, February 10). Shanghai researchers turn food waste into marine-grade green methanol. *Biofuels Digest*. Retrieved from <https://biofuelsdigest.com>
- CBC News. (2024, January 31). Waste-to-ethanol biofuels plant in Edmonton closes 11 years ahead of schedule. *CBC News*. Retrieved from <https://www.cbc.ca/news>
- Chen, D. et al. (2026). Breakthrough technology for directional full-carbon conversion from biogas into green methanol. *China Daily*, February 2, 2026.
- Clariant. (2025, November 10). Clariant catalysts will power the Ecoplanta: Europe's first waste-to-methanol plant [Press release]. Retrieved from <https://www.clariant.com>
- Curcio, E. (2024). Methanol production from Municipal Solid Waste. In *Blend Tiger Technical Report*. Blend Tiger LLC.
- Deloitte. (2025). Enerkem Inc. et al., CCAA – Proposed Monitor's Report. *Insolvencies Deloitte Canada*. Retrieved from <https://www.insolvencies.deloitte.ca>
- Eisavi, B., Nami, H., Ranjbar, F., & Salehi, G. (2022). A novel near-zero CO<sub>2</sub>-emission system for methanol production integrating several components. *Energy Conversion and Management*, 258, 115503.
- Enerkem. (2024, January 30). Enerkem to retire its Edmonton Biofuels Facility [Press release]. Retrieved from <https://enerkem.com>
- GIDARA Energy. (2023). Advanced Methanol Amsterdam: A more sustainable fuel industry. Retrieved from <https://www.gidara-energy.com>
- Green Network Asia. (2026, January 14). Waste-to-Methanol, a potential sustainable solution for waste and energy. *Green Network Asia*. Retrieved from <https://greennetwork.asia>
- JFE Engineering & Mitsubishi Gas Chemical. (2022, March 31). Japan's first successful production of methanol from CO<sub>2</sub> recovered from waste incineration exhaust gas [Press release]. Retrieved from <https://www.jfe-eng.co.jp>
- Johnson Matthey & NextChem/MyRechemical. (2023). Waste to methanol technology. Retrieved from <https://matthey.com>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2025). Data Komposisi Sampah Nasional 2024. *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN)*. Retrieved from <https://sipsn.menlhk.go.id>
- Mission Possible Partnership. (2025). Repsol Ecoplanta – Build Clean Now Bright Spot. Retrieved from <https://buildcleannow.missionpossiblepartnership.org>

NextChem. (2022, August 7). MyRechemical awarded an engineering contract for waste-to-methanol and hydrogen plant [Press release]. Retrieved from <https://www.nextchem.com>

Nurofiq, H.F. (2025, June 21). Only 10 percent of waste in Indonesia managed properly: minister. *Antara News*. Retrieved from <https://en.antaranews.com>

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 109 Tahun 2025 tentang Penanganan Sampah Perkotaan melalui Pengolahan Sampah menjadi Energi Terbarukan Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan.

Port of Rotterdam. (2022, April 19). GIDARA Energy AMR will convert non-recyclable waste into advanced bio-methanol [Press release]. Retrieved from <https://www.portofrotterdam.com>

Republic of Indonesia. (2024). *National Inventory Document on Greenhouse Gas Emissions*. Jakarta: Ministry of Environment and Forestry.

Repsol. (2025, January 28). Repsol will invest more than €800 million in the Tarragona Ecoplanta [Press release]. Retrieved from <https://www.repsol.com>

Rohmatullah, P. (2025). National landfill capacity will last until 2028. Presented at UGM Forum, March 2025. Retrieved from <https://ugm.ac.id>

Shanghai Municipal Government. (2026, January 7). Shanghai's first locally developed green methanol project begins operations. *Shanghai Official Website*. Retrieved from <https://english.shanghai.gov.cn>

Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN). (2025). Data Timbulan Sampah Nasional 2019–2025. *SIPSN-KLHK*. Retrieved from <https://sipsn.menlhk.go.id>

Sun, Y., Wang, Q., Li, Y., & Wang, Z. (2022). Three MSW-to-methanol systems with carbon capture and storage. *Energy*, 261, 125247.

Technip Energies. (2025, September 30). Technip Energies awarded two services contracts for first-of-kind waste-to-methanol project [Press release]. Retrieved from <https://www.ten.com>

University of Maryland – School of Public Policy. (2025). *Municipal Solid Waste in Indonesia: Challenges, Opportunities, and the Role of Waste-to-Energy Power Plants*. College Park, MD.

---