



Kajian Tekno-Ekonomi Penerapan Insinerator *Waste-to-Energy* di Indonesia (Kasus pada Kota "X")

A Techno-Economic Study on the Application of Waste-to-Energy Incinerator in Indonesia (Case on City "X")

MANIS YULIANI¹, GEBY OTIVRIYANTI¹, NAUFAL RIADHI YUSUF¹,
AYUDIA MUTIARA FANI², WAHYU PURWANTA^{1*}

¹Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional

²Laboratorium Kekuatan Struktur, Badan Riset dan Inovasi Nasional

*wahyu.purwanta@brin.go.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 April 2022

Accepted 13 July 2022

Published 31 July 2022

Keywords:

Waste-to-energy

Municipal waste

Techno economy

ABSTRACT

In order to realize net zero emissions in waste sector, the government encourages the application of Waste-to-Energy (WtE) thermal process technology in 12 cities in Indonesia. There are many obstacles and challenges in implementing WtE as an alternative for waste management, starting from changes in consistency of regulations, environmental issues as well as technical and economic feasibility. Therefore, this study aims to examine the Techno-Economics of WtE Incinerator Implementation in Indonesia by taking the case in City "X" as an illustration for stakeholders in making decisions. The methods used include the desk study, direct observation, and interviews. In this study, City "X" becomes a model for the implementation of WtE with a waste processing capacity of 1,500 tpd which is a typical waste generation in big cities in Indonesia. City set a target to reduce 80–90% of waste volume. After technology selection stage, the MGI was selected as the main WtE unit. The plant is designed with a capacity of 1,500 tons/day of waste with a calorific value of 6,276 kJ/kg, 26% plant efficiency, 8,000 hours/year operation so that it will produce 28.33 MW of electricity or energy equivalent to 226,633 MWh/year. This electrical power will be used for internal purposes by 15% so that the total net electricity for the PLN grid is 24.08 MW. This WtE has a capital expenditure (Capex) of 2.2 billion IDR/ton/day and operational expenditure (Opex) 167 million IDR /year/ton per day with an estimated construction in 2025. The electricity price obtained from this capacity is 1,819 IDR/kWh. Based on the estimated value of the cost of capital, the selling price of electricity and the assumption that the loan will be returned for 10 years with interest rate of 6%, the WtE project gets a tipping fee of 642,779 IDR/ton of waste.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 29 April 2022

Disetujui 13 Juli 2022

Diterbitkan 31 Juli 2022

Kata kunci:

Waste-to-energy

Sampah perkotaan

Tekno ekonomi

ABSTRAK

Dalam mewujudkan *net zero emission* di sektor persampahan, pemerintah mendorong penerapan teknologi *Waste-to-Energy* (WtE) di 12 Kota. Banyak kendala dan tantangan dalam penerapan WtE, mulai dari konsistensi regulasi, isu lingkungan, hingga kelayakan teknis dan ekonomi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji tekno-ekonomi penerapan insinerator WtE di Indonesia dengan mengambil kasus di Kota "X" sebagai gambaran bagi *stakeholders* untuk mengambil keputusan. Metode yang digunakan meliputi metode *desk study*, pengamatan langsung, dan wawancara. Dalam penelitian ini Kota "X" menjadi model penerapan WtE kapasitas 1.500 ton/hari yang merupakan tipikal kapasitas yang umum di kota di Indonesia. Kota "X" menetapkan target pengolahan sampah mereduksi 80–90% dari volume sampah. Setelah melalui seleksi teknologi maka dipilih *Moving Grate Incinerator* sebagai unit utama WtE. *Plant* dirancang berkapasitas 1.500 ton/hari sampah dengan nilai kalor 6.276 kJ/kg, efisiensi termal 26%, operasi 8.000 jam/tahun sehingga akan menghasilkan energi listrik 28,33 MW atau energi setara 226.633 MWh/tahun. Daya listrik ini akan digunakan keperluan internal sebesar 15% sehingga total listrik bersih untuk ke jaringan PLN sebanyak 24,08 MW. WtE ini memiliki *Capex* Rp2,2 miliar/ton/hari serta *Opex* Rp167 juta/tahun/ton per hari dengan perkiraan dibangun tahun 2025 dan harga listrik yang diperoleh adalah Rp1.819/kWh. Berdasarkan perkiraan besaran nilai biaya modal, harga penjualan listrik dan asumsi bahwa pinjaman akan dikembalikan selama 10 tahun dengan bunga bank sebesar 6%, maka proyek WtE ini mendapatkan nilai *tipping fee* sebesar Rp642.779/ton sampah.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), didapati bahwa sampah perkotaan yang diangkut dan ditimbun di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) di kota/kabupaten di Indonesia rata-rata 41–42% dari timbulan sampah yang mencapai 61 juta ton per tahun (SIPSN, 2022). Ini berarti kapasitas pengolahan sampah secara nasional sangat rendah dan masih menitikberatkan pada sisi pemrosesan akhir. Masalahnya adalah masih sekitar 66,81% TPA yang ada dioperasikan secara terbuka (*open dumping*) yang membawa dampak pada terjadinya kerusakan lingkungan dan kesehatan manusia pada pengoperasiannya. Investasi pada pembangunan TPA dengan metode *sanitary landfill* yang lebih ramah lingkungan dianggap terlalu mahal dan tidak menarik bagi daerah. Selain itu, masalah lainnya adalah masih rendahnya anggaran pengelolaan sampah di daerah yang hanya berkisar 0,05–0,07% dari Anggaran Pendapatan Belanja Daerah (APBD) (Tahar, 2022).

Pemerintah sendiri melalui KLHK memproyeksikan angka timbulan sampah perkotaan akan mencapai 71,3 juta ton/tahun di 2025. Untuk itu pemerintah juga mencanangkan target melalui Kebijakan Strategis Nasional (Jakstranas) bahwa pengelolaan sampah pada 2025 harus mencapai 100% melalui metode pengurangan sampah sebanyak 20,9 juta ton (30%) dan penanganan sampah sebanyak 49,9 juta ton (70%). Selain menetapkan Jakstranas persampahan, salah satu visi pengelolaan sampah adalah pencapaian *net zero emission* pada 2045. Hal ini terkait bahwa sampah yang termasuk sektor limbah harus menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) sesuai *Paris Agreement* yang ditetapkan dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) sebesar 0,38% (*unconditional mitigation scenario*) dan 1,4% (*conditional mitigation scenario*) dari total emisi GRK sektor limbah sebanyak 88 ton di tahun 2010 sebagai *baseline* (KLHK, 2017).

Sebagai upaya untuk mencapai target Jakstranas 2025 maupun *net zero emission* 2045 tersebut, sejumlah kebijakan ditetapkan seperti *less landfill policy*, pembatasan plastik sekali pakai, sosialisasi gaya hidup minim sampah, peningkatan *recycling rate* hingga 75–100% serta pengolahan sampah melalui proses termal dengan memanfaatkan energi panasnya. Kebijakan pengurangan sistem *landfilling* karena dianggap sangat berpotensi terbentuknya gas metana (CH₄) yang memiliki *Global Warming Potential* (GWP) cukup tinggi. Sebaliknya melalui Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 35 Tahun 2018, pemerintah menetapkan implementasi pengolahan sampah menjadi energi (*Waste-to-Energy/WtE*) bagi 12 kota di Indonesia karena dianggap mampu mereduksi sampah secara signifikan dan emisi GRK lebih rendah dibanding *landfill*. Walaupun WtE masih mengemisikan CO₂ namun secara konvensi nilai GWP lebih rendah dibanding gas CH₄.

Perkembangan pembangunan WtE atau pengolahan sampah menjadi energi listrik (PSEL) di Indonesia sejak tahun 2018 menemui berbagai tantangan dan kendala mulai dari kelengkapan dan konsistensi peraturan, tingginya nilai *tipping fee* ke WtE, mekanisme kerjasama dan model bisnis yang kompleks hingga masalah karakteristik dan sifat sampah Indonesia yang perlu penanganan khusus (Sitorus,

2020). Dari 12 kota yang direncanakan hingga tahun 2021 baru satu WtE yang sudah beroperasi yakni WtE Benowo Surabaya. Jika permasalahan tersebut masih terus berlangsung, maka pembangunan dan pengoperasian WtE di 11 kota lainnya akan semakin tertunda. Hal ini berdampak pada semakin meningkatnya jumlah sampah yang masuk ke TPA sehingga kondisi persampahan di 11 kota tersebut semakin darurat. Perlu dilakukan suatu studi tekno-ekonomi terkait penerapan WtE sebagai gambaran bagi *stakeholders* persampahan dalam mengambil keputusan agar pembangunan dan pengoperasian WtE di Indonesia dapat terlaksana dengan sukses. Hasil kajian ini berguna dalam mendorong percepatan implementasi Perpres Nomor 35 Tahun 2018 terkait penerapan pengolahan sampah menjadi energi listrik di 11 kota lainnya di Indonesia.

Berdasarkan dengan studi tekno-ekonomi penerapan WtE yang dilakukan oleh Azmi (2014), Azis *et al.* (2020), Haghi & Tehrani (2015), Maisiri (2016), dan Leme *et al.* (2014), belum ada studi yang membahas mengenai tekno-ekonomi penerapan insinerator untuk mengolah sampah yang memiliki komposisi dan karakteristik sampah sesuai dengan kota-kota di Indonesia. Oleh karena itu, pada makalah ini akan dilakukan kajian tekno-ekonomi penerapan insinerator WtE di Indonesia (Kota "X"), dengan mengambil kasus satu kota yang baik kuantitas dan kualitas sampahnya serta tipologi kotanya mirip atau sejenis dengan kebanyakan kota yang ada dalam Perpres Nomor 35 Tahun 2018 tersebut.

1.2 Tujuan Penelitian

Studi ini bertujuan untuk mengkaji penerapan insinerator pengolah sampah menjadi energi listrik (WtE) dengan mengambil kasus di Kota "X" sebagai model tekno-ekonomi WtE *incinerator* di Indonesia.

2. METODE

2.1 Bahan Pendukung

Studi dilakukan dengan menggunakan materi dokumen perencanaan desain insinerator WtE maupun analisis finansial di Kota "X" serta dokumen perencanaan dengan teknologi sejenis di kota-kota lainnya. Selain itu dokumen pendukung studi meliputi Rencana Induk Pengelolaan Sampah dan berbagai laporan hasil survey timbulan, komposisi dan karakteristik sampah yang telah dilakukan di Kota "X" sebelumnya.

2.2 Metode Studi

Metode penelitian dilakukan dengan *desk study* dan pengamatan langsung serta wawancara dengan pihak otorita pengelola sampah. *Desk study* untuk mengkaji dokumen studi kelayakan dan *basic engineering design* serta spesifikasi unit pemrosesan, sedangkan pengamatan lapangan dilakukan untuk mengevaluasi timbulan, komposisi, dan karakteristik sampah serta ketersediaan utilitas penunjang. Selain itu, wawancara dengan pihak otorita dilakukan untuk mengkonfirmasi besaran data persampahan dan memastikan *owner requirement* telah dipenuhi dalam dokumen perancangan WtE yang direncanakan. Data dan informasi yang telah diperoleh tersebut kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan:

- Neraca massa dan energi dari WtE plant
 - Produksi listrik (*gross*) = berat sampah x LHV x *plant efficiency*
 - Produksi listrik (*netto*) = produksi listrik (*gross*) - konsumsi *internal plant*
 - *Tipping fee* = (*Capex* + *Opex*) - *Revenues*
- Capital expenditure (Capex)* terdiri atas biaya rekayasa sipil, pengadaan peralatan, konstruksi, pengolahan air, instrumen dan peralatan kantor, konstruksi interkoneksi, lahan dan biaya bunga selama konstruksi. *Operational expenditure (Opex)* terdiri atas bahan dan suku cadang, pengelolaan abu terbang dan abu dasar, bahan bakar, pengolahan limbah, gaji karyawan, perbaikan dan pemeliharaan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Timbulan, Komposisi dan Karakteristik Sampah

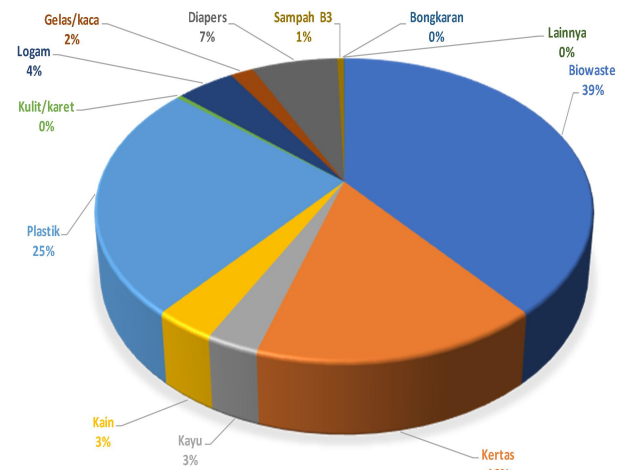
Kota "X" termasuk tipe kota besar dengan jumlah penduduk sebanyak 2.372.093 jiwa pada tahun 2019. Berdasarkan hasil berbagai survei timbulan sampah tahunan sebelumnya diperoleh laju timbulan rata-rata 0,731 kg/orang/hari. Proyeksi penduduk dilakukan berdasar pada angka pertumbuhan penduduk 1,19%/tahun tetap dari tahun ke tahun dan laju timbulan juga dianggap tetap 0,731 kg/orang/hari dari tahun ke tahun. Tabel 1 memperlihatkan hasil proyeksi timbulan sampah sampai dengan tahun 2050.

Tabel 1. Proyeksi timbulan sampah (2019–2050)

No.	Tahun	Jumlah Penduduk	Timbulan Sampah (ton/hari)
1	2019	2.372.093	1.734
2	2020	2.400.820	1.755
3	2025	2.547.195	1.862
4	2030	2.701.778	1.975
5	2035	2.865.937	2.095
6	2040	3.041.039	2.223
7	2045	3.225.718	2.358
8	2050	3.422.708	2.502

Sumber: (Jakpro & PwC, 2020)

Hasil survei komposisi sampah di Tempat Penampungan Sementara (TPS) sampel memperlihatkan bahwa jenis sampah *bio-waste* mencapai 39%, plastik 25%, kertas 16%, *diapers* 7%, dan logam 4% dari berat total sampah (lihat Gambar 1). Hal ini menunjukkan bahwa komposisi sampah di Kota "X" mendekati komposisi sampah masyarakat berpenghasilan menengah serta dominannya sampah area komersial, bila menilik pada tingginya sampah plastik dan kertas (Prima, 2018; Widodo & Firdaus, 2018). Secara keseluruhan komposisi sampah yang ada sebagian besar termasuk *combustible waste* (93%) yang juga *recycable waste* (41%). Adapun *bio-waste* merupakan sampah organik seperti sisa makanan dan tanaman yang termasuk *compostable waste* mencapai 39%. Berdasarkan data tersebut, maka komposisi sampah yang ada sangat mendukung bagi penerapan teknologi WtE.



Gambar 1. Komposisi sampah TPS sampel di Kota "X" (Jakpro & PwC, 2020)

Hasil analisis proksimat sampel sampah didapati nilai kadar air 39,2%, kadar abu 19,5%, dan kadar karbon 48,1% (lihat Tabel 2). Untuk nilai kalor dalam *High Heating Value (HHV)* yaitu 3.228 kkal/kg. Hasil dari analisis di laboratorium atas nilai HHV dapat digunakan untuk menentukan nilai *Low Heating Value (LHV)* dengan rumus pada Persamaan 1 (Boundy et al., 2011; Young, 2010). Nilai LHV yang diperoleh dapat menjadi acuan dalam perhitungan neraca energi khususnya produksi listrik pada studi tekno-ekonomi ini.

$$LHV = HHV (1 - w) - 584,85w \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:
w = kadar air (*as received*).

Ditinjau dari kadar air, kadar abu dan kadar karbon maka secara teoritis berdasar diagram Tanner, jika diolah dengan pembakaran (*insinerasi*), sampah Kota "X" akan mampu membakar dirinya sendiri tanpa bahan bakar tambahan (*self burning*). Dalam diagram Tanner, sampah berkategori *self burning* jika kadar air ≤ 50%, kadar abu ≤ 60% dan kadar karbon ≥ 25% (Reddy, 2016).

Tabel 2. Hasil analisis proksimat dan ultimat

No	Parameter	Nilai
1	Kadar Air (<i>as received</i>) (%)	39,2
2	Kadar Air (<i>as dried</i>) (%)	25,3
3	Kadar abu (<i>as dried</i>) (%)	19,5
4	<i>Volatile matter</i> (%)	49,6
5	Karbon tetap (%)	5,7
6	HHV (kkal/kg)	3.121
7	LHV (kkal/kg)	1.521
8	Khlor (Cl,%)	0,2
9	Karbon (C,%)	48,1
10	Hidrogen (H,%)	2,2
11	Oksigen (O,%)	29,9
12	Nitrogen (N,%)	2,4
13	Sulfur (S,%)	0,4

3.2 Seleksi Teknologi

Penerapan teknologi WtE skala komersil di Indonesia diawali dengan pemanfaatan gas CH₄ sebagai hasil fermentasi anaerobik sampah di TPA. Proyek *landfill gas to energy* (LFGTE) ini berkembang sebagai wujud implementasi Protokol Kyoto melalui *Clean Development Mechanism* (CDM). Masalahnya dalam perkembangannya LFGTE sering dihadapkan pada problem stabilitas produksi gas CH₄ yang cenderung fluktuatif dan berumur lebih pendek dari yang direncanakan (Dioha & Appiah, 2019). Melalui Perpres Nomor 35 Tahun 2018 arah baru penerapan WtE adalah berfokus pada upaya memusnahkan sampah secara cepat dan signifikan karena kondisi darurat sampah, adapun pemanfaatan panas untuk pembangkitan listrik adalah sebagai bonus. Pada era ini penerapan teknologi WtE termal menjadi realistis.

Kota "X" dalam memutuskan menerapkan insinerator WtE telah melalui serangkaian seleksi teknologi dengan mempertimbangkan berbagai kriteria serta timbulan, komposisi dan karakteristik sampahnya. Seleksi teknologi dilakukan terhadap alternatif teknologi seperti pengomposan, *anorganic recycling*, *anaerobic digestion*, *landfilling* maupun proses termal dengan konversi menjadi energi. Masing-masing teknologi diuraikan kelebihan dan kekurangannya serta dibandingkan dengan target utama pengelolaan sampah. Melalui algoritma yang ditetapkan maka dipilihlah metode proses termal. Kemudian diantara proses termal juga diseleksi mulai dari gasifikasi, pirolisis, *fluidized bed incinerator*, *rotary kiln* maupun *moving grate incinerator*. Kembali dengan memperbandingkan semua kelebihan dan kelemahan tiap teknologi dengan kemudahan operasi serta banyaknya teknologi tersebut diaplikasikan di dunia, maka dipilihlah *moving grate incinerator* (MGI).

Insinerator WtE direncanakan akan beroperasi tahun 2025 di saat timbulan sampah mencapai 1.862 ton/hari (lihat Tabel 1). Namun pengelolaan sampah kota juga direncanakan melalui metode 3R sebanyak 362 ton/hari (20%) sehingga sampah yang diolah melalui WtE sebanyak 1.500 ton/hari. Berdasarkan Tabel 2 diperoleh angka LHV sebesar 1.734 kkal/kg, mengingat kondisi sampah di Indonesia yang cenderung basah serta adanya pengaruh musim, maka perencanaan dalam insinerator WtE harus mempertimbangkan kadar air sampah antara 40–70%. Hal ini juga didukung angka-angka kadar air yang didapat dari berbagai literatur terkait karakteristik sampah di Indonesia. Oleh karena itu, dalam perancangan MGI ditetapkan untuk menggunakan angka LHV saat setelah 5 hari penyimpanan di bunker sebesar 1.500 kkal/kg (6.276 kJ/kg). Berdasarkan angka pengolahan sampah 1.500 ton/hari, LHV 6.276 kJ/kg dan efisiensi termal 0,26 serta *availability factor* 90% (8.000 jam operasi setahun), maka diperkirakan akan menghasilkan daya listrik 28,33 MW atau energi setara 226.633 MWh/tahun.

3.3 Teknologi Insinerator WtE

3.3.1 Diagram Alir Proses

Sistem pengolahan sampah menjadi energi listrik adalah serangkaian proses yang terdiri atas empat blok sub sistem yakni penyimpanan dan pengumpanan sampah, pembakaran, pembangkitan energi listrik dan pengolahan

gas buang (lihat Gambar 2). Selain itu WtE *plant* juga memerlukan penyediaan utilitas dan pengelolaan residu. Penjelasan setiap sub sistem beserta parameter perencanaan untuk WtE di Kota "X" adalah sebagai berikut:

1) Sistem Penyimpanan dan Pengumpanan

Sampah dari sumber perkotaan (*fuel waste*) akan diangkut truk dan setelah dilakukan penimbangan akan dilakukan *unloading* di pintu bunker. Sampah disimpan di bunker yang dirancang mampu menyimpan sampah 3 sampai 5 hari dengan tujuan persediaan umpan pembakaran serta menurunkan kadar air antara 5–10% (Reddy, 2016). Berdasarkan penjelasan tersebut, maka untuk mencapai *self burning*, sampah yang masuk bunker maksimal memiliki kadar air sebesar 55%. Jika sampah memiliki kadar air lebih dari 55%, maka diperlukan bahan bakar tambahan atau *pre-treatment* pengurangan kadar air terlebih dahulu sebelum masuk bunker agar proses pembakaran dapat berjalan optimal. Sampah di bunker sudah bebas dari material yang dilarang sebagai umpan pembakaran yakni logam, kaca, aluminium foil, PVC dan limbah B3 (Neuwahl et al., 2019). Untuk sampah *bulky waste* akan disisihkan secara terpusat sebelum dibawa ke *plant*.

2) Sistem Pembakaran

Sampah dari bunker akan diumpankan ke tungku pembakaran melalui *hopper*. Pembakaran di tungku dirancang untuk memenuhi kriteria 3T (*temperature, time, turbulence*) agar terjadi pembakaran sempurna (Reddy, 2016; Oumarou et al., 2018). Temperatur pada tungku primer minimal 850°C sedangkan tungku sekunder 900°C. Rancangan temperatur pembakaran $\geq 850^\circ\text{C}$ adalah juga untuk mencegah pembentukan dioksin/furans sebagai polutan karsinogenik (Quina, 2008; Zhang et al., 2019). Upaya agar terjadi pembakaran sempurna juga dilakukan dengan memberi suplai udara primer dari dasar tungku melalui celah *grate* dan udara sekunder dari arah dinding tungku sekunder. Udara sekunder ini akan memberikan turbulensi pada aliran gas buang. Pembakaran sempurna juga diupayakan melalui pembalikan sampah yakni dengan menerapkan sistem *grate* yang bergerak maju mundur (*reciprocating grate*). Dimensi tungku dirancang agar memenuhi kriteria bagi waktu tinggal gas (*residence time*) di atas 2 sekon. Pembakaran di tungku akan mengkonversi material sampah menjadi panas, gas buang dan residu (Kikkawa et al., 2008). Panas yang dihasilkan dari pembakaran selanjutnya akan memanaskan air yang ada di *boiler* sebagai uap panas yang bertekanan tinggi (*super heated steam*).

3) Sistem Pembangkitan Listrik

Panas dari hasil pembakaran sampah selanjutnya akan memanaskan dinding pipa di sistem *boiler* sehingga terjadi pertukaran panas dengan efisiensi termal dirancang 80% yang akan menghasilkan *super heated steam* bertekanan 6,4 MPa dengan temperatur 450°C. *Steam* ini selanjutnya dialirkan ke turbin yang sudah dikopel dengan generator yang akan menghasilkan listrik sebesar 28 MW dengan efisiensi turbin 33%. Daya sebesar 28,33 MW akan digunakan sebagai kebutuhan daya internal 15% (Di Maria et al., 2016) serta dialirkan ke sistem jaringan regional PLN. Selanjutnya

uap jenuh yang keluar dari turbin kemudian dikondensasi dengan menggunakan kondensor, sehingga mengubah fasa uap menjadi cair hingga kembali menjadi air yang akan diumpungkan kembali ke boiler. Air yang melewati kondensor kemudian dimasukkan ke *deaerator* dengan tujuan untuk menghilangkan oksigen dan gas-gas terlarut lainnya yang dapat menyebabkan korosi pada peralatan yang digunakan lalu dipompakan lagi ke dalam boiler.

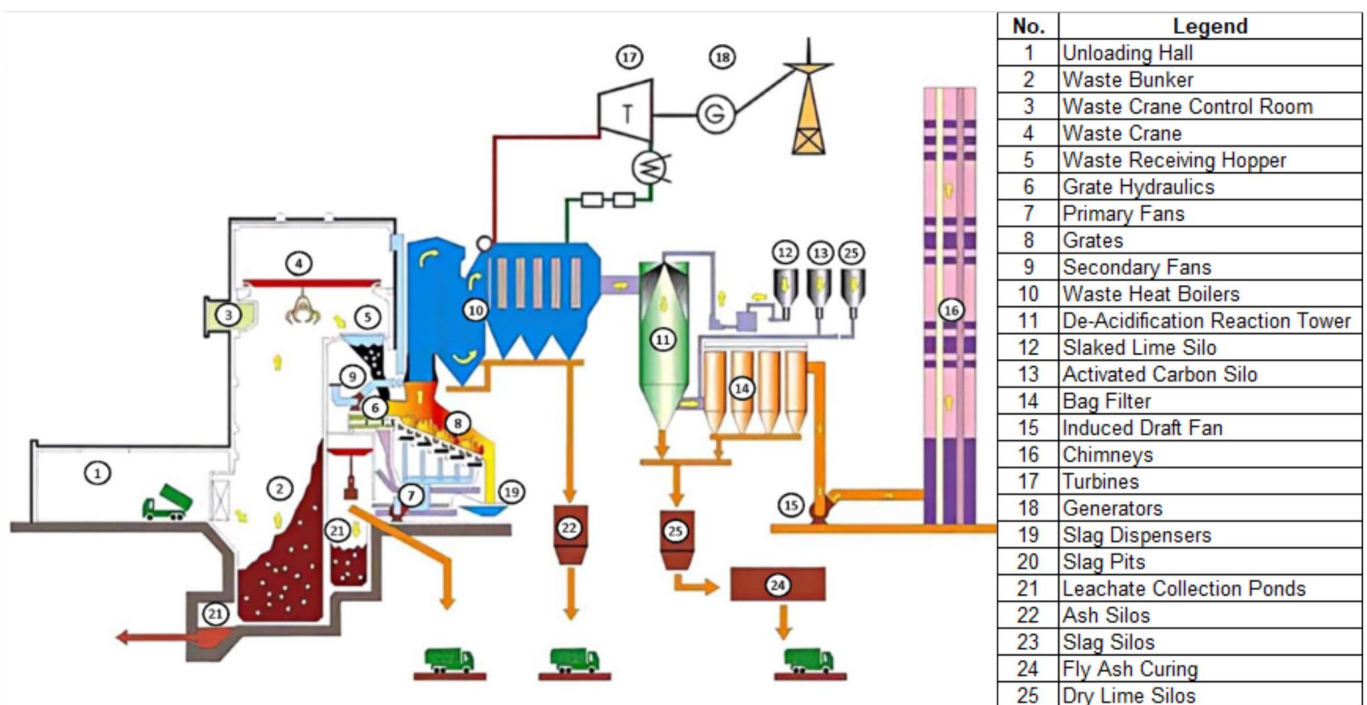
4) Sub Sistem Pengolahan Gas Buang

Gas buang (*flue gas*) sisa pembakaran tidak boleh dibuang langsung ke udara karena mengandung polutan dan harus memenuhi Baku Mutu Emisi sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) Nomor 70 Tahun 2016. Gas buang dari boiler dengan temperatur tinggi akan dilakukan pendinginan hingga suhu 190°C di dalam *economizer* dan dibersihkan dari kandungan bahan polutan di dalam unit pengendali pencemaran udara yang terdiri atas *quencher-scrubber*, injeksi bahan kimia, *bag filter* dan cerobong. *Quencher-scrubber* merupakan unit penurunan temperatur gas dengan cara *counter current* dengan air yang diharapkan terjadi penyisihan partikulat. Selanjutnya gas buang diinjeksi dengan bahan kimia kapur (*slaked lime*) dan karbon aktif. Kapur berfungsi menetralisasi gas-gas asam (HCl dan HF) sedangkan karbon aktif menyerap dioksin/furan dan logam berat (Purwanta & Suryanto, 2018). Partikulat dan polutan dalam gas buang

selanjutnya akan melewati *bag filter* yang berfungsi sebagai kolektor partikulat yang tersisa sebelum dibuang ke udara bebas melalui cerobong (*stack*) (Buonanno et al., 2009; Jones & Harrison, 2016).

5) Utilitas dan Pengelolaan Residu

Pengoperasian suatu WtE plant akan memerlukan utilitas seperti suplai air baik untuk proses itu sendiri maupun kebutuhan domestik. Untuk WtE ini direncanakan kebutuhan air sebanyak 3.575 m³/hari yang disediakan melalui *water treatment plant* (WTP) dimana produk yang dihasilkan ada perbedaan dua kualitas air yakni untuk boiler maupun untuk domestik dan taman. Hasil pembakaran di tungku selain menghasilkan gas buang dan panas juga menghasilkan residu padat berupa *fly ash* dan *slag* (*bottom ash* dan logam). Dari pembakaran 1.500 ton sampah maka akan menghasilkan *fly ash* sebanyak ± 45 ton (3%) dan *slag* sebanyak ± 300 ton (20%), ini berarti tingkat reduksi sampah mencapai 77% berat. Pengelolaan residu pada unit pengolahan sampah secara termal harus mematuhi Permen LHK Nomor 26 Tahun 2020. *Fly ash* dari WtE walau bukan termasuk limbah B3, namun karena ukuran dan toksisitasnya maka harus dilakukan solidifikasi/stabilisasi lebih dahulu sebelum dimanfaatkan atau ditimbun di *landfill* (Bie et al., 2016). Untuk *slag* dapat langsung ditimbun di *sanitary/controlled landfill*, karena tingkat kemanfaatan material yang rendah (tidak ekonomis).

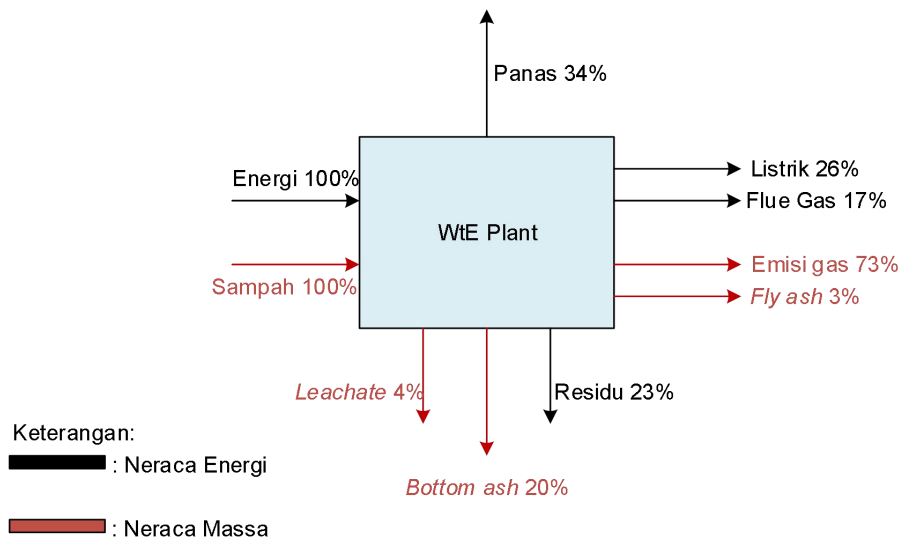


Gambar 2. Diagram alir proses insinerator WtE

3.3.2 Neraca Massa dan Energi

Penilaian kinerja suatu WtE plant dapat diawali sejak perancangan neraca massa dan energinya. Kesetimbangan massa dan energi merupakan prinsip konversi energi dan massa dimana energi dan massa yang masuk sama dengan yang keluar (Niessen, 2002). Pada prinsip kesetimbangan, energi tidak bisa hilang maupun diciptakan. Sampah yang dibakar pada WtE plant memiliki energi dan massa. Pada

proses pembakaran, sebagian sampah akan menjadi energi yang bisa dimanfaatkan tapi ada juga menjadi energi yang tidak bisa dimanfaatkan (*losses*) seperti panas yang lepas, *flue gas*, dan abu sisa pembakaran. Secara sederhana, konversi energi yang terjadi pada WtE plant diperlihatkan pada Gambar 3, sedangkan formula untuk memperkirakan besaran daya listrik yang dihasilkan digunakan Persamaan 2, (Graham et al., 2012; Gupta & Mishra, 2015).



Gambar 3. Kesetimbangan massa dan energi di WtE plant

$$P_{th} = m_F \times H_{(N)} = \frac{P_e}{\eta} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

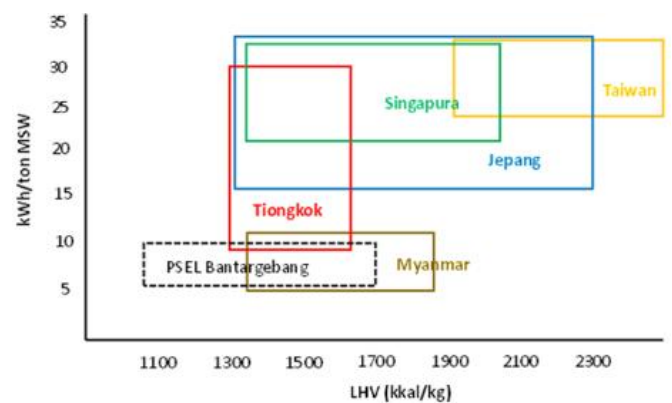
- P_{th} = input energi sampah (MW)
- m_F = laju massa sampah (kg/s)
- H_(N) = nilai kalor bersih sampah (as received) atau LHV (MJ/kg)
- P_e = output daya listrik (MW)
- η = efisiensi termal (fraksional).

Energi kotor yang dihasilkan dari pembakaran sampah berdasarkan nilai kalor dari sampah yang masuk (H_(N)) sebesar 6.276 kJ/kg dengan pengolahan (m_F) 1.500 ton/hari adalah sebesar 108 MW. *Plant efficiency* sebesar 26%, sehingga total energi bersih yang bisa dimanfaatkan adalah sebesar 28,33 MW. Berdasarkan dari *output* listrik bersih yang dihasilkan, maka dalam 1 tahun energi listrik yang bisa dihasilkan pada jangka waktu operasi selama 8.000 jam/tahun adalah sebesar 226.633 MWh atau 450 kWh/ton sampah. Selama sistem beroperasi, sistem akan mengambil sebagian energi listrik yang dihasilkan sebesar 15% (Di Maria et al., 2016) atau sebesar 4,25 MW sehingga listrik yang bisa dijual (*net energy to grid*) sebesar 24,08 MW.

Tingkat produksi listrik sangat bergantung pada massa sampah, nilai kalor dan juga efisiensi alat. Tingkat produksi listrik per berat sampah yang dibakar maupun nilai kalor di Indonesia sedikit banyak terepresentasikan dari kinerja WtE Bantargebang. Dengan nilai kalor berkisar 1.100–1.700 kkal/kg dan kapasitas pembakaran 100 ton/hari dihasilkan listrik 5–10 kWh/ton sampah. Studi yang dilakukan Nadiaratri (2021) membandingkan tingkat produksi listrik di WtE beberapa negara Asia dapat dilihat pada Gambar 4.

Di Tiongkok yang memiliki banyak WtE berada pada rentang 9–30 kW/ton pada nilai kalor (LHV) sebesar 1.300–1.600 kkal/kg, sedangkan di Jepang rata-rata adalah 20 kW/ton dengan nilai kalor (LHV) antara 1.600–2.300 kkal/kg. Sementara di Singapura yang memiliki WtE di Tuas dan Senoko memiliki rentang 25–30 kW/ton (rerata 27 kW/ton) dengan nilai kalor (LHV) sebesar 1.300–2.000 kkal/kg (rerata 1.650 kkal/kg). Taiwan termasuk negara dengan WtE yang cukup tinggi produktivitasnya yang mencapai 25–28 kW/ton

(rerata 26 kW/ton) dengan rentang nilai kalor (LHV) 1.900–2.500 kkal/kg (rerata 2.300 kkal/kg). Untuk WtE di Yangoon Myanmar dengan nilai kalor (LHV) sebesar 1.790 kkal/kg menghasilkan energi listrik 12,5 kW/ton.



Gambar 4. Perbandingan kinerja konversi energi WtE di negara Asia

3.4 Aspek Ekonomi

Selain aspek teknis, kelayakan suatu proyek WtE juga dilihat dari aspek ekonomi, finansial, sosial dan lingkungan. Pembangunan WtE di Kota “X” kapasitas 1.500 ton/hari direncanakan dilakukan selama 3 tahun dengan perkiraan biaya investasi (*Capex*) sebesar Rp3,381 triliun. Untuk *Opex* dengan usia proyek 25 tahun direncanakan sebesar Rp6,261 triliun. Komponen *Capex* meliputi biaya tidak langsung (*soft cost*) dan biaya langsung (*hard cost*). Biaya tidak langsung berupa biaya konsultasi untuk perusahaan proyek dan biaya otorisasi dan persetujuan, sedangkan biaya langsung berupa biaya tanah, biaya EPC, biaya keuangan, dan bunga selama konstruksi (EU, 2000).

Pada dasarnya suatu proyek WtE selain terdiri atas komponen biaya modal (*Capex* dan *Opex*) juga mendapatkan *revenue* dari biaya pengolahan (*tipping fee*) sampah serta hasil penjualan listrik. Mengingat WtE ini berada dalam rezim regulasi Perpres Nomor 35 Tahun 2018, maka harga listrik yang menjadi acuan untuk kapasitas ≥ 20 MW adalah US\$ 14 sen/kWh – (0,076 × kapasitas kontrak) (Qodriyatun, 2021). Kapasitas listrik WtE Kota “X” yang akan dijual ke PLN

adalah 85% dari kapasitas total yaitu sebesar 24 MW. Harga listrik yang diperoleh dari kapasitas tersebut adalah Rp1.819/kWh. Berdasarkan perkiraan besaran nilai biaya modal, harga penjualan listrik dan asumsi bahwa pinjaman akan dikembalikan selama 10 tahun dengan bunga bank sebesar 6%, maka proyek WtE ini mendapatkan nilai *tipping fee* sebesar Rp642.779/ton sampah. Dalam kajian ini nilai 1 US\$ = Rp14.300 (lihat Tabel 3).

Tabel 3. Hasil perhitungan *tipping fee*

Biaya Modal (Rp/ton)	=	1.339.498
Capex (Rp/ton)	=	838.601
Opex (Rp/ton)	=	500.897
Keuntungan (Rp/ton)	=	696.719
Penjualan listrik	=	696.719
Tipping fee	=	642.779

Besaran nilai *Capex/Opex* untuk proyek WtE akan bervariasi dari satu negara dengan negara lain karena berbagai faktor. Perbandingan *Capex/Opex* akan lebih sesuai jika dilakukan terhadap jenis teknologi yang sama misal untuk MGI, Gasifikasi atau Gasifikasi Plasma dengan kapasitas yang sama. Di Indonesia sendiri sampai saat ini belum ada WtE dengan teknologi MGI dengan skala besar. Insinerator WtE di TPST Bantargebang merupakan pilot proyek dengan kapasitas 100 ton/hari dengan *output* listrik 700 kW. Adapun WtE Gasifikasi di TPA Benowo Surabaya merupakan WtE komersial pertama di Indonesia berkapasitas 1.000 ton/hari dengan *output* bersih listrik 9 MW. Jika dilihat unit biaya per ton sampah, maka WtE Benowo lebih rendah dibanding WtE Bantargebang, namun hal ini wajar mengingat kapasitas WtE Bantargebang jauh lebih

kecil sehingga cenderung memberikan nilai biaya yang lebih tinggi.

Semakin besar kapasitas pengolahan sampah maka unit biaya modal per berat sampah akan semakin rendah. Kapasitas yang terlalu kecil (kurang dari kapasitas minimal yaitu 240 ton/hari) akan menimbulkan peningkatan biaya yang lebih besar dibandingkan peningkatan biaya pada kapasitas minimal (World Bank, 1999). Begitu juga dengan kondisi sampah yang buruk akan menimbulkan biaya yang lebih besar. Kondisi sampah yang buruk akan membutuhkan desain dan bahan konstruksi yang lebih baik serta *pre-treatment* yang lebih kompleks.

Insinerator WtE Kota "X" dengan kapasitas 1.500 ton/hari memiliki *Capex* Rp2,2 miliar/ton/hari serta *Opex* Rp167 juta/tahun/ton per hari dengan perkiraan dibangun tahun 2025. Beberapa WtE dengan kapasitas sama di Tiongkok memiliki unit biaya per berat sampah yang lebih rendah, hal ini diduga karena WtE tersebut telah dibangun beberapa tahun sebelumnya yang tentu dipengaruhi faktor inflasi yang juga pengaruh bunga bank di Tiongkok yang cenderung lebih rendah karena pembiayaan WtE didukung penuh oleh pihak pemerintah setempat termasuk sektor perbankan. Beberapa perbandingan nilai *Capex/Opex* WtE dapat dilihat pada Tabel 4.

Rendahnya *Capex* WtE di Benowo dengan teknologi gasifikasi konvensional juga didukung studi yang dilakukan Young (2010) yang membandingkan beberapa teknologi termal dengan kapasitas yang sama 500 ton/hari (lihat Tabel 5). Namun secara teknis operasional, metode gasifikasi memerlukan homogenitas sampah yang lebih tinggi dibanding insinerator yang bersifat *mass burn*. Tingkat produksi listrik per berat sampah dengan gasifikasi juga lebih tinggi dari insinerasi.

Tabel 4. Perbandingan nilai *Capex* dan *Opex* di beberapa proyek WtE

No	Proyek	Kapasitas (tph)	Capex		Opex	
			(Juta Rp)	(Juta Rp/tph)	(Juta Rp/th)	(Juta Rp /th.tph)
1	WtE Bantargebang ¹ (Indonesia)	100	96.400	964	12.200	122
2	WtE Benowo ² (Indonesia)	1000	708.884	709	66.658	67
3	WtE Kota "X" (Indonesia)	1500	3.381.458	2.254	250.448	167
4	Nanhai MSW Incineration ³ (Tiongkok)	1500	1.383.268	922	136.851	91
5	Suzhou Phase III ³ (Tiongkok)	1500	1.576.422	1.051	124.791	83
6	Qingdao ³ (Tiongkok)	1500	1.349.883	900	136.767	91

Keterangan: tph = ton per hari; th=tahun

Sumber: 1(BPPT, 2020); 2(PT. Sumber Organik, 2019); 3(Qiu, 2012)

Tabel 5. Perbandingan parameter tekno-ekonomi WtE termal

Parameter	Insinerator	Pirolisis	Gasifikasi Konvensional	Gasifikasi Plasma Arc
Capex (6%, 20 th)	\$115.997.700	\$86.936.900	\$80.337.800	\$101.583.800
Kapasitas (tph)	500	500	500	500
Produksi listrik (kWh/ton)	544	571	685	816
Opex (\$/th)	\$8.216.600	\$7.193.700	\$6.871.800	\$7.483.400
Tipping fee (\$/ton)	\$35	\$35	\$35	\$35

Keterangan: tph = ton per hari; th=tahun

Sumber: Young (2010)

4. KESIMPULAN

Kajian penerapan teknologi WtE di Kota "X" menghasilkan model tekno-ekonomi antara lain; (a) Pada tingkat kapasitas pembakaran sampah 1.500 ton/hari dengan nilai kalor (LHV) 6.276 kJ/kg, *plant efficiency* 26% serta waktu operasi 8.000 jam/tahun akan menghasilkan daya listrik kotor 28,33 MW atau energi sebesar 226.640 MWh/tahun, (b) Pada tingkat produksi listrik sebesar 266.640 MWh/tahun dengan acuan harga listrik PLN pada Perpres Nomor 35 Tahun 2018 sebesar Rp1.819/kWh dan dilakukan perhitungan terhadap biaya modal, harga listrik, asumsi bunga bank 6% dengan masa pengembalian 10 tahun, maka akan diperoleh nilai *tipping fee* sebesar Rp642.779/ton sampah. Penerapan WtE memerlukan biaya *Capex* dan *Opex* yang tinggi sehingga harus diperhitungkan secara cermat tingkat potensi energi sampah, harga listrik, *tipping fee* maupun bentuk nyata dukungan pemerintah dalam regulasi dan kepastian berusaha.

PERSANTUNAN

Ucapan terima kasih diberikan kepada Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Kota "X" yang telah memfasilitasi terlaksananya studi kelayakan penerapan fasilitas pengolahan sampah dengan proses termal berupa insinerator WtE dan juga kepada Badan Usaha Milik Daerah setempat yang memberi kesempatan dalam pengkajian berbagai data dan informasi dalam menunjang tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Azmi, M. (2014). Analisis teknik dan ekonomi pemanfaatan biomassa sebagai pembangkit energi listrik di Surabaya (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Azis, M. M., Kristanto, J., & Purnomo, C. W. (2021). A Techno-Economic Evaluation of Municipal Solid Waste (MSW) Conversion to Energy in Indonesia. *Sustainability*, 13(13), 7232.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2020). Operasional dan Pemeliharaan PLTSa Bantargebang Tahun 2020. Laporan Akhir untuk Dinas Lingkungan Hidup, Pemprov DKI Jakarta.
- Bie, R., Chen, P., Song, X., & Ji, X. (2016). Characteristics of municipal solid waste incineration fly ash with cement solidification treatment. *Journal of the Energy Institute*, 89(4), 704–712.
- Boundy, B., Diegel, S.W., Wright, L., & Davis, S.C. (2011). *Biomass Energy Data Book: Edition 4*, U.S Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory, Tennessee.
- Buonanno, G., Ficco, G., & Stabile, L. (2009). Size distribution and number concentration of particles at the stack of a municipal waste incinerator. *Waste Management*, 29(2), 749–755.
- Dioha, M., & Osei-Appiah, N.A. (2019). Techno-Economic Assessment of Waste-to-Energy Technologies in Ghana. *J. of Sus. Energy*. 10 (2).
- Di Maria, Contina, S., Bidinia, G., Boncompagni, A., Lasagnic, M., & Sisania, F. (2016). Energetic Efficiency of an existing Waste to Energy power plant.
- European Commission (EU). (2000). A Study on the Economic Valuation of Environmental Externalities from Landfill Disposal and Incineration of Waste, Final Report, D.G Environment.
- Graham, D., Harnevie, H., Rob van Beek, & Blank, F. (2012). Validated methods for flue gas flow rate calculation with reference to EN-12952-15. VGB Powertech, e.V Germany.
- Gupta, S. & Mishra, R.S. (2015). Estimation of electrical energy generation from Waste to Energy using incineration technology, *Int. J. of Adv. Res. and Innovation*, 3 (4), 631–634.
- Haghi, E., & Tehrani, F. B. (2015). Techno-economic assessment of municipal solid waste incineration plant-case study of Tehran, Iran. In *First Sustain Dev Conf Eng Syst Energy Water Environ*.
- Jakpro & PwC Consultant. (2020). Pra Studi Kelayakan Penyelenggaraan Fasilitas Pengolahan Sampah Antara di dalam Kota DKI Jakarta Untuk Pemenuhan Peraturan Gubernur DKI Jakarta Nomor 65 Tahun 2019. Technical Report.
- Jones, A. M., & Harrison, R. M. (2016). Emission of ultrafine particles from the incineration of municipal solid waste: A review. *Atmospheric Environment*, 140, 519–528.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2017). Strategi Implementasi NDC (Nationally Determined Contribution). Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim.
- Kikkawa, H., Ishizaka, H., Kai, K., & Nakamoto, T. (2008). DeNOx, DeSOx, and CO2 removal technology for power plant. *Hitachi Review*. 57(5).
- Leme, M. M. V., Rocha, M. H., Lora, E. E. S., Venturini, O. J., Lopes, B. M., & Ferreira, C. H. (2014). Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 8–20.
- Maisiri, W. (2016). A techno-economic evaluation of a waste-to-energy grate incineration power plant for a small South African city (Doctoral dissertation, North-West University (South Africa), Potchefstroom Campus).
- Neuwahl, F., Cusano, G., Benavides, J. G., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). Best available techniques (BAT) reference document for waste incineration. Publications Office of the European Union: Luxembourg.
- Niessen, W.R. (2002). *Combustion and Incineration Process*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Nadiaratri, I. (2021). Studi keberlanjutan instalasi pengolahan sampah menjadi energi listrik (PSEL) (Studi Kasus: PSEL Bantargebang). Tugas Akhir. Jurusan Teknik Lingkungan. Institut Teknologi

- Bandung, Juli 2021
- Oumarou, M. B., Abubakar, A. B., & Abubakar, S. (2018). Municipal Solid Waste Incinerator Design: Basic Principles. *Sustainable Energy*, 6(1), 11–19.
- Prima, G. (2018). Studi Timbulan Sampah Dan Persepsi Masyarakat Dalam Pengelolaan Sampah Di Kecamatan Depok Dan Ngaglik Kabupaten Sleman Yogyakarta.
- PT. Sumber Organik. (2019). Kajian Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Gasifikasi di TPA Benowo Surabaya, Technical Report.
- Purwanta, W., & Suryanto, F. (2018). Perancangan ID fan dan cerobong pada unit Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(2).
- Qiu, L. (2012). Analysis of The Economics of Waste-to-Energy Plants in China (I). Thesis in Earth Resource Engineering. Department of Earth & Environmental Engineering. Columbia University.
- Qodriyatun, S. N. (2021). Pembangkit listrik tenaga sampah: Antara permasalahan lingkungan dan percepatan pembangunan energi terbarukan. *Aspirasi: Jurnal Masalah-Masalah Sosial*, 12(1).
- Quina, M. B. F. (2008). Treatment and use of air pollution control residues from Municipal Solid Waste incineration: An overview. *Waste Management*, 28, 2097–2121.
- Reddy, P.J. (2016). Energy Recovery from Municipal Solid Waste by Thermal Conversion Technologies. CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Sitorus, G. (2020). Tantangan dan kendala dalam mewujudkan PSEL. Tata Kelola Sampah di Indonesia. Kumpulan Materi Webinar. Dana Mitra Lingkungan.
- Tahar, N. (2022). Peningkatan kapasitas penanganan sampah nasional. Direktorat Penanganan Sampah. Ditjen PSLB3. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Widodo, S., & Firdaus, N. A. (2018). Studi Timbulan Dan Komposisi Sampah Rumah Tangga Kota Magelang. *Jurnal Georafflesia*, 3(2), 74–80.
- World Bank. (1999). Technical Guidance Report, Municipal Solid Waste Incineration, Washington, D.C. 20433, U.S.A.
- Young, G.C. (2010). Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, Canada.
- Zhang, G., Huang, X., Liao, W., Kang, S., Ren, M. & Hai, J. (2019). Measurement of Dioxin Emissions from a Small-Scale Waste Insinerator in the Absence of Air Pollution Controls. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 16, 126.