



Kementerian PPN/
Bappenas



implemented by:

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

LAPORAN KAJIAN PERBANDINGAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN AKHIR SAMPAH MENGUNAKAN ANALISIS BIAYA DAN MANFAAT



Emissions Reduction in Cities through
Improved Waste Management Project
2022



LAPORAN KAJIAN PERBANDINGAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN AKHIR SAMPAH MENGUNAKAN ANALISIS BIAYA DAN MANFAAT

PROYEK PENGURANGAN EMISI DI PERKOTAAN MELALUI PENINGKATAN PENGELOLAAN SAMPAH /EMISSIONS REDUCTION IN CITIES THROUGH IMPROVED WASTE MANAGEMENT (ERIC-DKTI)

Authors:

Pandji Prawisudha, Dr.Eng.

Layout & Design:

Agung Saputra

Photo Cover:

Pandji Prawisudha

Project:

Proyek Pengurangan Emisi di Perkotaan melalui Peningkatan Pengelolaan Sampah /Emissions Reduction in Cities through Improved Waste Management (ERIC-DKTI)

Disclaimer:

Analisis, hasil, dan rekomendasi dalam publikasi ini merupakan pendapat dari para penulis dan tidak mewakili posisi Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

▶ RINGKASAN EKSEKUTIF

Dokumen ini memaparkan hasil studi perbandingan biaya pengolahan akhir sampah kota di Indonesia, dengan fokus pada tiga jenis teknologi yang diharapkan mampu mengolah sampah kota dalam skala besar dan memiliki kemampuan reduksi volume sampah yang cukup baik, yaitu: teknologi termal Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL), teknologi penghasil Refuse Derived Fuel (RDF), dan teknologi Landfill Mining (LM). PSEL Merah Putih di Bantar Gebang Bekasi dan PSEL Benowo di Surabaya dijadikan obyek studi pembandingan untuk mewakili teknologi PSEL, sedangkan pabrik RDF di Cilacap serta TOSS Center di Klungkung Bali dijadikan obyek studi pembandingan untuk mewakili teknologi RDF. Studi mengenai teknologi LM menggunakan data lapangan pabrik skala pilot di Bantar Gebang serta data desain awal pabrik skala 1000 ton per hari yang akan dibangun di Bantar Gebang.

Teknologi pengolahan sampah secara termal (PSEL) umumnya menggunakan prinsip insinerasi dengan produk akhir berupa listrik, dapat pula menggunakan media gasifikasi atau pirolisis sebelum produk akhirnya dibakar untuk menghasilkan panas dengan produk akhir berupa listrik. Studi menunjukkan bahwa meski menunjukkan reduksi massa yang baik (85-90%), namun sekitar 70% dari massa sampah yang masuk berubah menjadi gas buang, sehingga penanganan gas buang menjadi sangat penting dalam PSEL.

Teknologi pengolahan sampah menjadi bahan bakar (RDF) mengubah fisik sampah tercampur menjadi lebih kering dan seragam sehingga lebih mudah dibakar di tungku offtaker. Reduksi massa teknologi ini cukup baik, berkisar di 70% untuk offtaker pembangkit hingga 95% untuk offtaker industri semen. Meski demikian, produk RDF yang dihasilkan hanya 45% dari total sampah yang diolah mengingat banyaknya kandungan air yang dihilangkan dalam proses. Berbeda dengan PSEL yang menghasilkan emisi gas buang hasil pembakaran sampah, pabrik RDF tidak menghasilkan emisi, karena proses pembakaran dilakukan di lokasi offtaker.

Teknologi pengolahan sampah di landfill menjadi bahan bakar (LM) serupa dengan teknologi RDF namun berpusat pada sampah yang telah berada di TPA. Kemampuan reduksi massa teknologi LM terhitung rendah, yaitu 60%, karena sekitar 40% hasil "penambangan" sampah di landfill adalah material serupa tanah yang tidak layak dijadikan bahan bakar. Namun demikian, produk yang dihasilkan diprediksi memiliki nilai kalor yang tinggi karena mayoritas berupa plastik. Serupa dengan pabrik RDF, pabrik LM

tidak menghasilkan emisi karena proses pembakaran dilakukan di lokasi offtaker.

Perbandingan teknis ketiga teknologi menunjukkan bahwa PSEL memiliki kemampuan reduksi sampah yang paling baik dengan penggunaan lahan yang paling minim untuk kapasitas pengolahan yang sama. Namun demikian, teknologi PSEL menghasilkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) lokal yang sangat tinggi bila dibandingkan RDF dan LM karena pembakaran dilakukan di lokasi, berbeda dengan RDF dan LM yang dibakar di lokasi offtaker. Dari aspek finansial, biaya modal (CAPEX) PSEL paling tinggi dibandingkan teknologi lain, meski pendapatan bersihnya (nett) sedikit lebih tinggi dibandingkan RDF dan LM.

Untuk mendapatkan penilaian yang lebih objektif, penilaian gabungan dengan pembobotan masing-masing sebesar 30% dari aspek reduksi massa dan pendapatan, 20% dari biaya modal, dan masing-masing 10% dari aspek penggunaan lahan serta emisi GRK, didapatkan bahwa nilai PSEL paling tinggi dan sedikit lebih baik daripada RDF. Hasil perhitungan ini kemudian dianalisis lebih lanjut untuk membandingkan PSEL dan RDF saja, serta diuji dalam dua skenario; Skenario 1 berupa pendanaan pembangunan dari Pemerintah Pusat dan pendanaan operasional dari Pemerintah Daerah, lalu Skenario 2 berupa pendanaan pembangunan dan operasional pabrik dari Pihak Swasta, sedangkan Pemerintah Daerah membayar biaya jasa pengolahan sampah.

Pada Skenario 1, diperoleh hasil bahwa teknologi RDF dan PSEL memiliki nilai yang sama bagi Pemerintah Daerah. Namun demikian, bagi Pemerintah Pusat, teknologi RDF memiliki nilai lebih karena biaya modal yang lebih rendah. Adapun pada Skenario 2, diperoleh hasil bahwa kedua teknologi tersebut memiliki nilai yang hampir sama bagi Pemerintah Daerah, namun bagi Pihak Swasta akan lebih baik menggunakan teknologi RDF karena biaya modal yang lebih rendah.

Perhitungan finansial dilakukan berdasarkan data dari objek studi PSEL, RDF, dan LM mencakup aspek biaya modal (Capital Expenditure, CAPEX), biaya operasional dan pemeliharaan (Operational Expenditure, OPEX), serta pendapatan dari penjualan produk atau listrik sesuai Peraturan Presiden No. 35 Tahun 2018 tentang Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolahan Sampah menjadi Energi Listrik berbasis Teknologi Ramah Lingkungan. Dalam kedua Skenario, didapati bahwa pendapatan PSEL lebih besar daripada biaya operasional, sehingga teknologi ini cocok digunakan pada Skenario 1 karena dengan demikian tidak ada

tipping fee yang ditanggung Pemerintah Daerah sebagai pengganti biaya operasional PSEL (zero tipping fee). Adapun dalam Skenario 2, pendapatan PSEL akan digunakan untuk membayar biaya operasional dan utang biaya pembangunan, sehingga tipping fee yang ditanggung Pemerintah Daerah menjadi lebih tinggi (Rp298.950,00/ton) dibandingkan saat menggunakan teknologi RDF (Rp224.210,00/ton).

Dapat disimpulkan dari kedua Skenario bahwa teknologi RDF lebih aman untuk dilaksanakan bila dilihat dari aspek teknologi, finansial dan lingkungan. Namun demikian, patut untuk digarisbawahi bahwa keberlangsungan teknologi RDF sangat bergantung kepada offtaker yang dapat bervariasi jumlah dan periode kontraknya. Selain itu, baik dalam Skenario 1 maupun 2, teknologi RDF akan tetap membutuhkan subsidi karena pendapatan dari penjualan RDF tidak cukup menanggung biaya operasional dan pemeliharaan.

Perlu dicatat bahwa meski secara lokal emisi gas buang pabrik RDF akan sangat rendah bila dibandingkan dengan PSEL, namun pembakaran RDF akan terjadi di offtaker. Regulasi dan batasan emisi gas buang serta baku mutu residu abu dari pembakaran RDF perlu dibuat sesegera mungkin, agar offtaker tidak ragu menggunakan RDF sebagai bahan bakar alternatif.

► KATA PENGANTAR

Paradigma pengelolaan sampah di Indonesia saat ini masih konvensional melalui sistem kumpul-angkut-buang sehingga menyebabkan penumpukan sampah berakhir di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) dan mempercepat habisnya umur pakai TPA di banyak kota/ kabupaten di Indonesia. Kondisi ini menjadikan Indonesia berada pada status darurat sampah yang akan menjadi bom waktu apabila tidak segera ditangani. Di sisi lain, Indonesia mulai mengenal beberapa alternatif pengolahan sampah untuk mengurangi jumlah sampah yang dibuang ke TPA seperti *thermal treatment waste to energy*, *refuse derived fuel*, dan *landfill mining*. Pemanfaatan berbagai alternatif teknologi ini mendorong diskusi, teknologi apa yang paling tepat diterapkan di suatu kota mempertimbangkan dari kesiapan dan kemampuan aspek teknis dan non teknis kota tersebut.

Pengelolaan sampah telah menjadi komitmen Pemerintah Indonesia melalui 2 (dua) agenda pembangunan pada Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020-2024, yaitu Prioritas Nasional 5: Memperkuat Infrastruktur untuk Mendukung Pengembangan Ekonomi dan Pelayanan Dasar dan Prioritas Nasional 6: Membangun Lingkungan Hidup, Meningkatkan Ketahanan Bencana dan Perubahan Iklim. Namun, pengelolaan sampah merupakan isu yang kompleks sehingga penyelesaiannya perlu dilaksanakan secara terintegrasi dari hulu ke hilir. Dalam hal pemanfaatan teknologi pemrosesan akhir sampah, aspek non teknis seperti pembiayaan dan perilaku masyarakat juga akan mempengaruhi efektivitas dan efisiensi dari operasional teknologi tersebut. Aspek-aspek tersebut misalnya, sampah yang belum terpilah, komposisi dan karakteristik sampah yang sangat beragam, konsekuensi biaya investasi dan operasional, ketersediaan *offtaker*, serta ketersediaan insentif dan kebijakan yang mendukung yang akan mempengaruhi investasi. Pemerintah, pemerintah daerah, maupun dunia usaha perlu berkolaborasi dalam implementasi teknologi pengolahan akhir sampah agar dijalankan secara efektif dan efisien.

Kerjasama Pemerintah Indonesia dan Pemerintah Jerman dalam Proyek Pengurangan Emisi di Perkotaan melalui Peningkatan Pengelolaan Sampah (*Emissions Reduction in Cities through Improved Waste Management- DKT1*) berupaya untuk memperkuat perencanaan dan implementasi kebijakan terkait pengelolaan persampahan, perbaikan tata kelola dari hulu hingga hilir, mengembangkan kondisi (*enabling environment*) yang diperlukan di tingkat nasional dan kota/kabupaten. Kajian Perbandingan Pengolahan Akhir Sampah menggunakan Analisis Biaya dan Manfaat ini diharapkan dapat membandingkan nilai kinerja teknologi pengolahan sampah dari aspek teknologi dan finansial dengan melihat dari implementasi teknologi yang sudah berjalan di Indonesia. Beberapa aspek yang dianalisis, yaitu kemampuan reduksi sampah, kebutuhan lahan spesifik, serta perbandingan biaya investasi, operasional, dan potensi pemasukan.

Kajian ini dapat menjadi rujukan dan pedoman bagi para pemangku kepentingan dan pengambil kebijakan untuk memilih teknologi yang paling tepat dan sesuai dengan kondisi di wilayah tersebut, khususnya dari sisi teknis dan finansial. Pemangku kebijakan juga dapat mempertimbangan risiko dan konsekuensi yang akan dihadapi dari implementasi teknologi yang terpilih. Dari sisi Pemerintah Pusat, kajian ini dapat memberikan masukan untuk membangun kebijakan nasional terkait teknologi pengelolaan sampah yang lebih berbasis data dan kajian (*evidence-based*). Pemilihan teknologi yang tepat akan meningkatkan kinerja pengelolaan sampah di wilayah tersebut serta memberikan manfaat ekonomi, sosial, dan lingkungan.

Jakarta, Juli 2023
Direktorat Lingkungan Hidup

▶ DAFTAR ISI

RINGKASAN EKSEKUTIF	4
KATA PENGANTAR	6
DAFTAR ISI	8
DAFTAR GAMBAR	11
DAFTAR TABEL	12

1

PENDAHULUAN

15

1.1	Latar Belakang	16
1.2	Tujuan	18
1.3	Ruang Lingkup	18
1.4	Sistematika Penulisan	18

2

TEKNOLOGI PENGOLAHAN SAMPAH

21

2.1	Pengelolaan Sampah Secara Umum di Indonesia	22
2.1.1	Paradigma kumpul-angkut-buang	22
2.1.2	<i>Sanitary Landfill</i>	24
2.1.3	<i>MRF-based Treatment</i>	24
2.2	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	25
2.2.1	Teknologi PSEL	25
2.2.2	Kesetimbangan Massa dan Energi PSEL	27
2.3	<i>Refuse-Derived Fuel (RDF)</i>	28
2.3.1	Teknologi RDF	28
2.3.2	Kesetimbangan Massa dan Energi <i>RDF Plant</i>	29
2.4	<i>Landfill Mining</i>	30
2.4.1	Teknologi <i>Landfill Mining</i>	30
2.4.2	Kesetimbangan Massa dan Energi <i>Landfill Mining</i>	31
2.5	Pengolahan Sampah dengan Teknologi Termal di Indonesia	32

3

PERBANDINGAN TEKNIS
PENGOLAHAN SAMPAH

35

3.1	Teknologi dan Skala Pengolahan	36
3.1.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	36
3.1.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	38
3.1.3	<i>Landfill Mining</i>	40
3.2	Pengurangan Volume Sampah	40
3.2.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	40
3.2.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	41
3.2.3	<i>Landfill Mining</i>	41
3.3	Konstruksi dan Kebutuhan Lahan	42
3.3.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	42
3.3.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	43
3.3.3	<i>Landfill Mining</i>	44
3.4	Tantangan Setiap Jenis Pengolahan Sampah	45
3.4.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	45
3.4.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	46
3.4.3	<i>Landfill Mining</i>	46

4

PERBANDINGAN ASPEK
FINANSIAL PENGOLAHAN
SAMPAH

49

4.1	Alur Pembiayaan	50
4.1.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	50
4.1.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	51
4.1.3	<i>Landfill Mining</i>	51
4.2	CAPEX	52
4.2.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	53
4.2.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	53
4.2.3	<i>Landfill Mining</i>	53

4.3	OPEX	54
4.3.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	54
4.3.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	55
4.3.3	<i>Landfill Mining</i>	55
4.4	Revenue	56
4.4.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	56
4.4.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	57
4.4.3	<i>Landfill Mining</i>	57
4.5	Pembiayaan dari Pihak Terkait	57
4.5.1	Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)	57
4.5.2	<i>Refuse Derived Fuel</i>	59
4.5.3	<i>Landfill Mining</i>	60

5	ANALISIS TEKNOLOGI DAN PEMBIAYAAN	65
5.1	Analisis Teknologi Optimal	66
5.2	Skema Pembiayaan Optimal	68
5.3	Analisis Sensitivitas Pembiayaan	70

6	KESIMPULAN DAN REKOMENDASI	73
6.1	Kesimpulan	74
6.2	Rekomendasi	74

▶ DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1	Timbulan sampah di kota-kota di Indonesia (ton/tahun)	16
Gambar 1-2	Kondisi TPST Bantargebang	16
Gambar 1-3	RDF <i>plant</i> Cilacap	17
Gambar 2-1	Skema Kumpul – Angkut – Buang	22
Gambar 2-3	Pengelolaan sampah konvensional	23
Gambar 2-4	Hierarki pengelolaan sampah	23
Gambar 2-5	Skema PSEL Insinerasi	25
Gambar 2-6	Skema PSEL gasifikasi	26
Gambar 2-7	Kesetimbangan massa PSEL	27
Gambar 2-8	Kesetimbangan energi PSEL	28
Gambar 2-9	Sistem pengolahan di fasilitas RDF <i>plant</i>	29
Gambar 2-10	Kesetimbangan massa RDF <i>plant</i>	30
Gambar 2-11	Kesetimbangan massa <i>landfill mining</i>	31
Gambar 2-12	Kesetimbangan energi <i>landfill mining</i>	32
Gambar 2-13	Posisi pengolahan sampah PSEL, RDF, dan LM	33
Gambar 3-1	Diagram proses PSEL (PLTSa) di TPST Bantargebang	37
Gambar 3-2	Alur pemrosesan sampah menjadi listrik di PSEL Benowo	37
Gambar 3-3	Alur pengolahan di RDF <i>plant</i> Cilacap	39
Gambar 3-4	Alur Landfill Mining di TPST Bantargebang	40
Gambar 3-5	Lahan PSEL Merah Putih	42
Gambar 3-6	Lahan PSEL Benowo	42
Gambar 3-7	Lahan RDF <i>plant</i> Cilacap	43
Gambar 3-8	Lahan RDF <i>plant</i> Klungkung	43
Gambar 3-9	Skenario <i>landfill mining</i> di TPST Bantargebang	44
Gambar 3-10	Lokasi <i>landfill mining</i> di TPST Bantargebang	44
Gambar 4-1	Aliran biaya masuk dan keluar pada PSEL	50
Gambar 4-2	Aliran biaya masuk dan keluar pada RDF <i>plant</i>	51
Gambar 4-3	Aliran biaya masuk dan keluar pada <i>landfill mining</i>	52
Gambar 5-1	Besar biaya subsidi PSEL (WtE), RDF, LM dan RDF saat harga jual berubah dalam Skenario 1	70
Gambar 5-2	Besar subsidi PSEL (WtE), RDF, LM dan RDF saat harga jual berubah dalam Skenario 2.	70

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1	Perbandingan teknis pengolahan sampah	36
Tabel 4-1	Perbandingan CAPEX pengolahan sampah	52
Tabel 4-2	Perbandingan OPEX pengolahan sampah	54
Tabel 4-3	Perbandingan <i>revenue</i> pengolahan sampah	56
Tabel 4-4	Pembiayaan CAPEX oleh pemerintah pusat	58
Tabel 4-5	Pembiayaan OPEX oleh pemerintah daerah	58
Tabel 4-6	Pembiayaan <i>tipping fee</i> oleh pemerintah daerah	59
Tabel 4-7	Pembiayaan CAPEX dan OPEX oleh swasta	59
Tabel 4-8	Data Finansial Teknologi Pengolahan Sampah	60
Tabel 4-9	Perbandingan Finansial Pengolahan Sampah Skenario 1 (nilai saat ini)	61
Tabel 4-10	Perbandingan Finansial Pengolahan Sampah Skenario 1	61
Tabel 4-11	Perbandingan Finansial Pengolahan Sampah Skenario 2	62
Tabel 5-1	Pembobotan CAPEX	66
Tabel 5-2	Pembobotan CAPEX dan <i>revenue</i>	66
Tabel 5-3	Pembobotan lahan	67
Tabel 5-4	Pembobotan reduksi sampah	67
Tabel 5-5	Pembobotan GHG	67
Tabel 5-6	Total pembobotan	68
Tabel 5-7	Pembobotan pembiayaan CAPEX oleh pemerintah pusat	68
Tabel 5-8	Pembobotan pembiayaan OPEX oleh pemerintah daerah	68
Tabel 5-9	Pembobotan pembiayaan CAPEX dan OPEX oleh swasta	69
Tabel 5-10	Pembobotan pembiayaan <i>tipping fee</i> oleh pemerintah daerah	69

1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

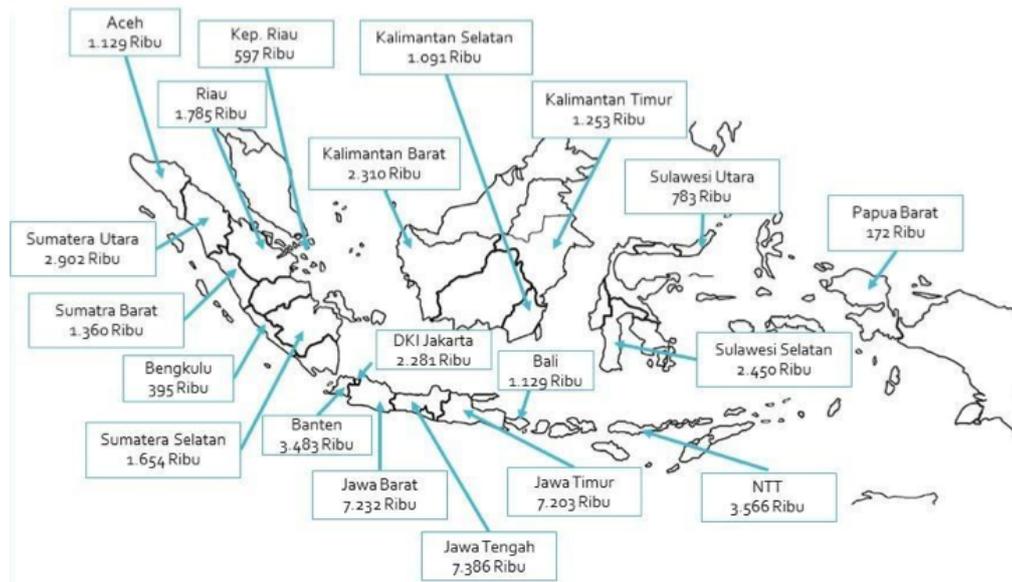
1.2 Tujuan

1.3 Target Pengguna

1.4 Sistematika Penulisan

1.1 LATAR BELAKANG

Masalah sampah merupakan salah satu masalah utama yang dihadapi oleh Indonesia. Setiap orang menghasilkan sampah beragam mulai dari 0,5 hingga 0,8 kg/hari. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, pada tahun 2019 tercatat jumlah timbulan sampah di Indonesia mencapai 175.000 ton/hari atau sekitar 64 juta ton/tahun. Persebaran timbulan sampah di kota-kota di Indonesia dalam satuan ton/tahun dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1-1
Timbulan sampah di kota-kota di Indonesia (ton/tahun)
Sumber: SIPSN, 2018 diolah lebih lanjut

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, pada tahun 2025 ditargetkan pengurangan sampah sebesar 30% dan penanganan sampah sebesar 70% dari seluruh timbulan sampah. Menurut data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), pada tahun 2020 persentase pengurangan sampah yang tercapai yaitu sebesar 13,09% dan penanganan sampah

sebesar 42,33%. Hal ini menunjukkan masih ada timbulan sampah yang tidak terkelola sebesar 44,58%.

Untuk mengatasi masalah timbulan sampah ini, pemerintah telah membangun beberapa alternatif pemrosesan sampah untuk mengurangi jumlah sampah yang dibuang langsung ke TPA, antara lain menggunakan teknologi Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL), *Landfill Mining* (LM), dan *Refuse Derived Fuel* (RDF). Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL) dan *landfill mining* telah dibangun di Tempat Pemrosesan Sampah Terpadu (TPST) Bantargebang. Adapun RDF *plant* saat ini telah beroperasi di Kabupaten Cilacap. Proses yang dipilih yaitu pemanfaatan sampah menjadi energi listrik dan pengganti batubara berbasis teknologi ramah lingkungan.

TPST Bantargebang merupakan fasilitas pemrosesan akhir sampah yang menampung sampah dari Provinsi DKI Jakarta. Fasilitas ini telah beroperasi sejak 1989 dengan luas mencapai 110,3 ha yang dibagi menjadi 5 zona dan



Gambar 1-2
Kondisi TPST Bantargebang
Sumber: Kompas.com

prasarana seperti jalan serta instalasi pengolahan lindi. Menurut DLH Provinsi DKI Jakarta, pada tahun 2019 rata-rata berat sampah yang masuk ke TPST Bantargebang yaitu sebesar 7.702 ton/hari.

Terdapat dua jenis pemrosesan pada TPST Bantargebang yaitu PSEL dan Landfill Mining. Pada tahun 2018, PSEL di TPST Bantargebang selesai dibangun. PSEL ini menggunakan teknologi termal dengan kapasitas pengolahan sampah sebesar 100 ton/hari dan menghasilkan listrik sebesar 700 kW. Listrik tersebut selanjutnya digunakan untuk pengoperasian internal unit. Selain PSEL, TPST Bantargebang juga menerapkan metode pengolahan Landfill Mining yaitu penggalian sampah lama. Setelah ditambang, dilakukan pre-treatment terhadap sampah tersebut.

Hasil dari pre-treatment tersebut yaitu tanah, kompos, RDF, dan sampah yang bisa didaur ulang. Pada tahun 2020, sebanyak 7.700 ton RDF telah berhasil dikirim ke PT Solusi Bangun Indonesia, Indocement, dan PSEL Bantargebang.

Sementara itu, RDF plant di Cilacap merupakan RDF plant pertama di Indonesia yang dibangun pada tahun 2020 dengan luas bangunan sebesar 1,5 ha. Lokasi RDF plant ini berada di TPA Tritih Lor, Kabupaten Cilacap. RDF plant Cilacap saat ini beroperasi dengan kapasitas pengolahan 136 ton/hari dengan produk RDF sebanyak 40 – 50 ton/hari dan sampah daur ulang sebanyak 3 – 5 ton/hari. Penanggung jawab operasional dan offtaker dari RDF plant ini adalah PT Solusi Bangun Indonesia.



Gambar 1-3
RDF plant Cilacap
Sumber: gatra.com

Dua lokasi tersebut merupakan contoh pemrosesan sampah yang dapat diterapkan di Indonesia. Namun demikian, pembiayaan masih menjadi permasalahan yang menghambat penerapan teknologi secara luas. Pemerintah telah menerapkan mekanisme insentif dan regulasi yang dapat mengurangi beban pembiayaan. Pemilihan teknologi yang menghasilkan manfaat, baik dari sisi pengurangan sampah dan keuntungan dari sisi ekonomi merupakan prioritas pemerintah saat ini. Untuk mendukung hal tersebut dibutuhkan kajian lanjutan, terutama di bagian pembiayaan untuk teknologi PSEL, Landfill Mining, dan RDF plant untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi penanganan sampah di Indonesia. Hasil kajian ini selanjutnya dapat dijadikan masukan untuk analisis aspek finansial pada penerapan teknologi waste-to-energy di Indonesia sehingga penerapan teknologi tersebut dapat menjadi sistem pengolahan sampah yang optimal dan berkelanjutan.



1.2 TUJUAN

Tujuan disusun Kajian Analisis Pembiayaan Penerapan Teknologi Pengolahan Sampah yaitu:

1. Membandingkan teknologi pengolahan sampah berdasarkan pembiayaan dan potensi keuntungan
2. Memberikan rekomendasi teknologi pengolahan sampah untuk kondisi saat ini di Indonesia
3. Memberikan rekomendasi terkait langkah selanjutnya untuk menyusun analisis pembiayaan yang komprehensif untuk implementasi teknologi pengolahan sampah di Indonesia

1.3 RUANG LINGKUP

Lingkup penyusunan Kajian Analisis Pembiayaan Penerapan Teknologi Pengolahan Sampah meliputi:

1. Identifikasi kondisi PSEL, *Landfill Mining*, dan RDF plant saat ini dari aspek teknis dan pembiayaan;
2. Identifikasi, perhitungan, dan perbandingan biaya dari teknologi tersebut;
3. Perhitungan potensi keuntungan yang didapatkan dari teknologi tersebut;
4. Identifikasi tantangan dan peluang penerapan teknologi pengolahan sampah di Indonesia;
5. Rekomendasi teknologi yang sesuai dengan kondisi di Indonesia saat ini

1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Pada laporan ini terdapat 6 (enam) bab yang akan menjelaskan mengenai data-data dan analisis perbandingan pembiayaan teknologi PSEL, *Landfill Mining*, dan RDF plant. Bab pertama akan menjelaskan latar belakang, tujuan, dan ruang lingkup dari kajian ini. Bab 2 berisi tentang penjelasan umum mengenai pengelolaan sampah di Indonesia, penjelasan mengenai teknologi PSEL, *Landfill Mining*, dan RDF plant, serta penerapan teknologi yang telah digunakan di Indonesia. Bab 3 selanjutnya menjelaskan mengenai perbandingan teknis dari teknologi PSEL, *Landfill Mining*, dan RDF *plant*. Bab 4 berisi perbandingan pembiayaan dari teknologi-teknologi pengolahan sampah yang telah ada di Indonesia. Bab 5 akan menjelaskan tentang analisis dari perbandingan teknis dan pembiayaan teknologi-teknologi tersebut dalam bentuk pembobotan. Bab 6 akan berisi rekomendasi terkait teknologi yang sesuai dengan kondisi di Indonesia saat ini.

2

TEKNOLOGI PENGOLAHAN SAMPAH

2.1 Pengelolaan Sampah Secara Umum di Indonesia

2.2 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

2.3 *Refuse-Derived Fuel (RDF)*

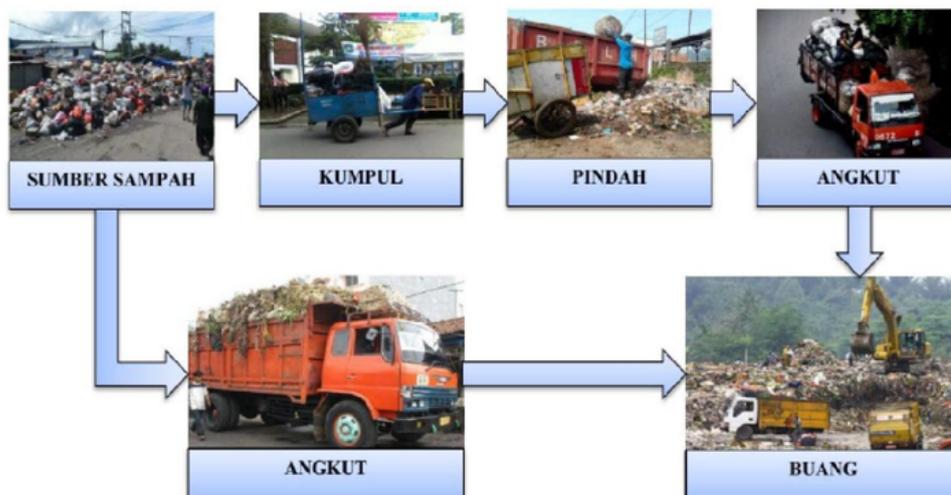
2.4 *Landfill Mining*

2.5 Pengolahan Sampah dengan Teknologi Termal di Indonesia

2.1 PENGELOLAAN SAMPAH SECARA UMUM DI INDONESIA

2.1.1 Paradigma kumpul-angkut-buang

Hingga saat ini, cara pengelolaan sampah yang masih banyak yaitu dengan sistem kumpul – angkut – buang. Skema pengelolaan sampah ini dapat dilihat pada Gambar 2-1. Metode ini masih digunakan karena pengoperasiannya mudah dan murah. Namun demikian, hal ini akan menimbulkan masalah baru saat kapasitas Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) penuh dan tidak dapat menampung sampah lagi.

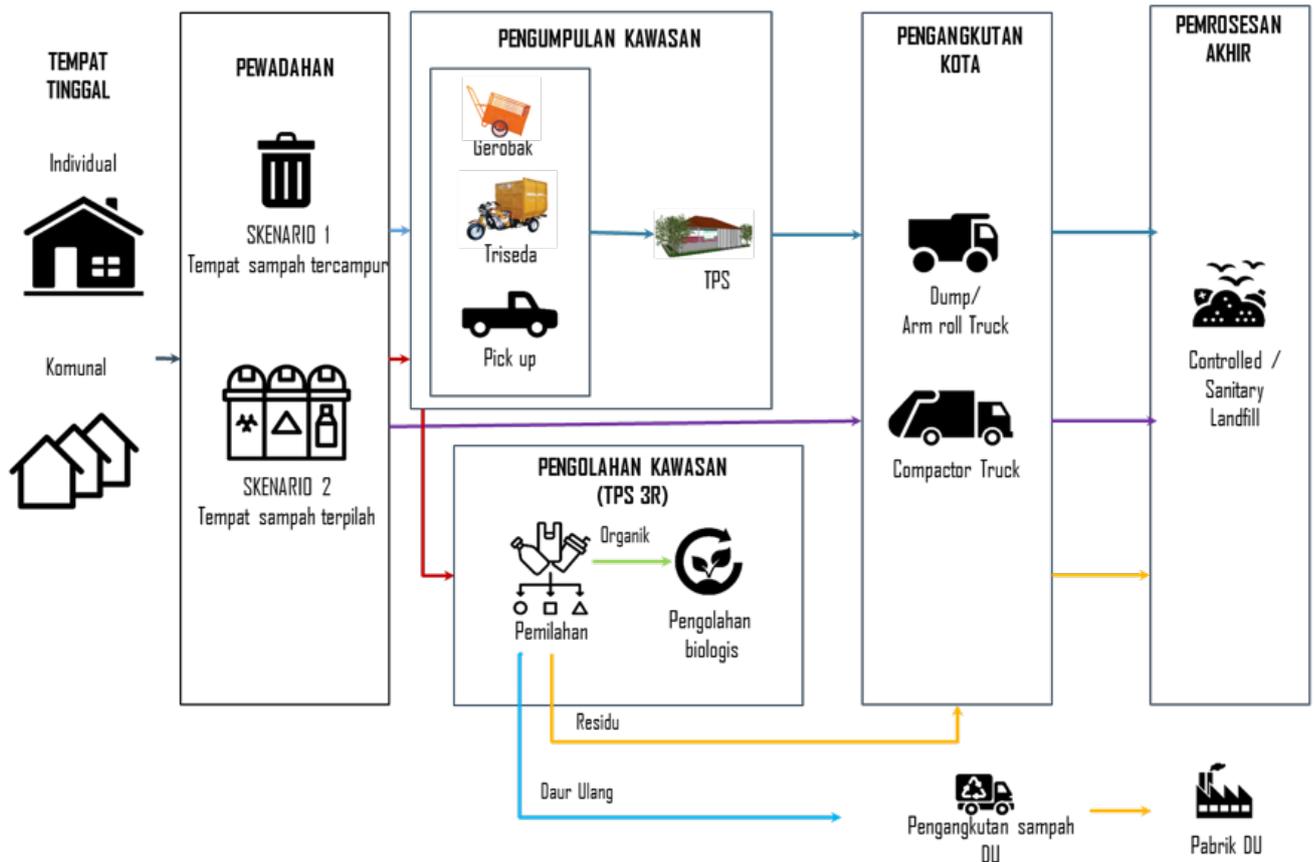


Gambar 2-1
Skema Kumpul – Angkut – Buang
Sumber: etd.repository.ugm.ac.id

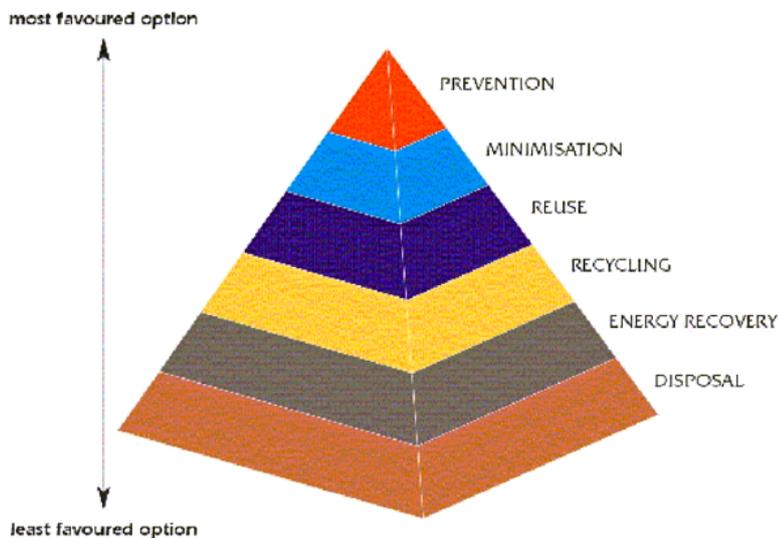
Pengelolaan sampah secara konvensional dapat dilihat pada Gambar 2-2. Sampah dari tempat tinggal ditampung dalam sistem pewadahan yang terbagi menjadi 2 skenario. Skenario 1 yaitu pewadahan tanpa ada pemilahan sehingga semua jenis sampah tercampur menjadi satu. Dalam skenario 1, sampah yang telah ditampung di tempat tinggal, selanjutnya dikumpulkan dengan beberapa opsi pengangkutan dan langsung dibawa ke Tempat Penampungan Sementara (TPS) atau Tempat Pemrosesan Akhir Sampah berbasis Reduce Reuse Recycle (TPS3R). Sampah yang masuk ke TPS selanjutnya diangkut dengan alat pengangkutan yang lebih besar seperti arm roll truck dan compactor truck menuju TPA, sedangkan sampah yang masuk ke TPS3R selanjutnya dipilah menjadi sampah daur ulang, residu, dan sampah organik. Sampah organik lalu diolah dengan metode biologis menjadi kompos, sampah daur ulang dapat dijual, dan sampah residu langsung diangkut ke TPA.

Sementara itu, pada skenario 2, dilakukan pemilahan dalam sistem pewadahan. Sampah yang dapat diolah dan didaur ulang dapat langsung masuk ke TPS3R, sementara untuk residu langsung diangkut ke TPA. Sistem pengelolaan sampah konvensional ini menunjukkan bahwa hampir seluruh sampah yang diangkut dari tempat tinggal akan masuk ke TPA.





Gambar 2-2
Pengelolaan sampah konvensional



Gambar 2-3
Hierarki pengelolaan sampah
Sumber: Waste Management Benchmarking Study, 2006

Biaya pembukaan lahan yang semakin lama semakin mahal dan sindrom NIMBY (Not in My Backyard) dimana warga sekitar tidak ingin lingkungannya dijadikan TPA akan memperburuk keadaan. Selain itu cara penyingkiran sampah tersebut mempunyai banyak resiko terutama kemungkinan adanya pencemaran air tanah. Penyingkiran dan pemusnahan sampah atau limbah padat lainnya ke dalam tanah merupakan cara yang selalu digunakan, karena alternatif pengolahan lain belum dapat menuntaskan permasalahan yang ada. Oleh karena itu pengolahan sampah dengan waste to energy diharapkan merupakan salah satu solusi terhadap permasalahan persampahan perkotaan saat ini. Hierarki pengelolaan sampah memberikan gambaran kegiatan yang dapat dilakukan terlebih dahulu sebelum sampah diproses di TPA. Hierarki pengelolaan sampah seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2-3. Material yang tidak dapat digunakan kembali dan tidak dapat didaur ulang kemudian dilakukan tahap berikutnya dengan pemulihan energi (energy recovery). Energy recovery dapat menghasilkan energi yang terbarukan atau non-terbarukan, pemulihan material-material organik, dan mencegah sampah untuk dibuang langsung ke TPA.

2.1.2 Sanitary Landfill

Mengacu kepada Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 3 Tahun 2013, metode Lahan Urug Saniter (*Sanitary Landfill*) adalah metode pengurugan di area pengurugan sampah yang disiapkan dan dioperasikan secara sistematis, dengan penyebaran dan pemadatan sampah pada area pengurugan serta penutupan sampah setiap hari. Sebagai perantara menuju ke kondisi saniter dari pembuangan terbuka (*open dumping*), dikenal pula Metode Lahan Urug Terkendali. Perbedaan kedua metode ini secara sederhana terletak pada frekuensi dan metode pengurugan sampah.

Secara umum, proses pengelolaan sampah yang berjalan dengan metode *Sanitary Landfill* meliputi proses penimbunan/pemadatan, penutupan tanah, pengolahan lindi, dan penanganan gas. Pada dasarnya, *Sanitary Landfill* lebih merujuk kepada teknis tata kelola Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Adapun pengolahan sampah pada metode ini hanya bergantung pada sistem pengolahan sampah yang dilakukan sebelum sampah diangkut ke TPA.

Dalam studi ini, pengolahan sampah dengan metode *Sanitary*

Landfill merujuk pada pengertian pola kumpul-angkut-buang dengan TPA yang menerapkan tata kelola lahan urug saniter. Terdapat proses pemadatan (*compaction*) dan *settlement* yang terjadi di lahan urug *saniter*, baik dengan bantuan mekanis maupun terjadi secara alami. Namun demikian, tidak ada proses pengolahan yang mengurangi jumlah sampah sebelum masuk ke lahan urug.

Sampah yang masuk ke dalam *sanitary landfill* akan mengalami pengurangan volume dengan proses dekomposisi secara aerob maupun anaerob. Proses tersebut bergantung pada aktivitas mikroba yang mengonsumsi karbon yang terdapat pada sampah organik dan mengubahnya menjadi air lindi dan gas yang menjadi perhatian, antara lain amonia (NH₃), sulfide (H₂S), metana (CH₄), dan karbondioksida (CO₂). Proses pengurangan volume yang bergantung pada proses biologi akan membutuhkan waktu yang lama dengan pengurangan yang sangat kecil, sehingga metode *sanitary landfill* ini akan membutuhkan lahan yang besar. Namun demikian, tidak diperlukan peralatan pengolahan mekanis pada proses ini. Metode *sanitary landfill* ini pada umumnya tidak menghasilkan produk apapun.

2.1.3 MRF-based Treatment

Material Recovery Facility (MRF) pada dasarnya adalah fasilitas pengolahan sampah untuk memisahkan material yang dapat didaur ulang dalam sampah dan mengolah material tersebut hingga siap disalurkan kepada *offtaker*. Proses pengolahan sampah yang terjadi pada fasilitas MRF sangat bervariasi, secara umum terdiri dari proses pemilahan, pencacahan, dan kompaksi dari material daur ulang. Beberapa fasilitas MRF juga dilengkapi sarana pencucian material.

MRF dalam studi ini merujuk pada fasilitas pengelolaan sampah sebelum sampah masuk ke TPA yang terdiri dari pemilahan material daur ulang secara manual maupun dengan bantuan peralatan mekanis. Komponen-komponen peralatan yang digunakan dapat berupa *bag opener*, *trommel screen*, pemisah logam, dan peralatan pemilahan lainnya. Material daur ulang yang dipilah yaitu material yang masih memiliki nilai jual, seperti plastik PET, logam, kaca, dan kertas dalam kondisi kering dan bersih. Material-material tersebut berjumlah sangat kecil dibandingkan dengan jumlah sampah keseluruhan, sehingga pengurangan sampah yang terjadi pada fasilitas pemilahan MRF yaitu hanya sekitar 10% dengan sisa sampah yang tidak terpilah akan

langsung dikirim ke TPA. Namun demikian, pengurangan sampah tersebut tetap dapat mengurangi sampah yang masuk ke TPA dibandingkan metode *sanitary landfill*, sehingga akan mengurangi kebutuhan lahan. Selain itu, jika dibandingkan dengan metode *sanitary landfill*, *MRF-based treatment* dapat menghasilkan keuntungan dari hasil penjualan material daur ulang.



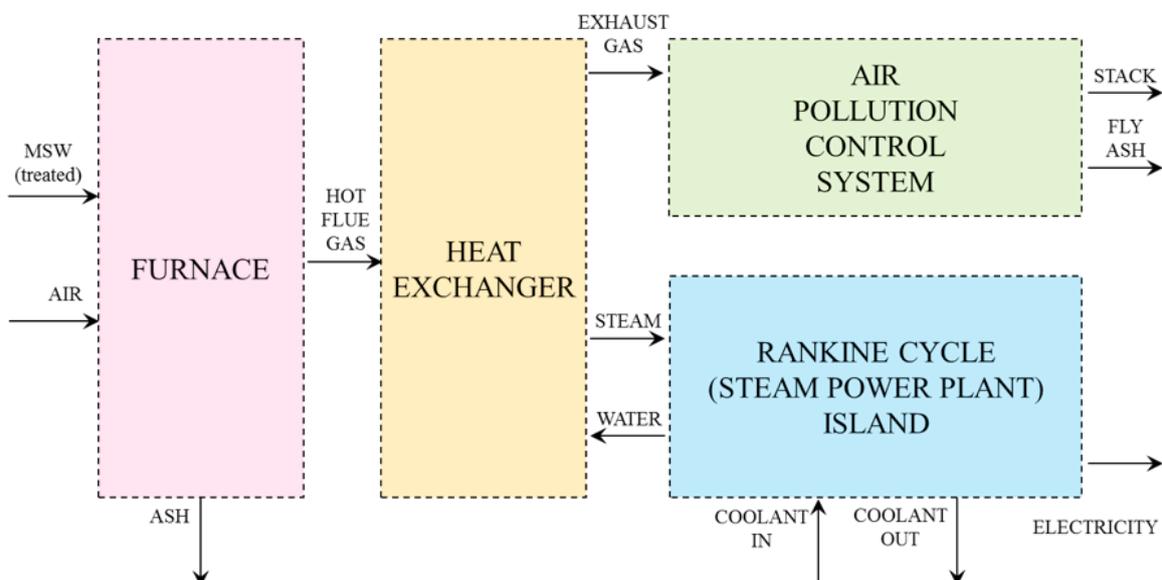
2.2 PENGOLAH SAMPAH MENJADI ENERGI LISTRIK (PSEL)

2.2.1 Teknologi PSEL

Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL) merupakan pengolah sampah menggunakan proses termal untuk menghasilkan panas dan membangkitkan listrik. Teknologi termal yang umum digunakan pada PSEL yaitu insinerasi dan gasifikasi. Pada umumnya, diperlukan perlakuan awal pada sampah sesuai dengan kebutuhan masing-masing teknologi tersebut.

a. Insinerasi

Insinerasi merupakan salah satu teknologi yang memerlukan cukup udara secara terus menerus pada temperatur tinggi. Proses insinerasi dapat mengurangi volume sampah dan menghilangkan material berbahaya. Proses ini juga menghasilkan gas panas (flue gas) yang dapat dimanfaatkan sebagai energi pada pembangkit listrik. Pada insinerator, temperatur pembakaran umumnya mencapai 800 °C – 1000 °C. Skema proses pada PSEL dengan insinerator dapat dilihat pada Gambar 2-4. Komponen utama pada PSEL insinerasi yaitu bagian tungku pembakaran, sistem penanganan gas buang, boiler, turbin uap, dan generator



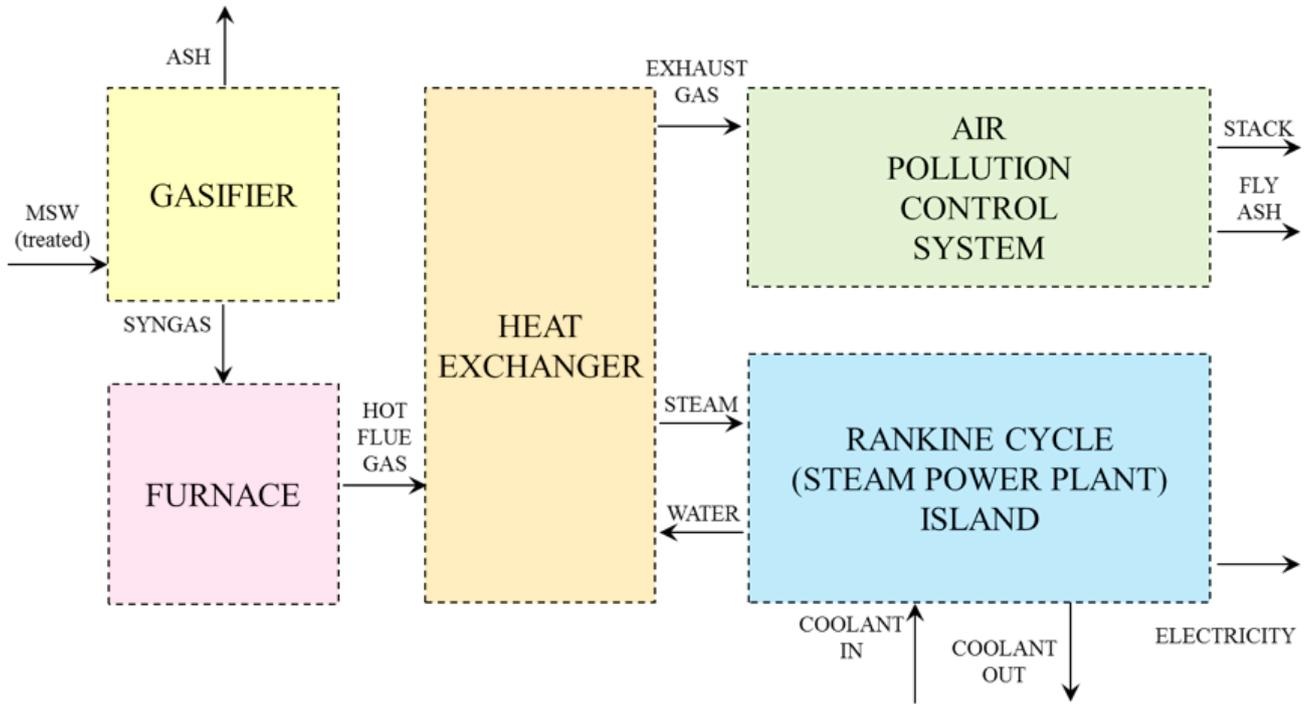
Gambar 2-4
Skema PSEL Insinerasi

Proses pada PSEL insinerasi dimulai saat sampah masuk ke dalam penampungan awal sebelum masuk ke dalam insinerator. Selanjutnya dilakukan perlakuan awal terhadap sampah seperti pemilahan dan homogenisasi. Pemilahan bertujuan untuk memisahkan sampah yang masih dapat didaur ulang, sementara homogenisasi bertujuan untuk menyamakan kondisi sampah yang masuk seperti contohnya ukuran.

Setelah perlakuan awal, sampah masuk ke dalam insinerator untuk proses pembakaran. Saat pembakaran, dihasilkan gas panas yang selanjutnya ditangkap oleh boiler untuk memanaskan air hingga menjadi uap. Uap tersebut selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Putaran dari turbin tersebut lalu diubah menjadi listrik oleh generator. Listrik yang dihasilkan tersebut dapat digunakan untuk keperluan listrik pada PSEL sendiri dan juga untuk masyarakat.

b. Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses oksidasi parsial dengan kondisi oksigen yang terbatas. Material yang masuk pada proses gasifikasi mengalami pembakaran tidak sempurna pada temperatur 500°C – 1800°C (Helsen & Bosmans). Produk utama yang dihasilkan dari proses ini yaitu Synthetic Natural Gas (syngas) yang mengandung CO, CO₂, H₂, H₂O, dan CH₄. Syngas dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar pada PSEL dengan menggunakan gas engine, boiler dengan bahan bakar gas, atau turbin gas. Contoh alur pengolahan sampah pada PSEL gasifikasi ditunjukkan pada Gambar 2-5



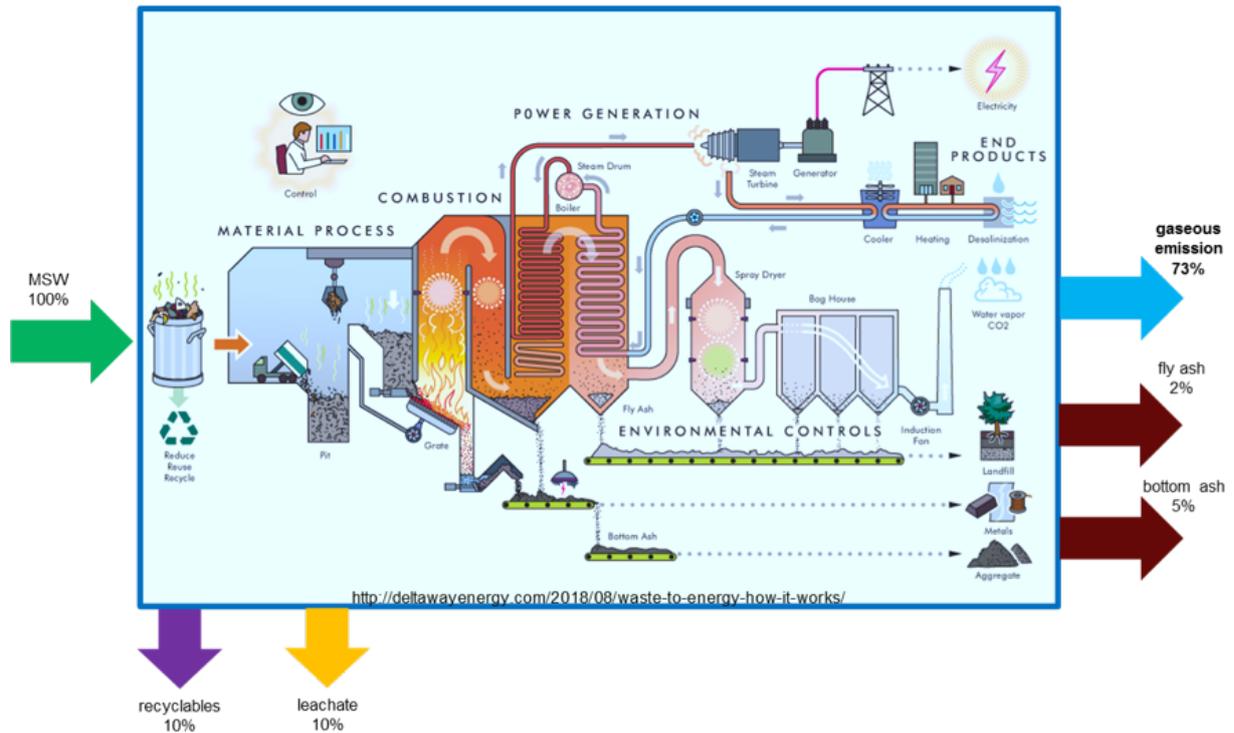
Gambar 2-5
Skema PSEL gasifikasi

Proses gasifikasi umumnya memerlukan sampah yang telah melalui proses perlakuan awal. Proses yang diperlukan yaitu pemilahan, pengeringan, dan pencacahan. Pemilahan bertujuan untuk memisahkan sampah yang tidak dapat diproses pada reaktor gasifikasi. Sementara itu, pengeringan diperlukan untuk mengurangi kandungan air agar efisiensi termal proses gasifikasi menjadi lebih tinggi dan untuk menjaga komposisi gas yang dihasilkan. Pencacahan juga dapat dilakukan untuk mereduksi ukuran sampah yang masuk, sehingga permukaan sampah menjadi lebih besar dan meningkatkan kemampuan perpindahan panas. Perlakuan awal ini bertujuan untuk menyamakan kondisi sampah masuk sehingga produk yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik.

Proses gasifikasi menghasilkan syngas yang selanjutnya dapat dibakar di tungku pembakaran. Panas yang dihasilkan selanjutnya dimanfaatkan untuk menguapkan air di boiler hingga menghasilkan uap air. Uap air tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin yang selanjutnya diubah menjadi listrik oleh generator.

2.2.2 Keseimbangan Massa dan Energi PSEL

Proses pengolahan sampah menggunakan teknologi termal dapat mereduksi sampah dalam jumlah yang besar dan waktu yang singkat. Keseimbangan massa pada PSEL dapat dilihat pada Gambar II 6. Terdapat input material dari PSEL yaitu sampah rumah tangga (MSW) dan beberapa output berupa sampah daur ulang, air lindi, emisi gas buang, *fly ash*, dan *bottom ash*. Pada proses *pretreatment* terdapat material yang keluar yaitu sampah daur ulang sebesar 10% dan air lindi sebesar 10%. Sementara itu, dari proses pembakaran terdapat material yang keluar berupa emisi gas buang hasil pembakaran sebesar 73% dan sisa abu berupa *fly ash* dan *bottom ash* sebanyak 2% dan 5%.

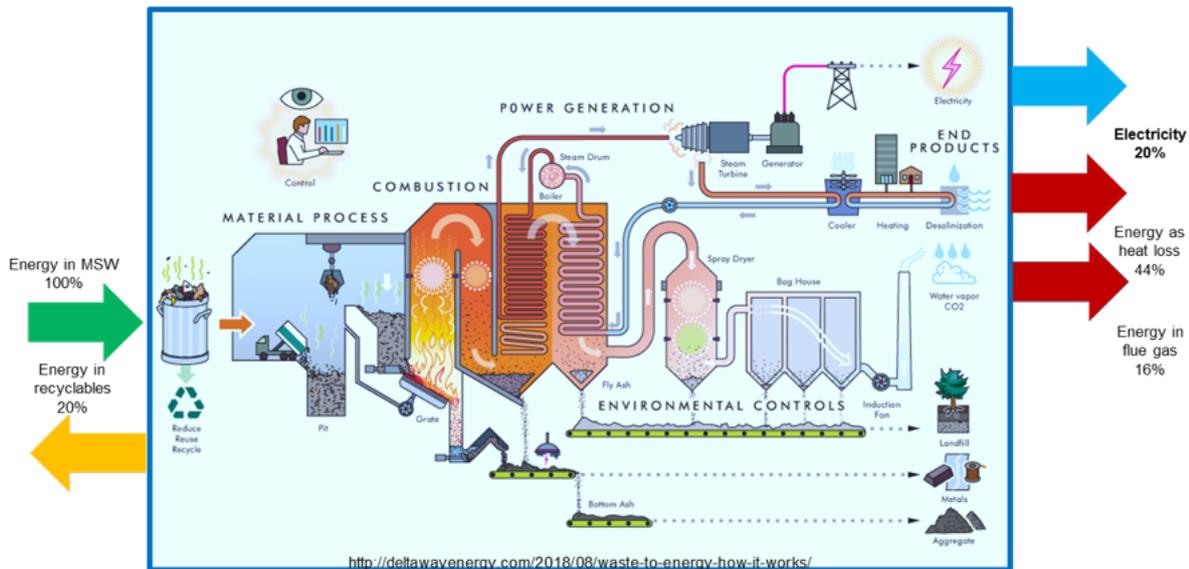


Gambar 2-6
Keseimbangan massa PSEL

Keseimbangan massa ini didasarkan pada perhitungan PSEL dengan kapasitas 1500 tpd. Dari keseimbangan massa tersebut dapat dilihat bahwa sebagian besar sampah yang masuk ke dalam PSEL akan berubah menjadi emisi gas buang. Kandungan dari emisi gas buang ini sebagian besar berupa gas rumah kaca. Keseimbangan massa pada Gambar II 6 berlaku pada proses termal dengan metode insinerasi maupun gasifikasi.

Selain keseimbangan massa, PSEL juga dapat ditinjau dari perbandingan energi masuk dan keluar. Keseimbangan energi dari PSEL dapat dilihat pada Gambar 2-7. Perhitungan keseimbangan energi ini berdasarkan pada PSEL dengan kapasitas 1500 tpd. Input energi dari PSEL 100% berasal dari sampah rumah tangga yang masuk. Listrik yang dihasilkan hanya sebesar 20% dari seluruh potensi yang terdapat dalam sampah. Sisa energi lainnya keluar bersama sampah daur ulang yang terpillah sebesar 20%. Selain itu terdapat energi yang hilang dari rugi-rugi panas dan gas buang dengan persentase masing-masing 44% dan 16%.





Gambar 2-7
Keseimbangan energi PSEL

2.3 REFUSE-DERIVED FUEL (RDF)

2.2.3 Teknologi RDF

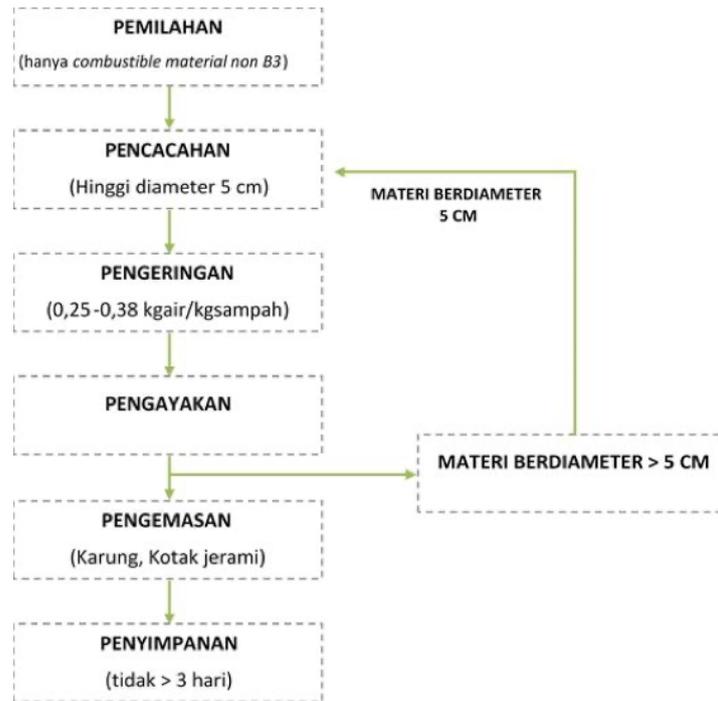
Refuse Derived Fuel (RDF) adalah hasil proses pemisahan limbah padat antara fraksi sampah dapat terbakar dan tidak dapat terbakar seperti metal dan kaca (Cheremisinoff, 2003). RDF dihasilkan dari pemisahan mekanis fraksi yang dapat terbakar (*combustible fraction*) dan fraksi sampah yang sulit dibakar (*non-combustible fraction*) dari sampah (McDougall, White, Franke, & Hindle, 2001).

Terdapat dua jenis material yang memberikan kontribusi nilai kalor RDF, yaitu material yang memiliki nilai kalor yang tinggi dan rendah. Contoh dari material yang memberikan nilai kalor tinggi antara lain adalah kertas, plastik, karet, kain/tekstil, dan kayu. Sementara itu, material yang memiliki nilai kalor rendah yaitu material yang mudah membusuk dan memiliki kandungan air tinggi, misalnya sampah basah organik.

Pengolahan sampah menjadi RDF dimulai ketika sampah masuk ke dalam fasilitas pengolahan sampah, dilanjutkan dengan pengkondisian sampah dengan beberapa perlakuan sampai dengan penyimpanan. Kondisi sampah yang masuk ke fasilitas pengolahan sampah umumnya mengandung kadar air yang cukup tinggi sehingga nilai kalor yang terkandung belum memenuhi

kriteria minimum sebagai bahan bakar. Untuk memenuhi kriteria minimum, maka sampah perlu dikondisikan dengan beberapa tahapan perlakuan awal seperti pemilahan, reduksi ukuran, dan pengeringan.

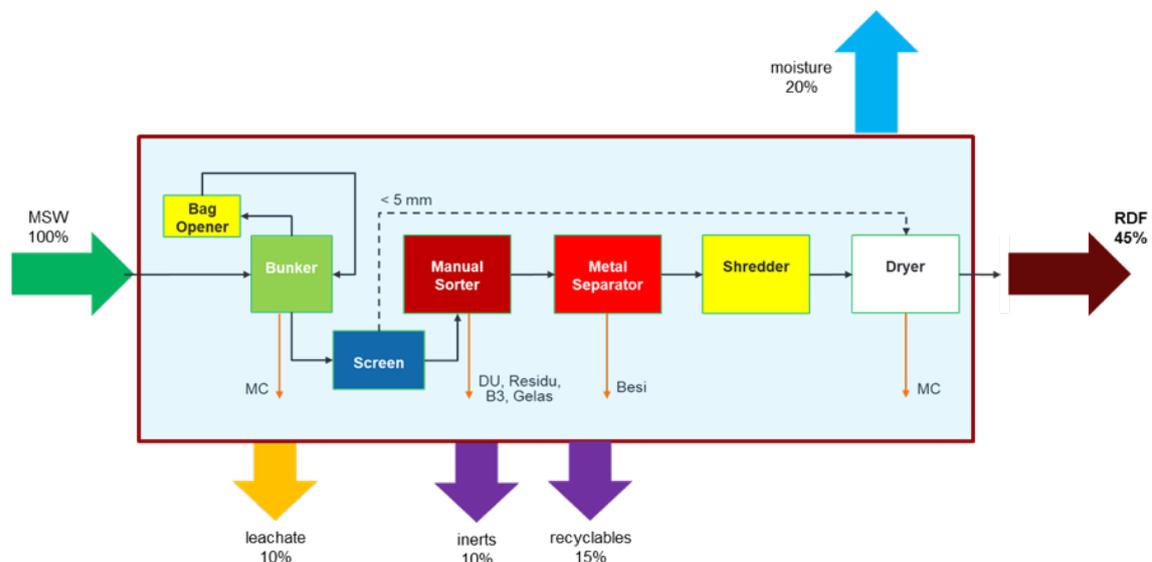
Konfigurasi umum pengolahan sampah dengan RDF telah dirumuskan dalam Buku Pedoman Umum Pemanfaatan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga Sebagai Bahan Bakar Alternatif *Refuse-Derived Fuel*. Adapun konfigurasi umum tersebut meliputi pemilahan, pencacahan, pengeringan, pengayakan, pengemasan, dan penyimpanan. Konfigurasi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2-8



Gambar 2-8
Sistem pengolahan di fasilitas RDF plant
Sumber: KLHK, 2016)

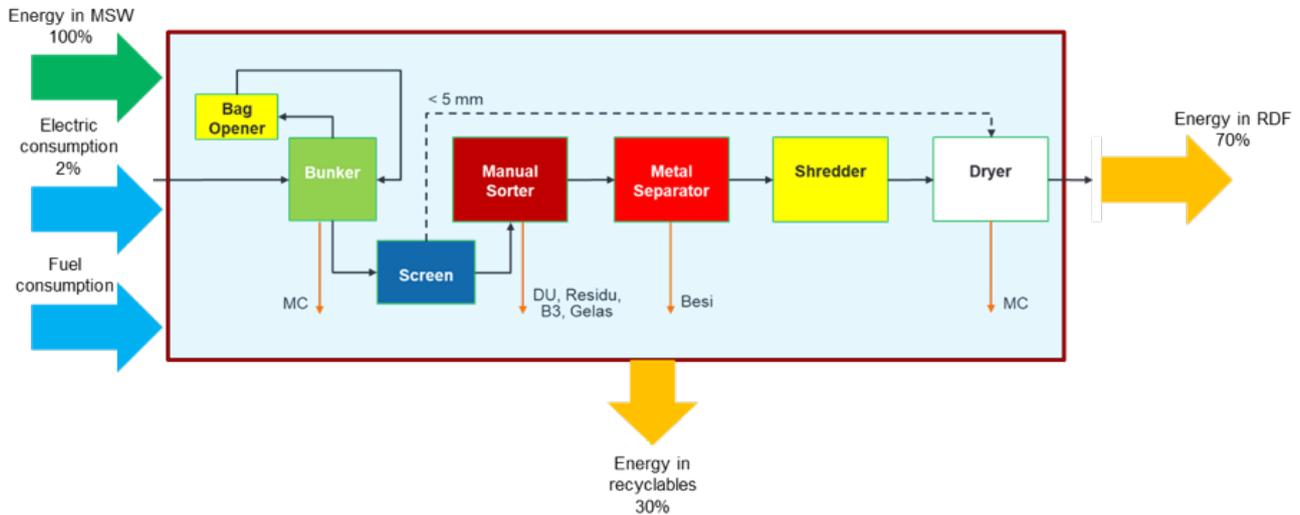
2.3.2 Kestimbangan Massa dan Energi RDF Plant

Kestimbangan massa dari RDF plant dapat dilihat pada Gambar 2-9. Pada RDF plant input material berasal dari sampah rumah tangga dengan output berupa air lindi, inert, sampah daur ulang, kandungan air, dan produk RDF sendiri. Pengurangan air lindi sebesar 10% terjadi pada proses penampungan sampah di bunker. Sementara itu, dalam proses pemilahan terdapat pengurangan material inert dan daur ulang masing-masing sebesar 10% dan 15%. Pada proses pengeringan terdapat pengurangan kandungan air sebesar 20%. Pengurangan kandungan air dalam bentuk uap air ini juga bersamaan dengan CH₄ dari proses pengeringan dengan metode *biodrying* dalam kondisi anaerobik.



Gambar 2-9
Kestimbangan massa RDF plant

Kesetimbangan massa didasarkan dari perhitungan pada RDF *plant* dengan kapasitas 1000 tpd. Setelah pengurangan material-material dalam proses di RDF *plant*, jumlah RDF yang dapat dimanfaatkan yaitu sebesar 45% dari total sampah yang masuk. RDF merupakan produk akhir dari proses di RDF *plant*, sehingga untuk emisi dari pembakaran RDF ini tidak diperhitungkan karena termasuk ke dalam emisi yang dihasilkan oleh *offtaker*.



Gambar 2-10
Keseimbangan energi RDF *plant*

Selain dari kesetimbangan massa, RDF *plant* juga dapat ditinjau dari kesetimbangan energi yang dapat dilihat pada Gambar 2-10. Energi yang terdapat pada sampah masuk terbagi menjadi dua yaitu energi yang terdapat pada sampah daur ulang yang terpilah dan energi pada RDF. Selain energi yang telah disebutkan terdapat kebutuhan energi tambahan dalam proses pengolahan menjadi RDF yaitu kebutuhan listrik dan bahan bakar yang digunakan untuk alat-alat mekanikal dengan jumlah yang kecil.

Proses pengeringan di RDF *plant* sangat penting dan membutuhkan energi yang paling banyak. Metode *biodrying* lebih banyak digunakan karena energi yang dibutuhkan lebih sedikit dibandingkan metode pengeringan termal. Penggunaan pengering termal membutuhkan bahan bakar untuk menghasilkan udara panas yang menggunakan produk RDF hingga sepertiga dari total RDF yang dihasilkan. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan pengering termal akan menurunkan jumlah produk RDF yang dihasilkan.

2.4 LANDFILL MINING

2.4.1 Teknologi Landfill Mining

Landfill mining merupakan proses ekstraksi material padat dari sampah yang telah dibuang dengan penimbunan di dalam tanah (J. Krook, N. Svensson, M. Eklund, 2011). Landfill mining berpotensi untuk menghilangkan sumber polutan air tanah, menghasilkan RDF, kompos, dan tanah yang selanjutnya dapat dimanfaatkan (Prechthai et al, 2008). Pengolahan sampah dengan metode landfill mining dapat mengembalikan lahan yang sebelumnya digunakan untuk pembuangan sampah, sehingga memperpanjang umur TPA.

Secara umum proses landfill mining melibatkan proses penambangan sampah dengan menggunakan peralatan umum

di pertambangan, seperti backhoe atau excavator hidrolik. Limbah hasil galian selanjutnya diproses dengan cara pemilahan seperti pemisahan sampah bulk, menyortir bahan berbahaya, dan pemilahan bahan untuk didaur ulang atau digunakan sebagai bahan bakar. Di beberapa landfill mining juga ditemukan sistem pemrosesan tambahan (magnet untuk pemisahan logam besi, dll.) dan pengelolaan limbah lain terkait kebutuhan produk akhir yang diinginkan (IWCS, 2009 dalam Dhar, 2015).

Proses pemilahan landfill mining biasanya melibatkan satu set conveyor dan screen yang digunakan untuk memilah limbah padat menjadi tiga fraksi yang dapat dipisahkan: material

berukuran besar, limbah berukuran sedang, dan residu/humus. Pemilahan material berukuran besar biasanya terdiri dari benda-benda yang masih mungkin didaur ulang seperti logam, plastik dan karet. Material berukuran sedang terdiri dari bahan-bahan daur ulang yang lebih kecil (plastik) dan bahan organik yang terdekomposisi sebagian biasanya mudah terbakar. Sedangkan fraksi halus sebagian besar akan menjadi tanah yang stabil. Beberapa pengolahan landfill mining juga diproses lanjutan menggunakan pemisah magnetik dan bagian non-ferrous menggunakan air classifier, yang meninggalkan residu yang dapat terbakar (Joseph,2004).

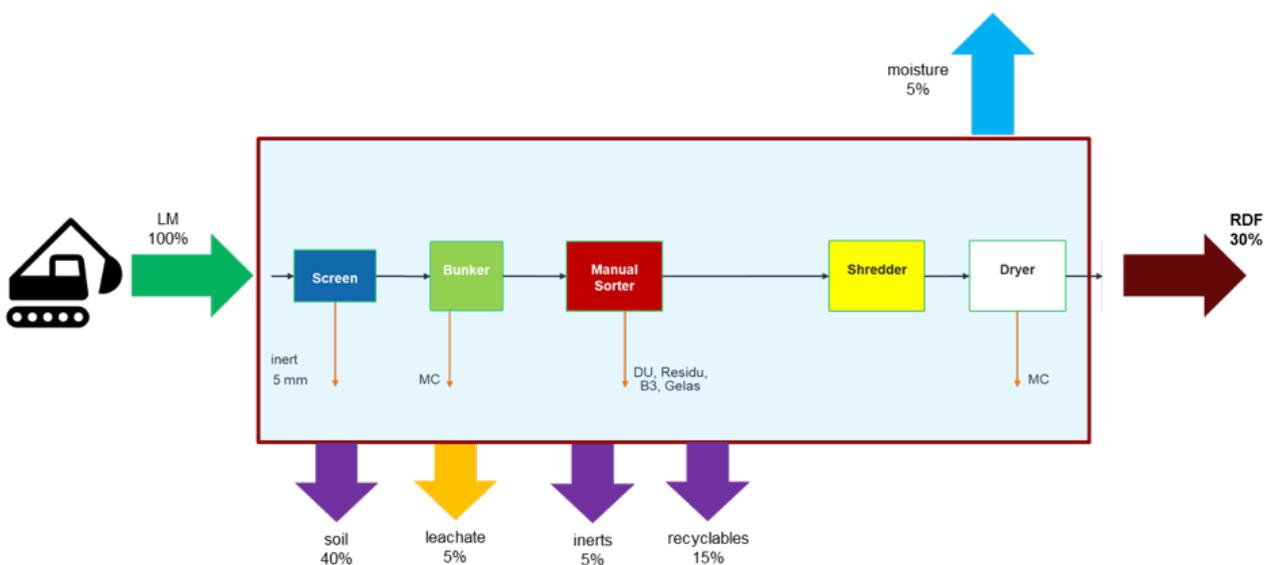
Sampah yang dapat dimanfaatkan pada landfill mining memiliki komposisi yang berbeda dengan sampah baru. Sampah organik yang telah lama berada di landfill akan terdekomposisi, menyisakan material yang tidak dapat didaur ulang seperti tanah, beberapa jenis plastik, tekstil, karet, dan lain sebagainya. Material ini selanjutnya dapat diolah dan dimanfaatkan menjadi bahan lainnya seperti RDF. Pengolahan sampah dari landfill mining menjadi RDF tidak berbeda jauh dengan pengolahan sampah baru.

2.4.2 Keseimbangan Massa dan Energi *Landfill Mining*

Keseimbangan massa dari proses *Landfill Mining* dapat dilihat pada Gambar 2-11. Sampah yang telah digali selanjutnya menjadi input dan diolah menjadi RDF di RDF plant. Karakteristik sampah dari landfill berbeda dengan sampah baru sehingga walaupun melewati proses pengolahan yang sama dengan sampah baru, metode Landfill Mining akan menghasilkan persentase RDF yang lebih sedikit.

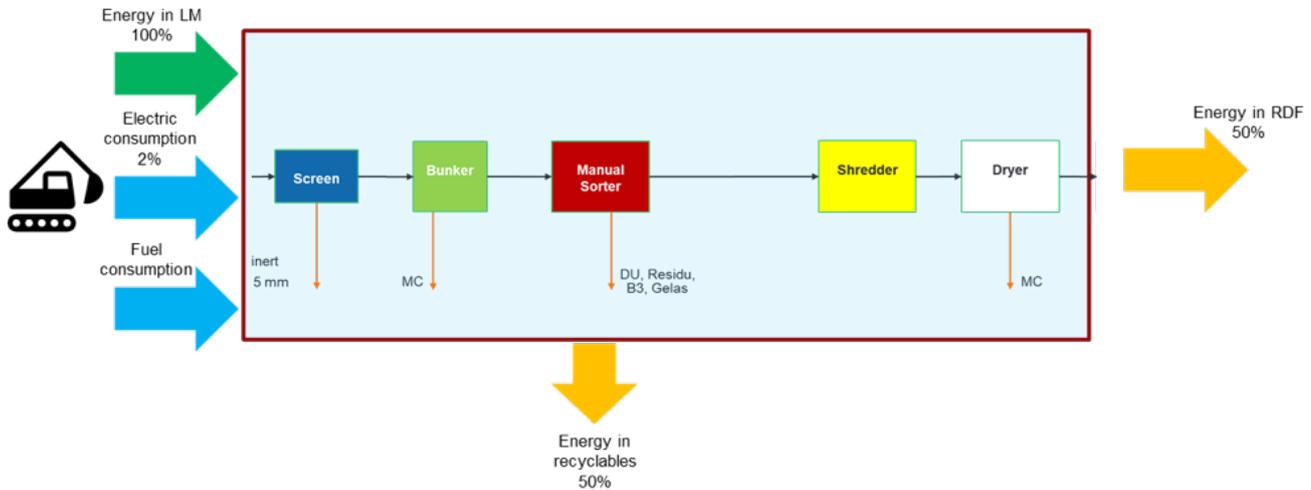
Perhitungan keseimbangan massa ini berdasarkan pada landfill mining dengan kapasitas input sampah sebesar 1000 tpd. Selama proses berlangsung, komponen tanah, inert, sampah daur ulang, air lindi, dan kandungan air akan terpilah dan berkurang. Tanah merupakan kandungan terbanyak yaitu hingga 40%. Sementara

untuk inert dan sampah daur ulang terpilah sebanyak 5% dan 15% untuk masing-masing komponen. Tanah dan inert tersebut masih termasuk ke dalam residu, sehingga setelah proses pemilahan akan dikembalikan lagi ke TPA. Selain itu, terdapat juga pengurangan persentase dari air lindi saat sampah berada di bunker sebanyak 5% dan pengurangan kandungan air dari proses pengeringan sebanyak 5%. Pengurangan kandungan air dalam bentuk uap air ini juga bersamaan dengan CH₄ dari proses pengeringan dengan metode *biodrying* dalam kondisi anaerobik. Dari proses pengolahan sampah menjadi RDF dengan metode landfill mining didapatkan RDF sebanyak 30% dari jumlah total sampah yang masuk. Persentase RDF ini lebih kecil dibandingkan persentase tanah yang dihasilkan.



Gambar 2-11
Keseimbangan massa *landfill mining*

Selain dari kesetimbangan massa, proses *landfill mining* juga dapat ditinjau dari kesetimbangan energi yang dapat dilihat pada Gambar 2-12. Energi yang terdapat pada sampah masuk terbagi menjadi dua keluaran yaitu energi yang terdapat pada sampah daur ulang yang terpilah dan energi pada produk RDF dengan persentase masing-masing sebesar 50%. Selain energi yang telah disebutkan, terdapat kebutuhan energi tambahan dalam proses pengolahan menjadi RDF yaitu kebutuhan listrik dan bahan bakar dengan jumlah yang kecil yang digunakan untuk alat-alat mekanikal. Kebutuhan energi untuk pengeringan pada proses ini akan lebih kecil dibandingkan pengeringan RDF dari sampah baru karena komponen tanah yang memiliki kandungan air yang cukup tinggi telah terpilah di awal proses



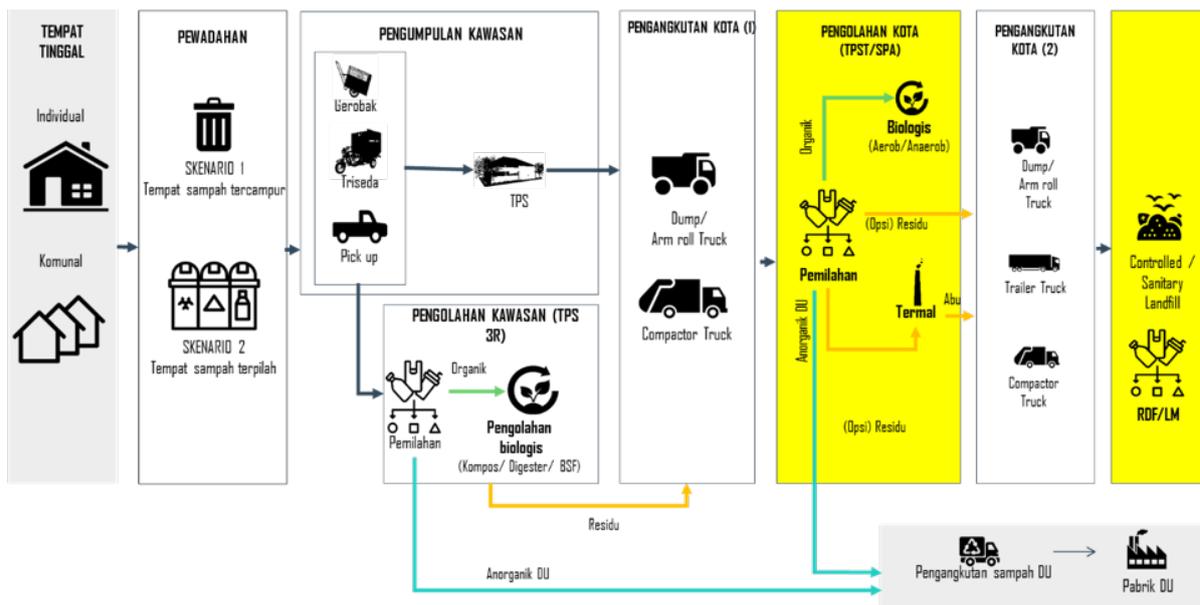
Gambar 2-12
Kesetimbangan energi *landfill mining*

2.5 PENGOLAHAN SAMPAH DENGAN TEKNOLOGI TERMAL DI INDONESIA

Saat ini, di Indonesia telah menerapkan beberapa teknologi pengolahan sampah. Penggunaan teknologi termal telah diterapkan di PSEL Merah Putih dengan menggunakan insinerator dan di PSEL Benowo dengan teknologi gasifikasi. Sementara itu, terdapat pengolahan sampah menjadi RDF yang berlokasi di Cilacap dan Klungkung dengan menggunakan sampah baru dan di TPST Bantargebang dengan metode *landfill mining*.

Posisi pengolahan sampah dengan metode PSEL, RDF, dan LM dalam sistem pengelolaan sampah saat ini dapat dilihat pada Gambar 2-13. Perbedaan dengan metode konvensional yaitu terdapat pengolahan lanjutan terhadap sampah yang masuk ke TPA. Pengolahan dengan metode termal dapat diposisikan setelah pengangkutan dari TPS dan TPS3R. Sementara itu, pengolahan dengan metode RDF dapat dilakukan setelah proses pemilahan. Untuk metode LM dapat langsung menggunakan sampah yang telah ada di *landfill*.





Gambar 2-13
Posisi pengolahan sampah PSEL, RDF, dan LM

Secara umum, terdapat beberapa keuntungan dan kerugian dari pengolahan sampah dengan menggunakan metode PSEL, RDF, dan LM. Keuntungan pengolahan sampah lanjut diantaranya yaitu untuk memperpanjang usia atau menghilangkan TPA, mengurangi dampak negatif TPA, mengurangi ongkos pengelolaan TPA, dapat mengurangi biaya Kompensasi Dampak Negatif (KDN), dan menambah penghasilan dari listrik atau bahan bakar produk dari proses pengolahan sampah tersebut. Sementara itu, beberapa kerugiannya antara lain pengolahan sampah ini tidak mengurangi ongkos pengelolaan dari sumber, dapat menambah *tipping fee*, dan menambah biaya pengelolaan lingkungan dari gas buang dan residu



3

PERBANDINGAN TEKNIS PENGOLAHAN SAMPAH

3.1 Teknologi dan Skala Pengolahan

3.2 Pengurangan Volume Sampah

3.3 Konstruksi dan Kebutuhan Lahan

3.4 Tantangan Setiap Jenis Pengolahan Sampah

Perbandingan teknis terkait pengolahan sampah yang telah, maupun yang akan beroperasi dalam waktu dekat dapat dilihat pada Tabel 3-1. Perbandingan dilihat dari sisi kapasitas pengolahan sampah, kapasitas reduksi sampah, produk utama yang dihasilkan, jumlah produk, jumlah residu, produksi daur ulang, kategori teknologi, durasi konstruksi, ukuran lahan, dan perbandingan ukuran lahan terhadap kapasitas pengolahan sampah yang disebut ukuran lahan spesifik.

Tabel 3-1
Perbandingan teknis pengolahan sampah

Aspek	WtE- BNW*	WtE- BG**	RDF- Cil#	RDF- Bali	LM- BG	LM- SBG
Kapasitas pengolahan sampah (ton/hari)	1000	100	200	80	100	1000
Kapasitas reduksi sampah (%)	85,33	85-90	90-95	70	60	60
Produk utama	Listrik	Listrik	RDF	RDF	RDF	RDF
Kategori teknologi	Th-Gas	Th-Inc	MBT	MBT	MT	MT
Kapasitas produk (MWh/hari atau ton/hari)	216 (M)	16 (M)	55,2 (t)	3 (t)	44(t)	330 (t)
Residu (ton/hari)	146,7	15	2,8	24	56	410
Residu (%)	14,7	10-15	5-10	30	30	40
Lama konstruksi (tahun)	3	2	1	1	1	2
Ukuran lahan (m ²)	19000	4500	10000	6450	9600	35000
Ukuran lahan spesifik (m ² /tpd)	19	45	50	80,6	96	35

3.1 TEKNOLOGI DAN SKALA PENGOLAHAN

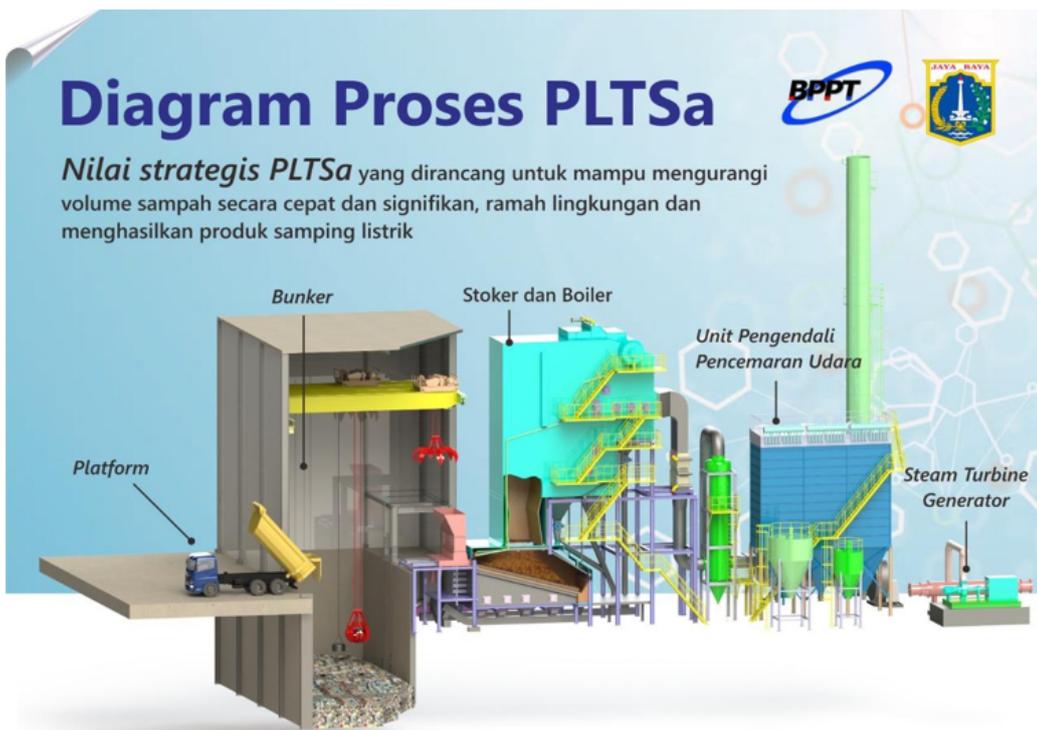
1.1.1 Teknologi Landfill Mining

Pada PSEL biasanya kapasitas pengolahan yang digunakan adalah sistem pengolahan sampah skala besar. Hal ini cukup wajar mengingat biaya investasi yang dibutuhkan sangat tinggi. Pengolahan sampah dengan cara ini masih belum menjadi prioritas di Indonesia. PSEL yang telah beroperasi dan dapat menjadi acuan di antaranya PSEL Merah Putih dan PSEL Benowo.

PSEL Merah Putih adalah pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar sampah khususnya yang bersumber dari sampah yang masuk ke TPA Bantargebang yang berlokasi di Kota Bekasi. Sampah tersebut adalah buangan timbunan sampah dari DKI Jakarta. Diketahui setidaknya ada 7.700 ton sampah yang masuk ke TPA Bantargebang setiap harinya (DLH DKI Jakarta, 2019). PSEL Merah Putih memiliki kapasitas pengolahan sebesar 100 ton per hari (tpd). Kapasitas tersebut adalah jumlah sampah terpilah yang sudah mengalami pre-treatment sebelumnya. Pengolahan pre-treatment sendiri merupakan plant terpisah dengan unit PSEL

Merah Putih yang letaknya lebih dekat dengan titik pembuangan TPA. PSEL Merah Putih memiliki kapasitas produk 16 MWh/hari. Pada tahun 2020, PSEL Merah Putih menghasilkan listrik sebesar 783,63 MWh yang saat ini masih digunakan untuk pengoperasian internal unit PSEL.

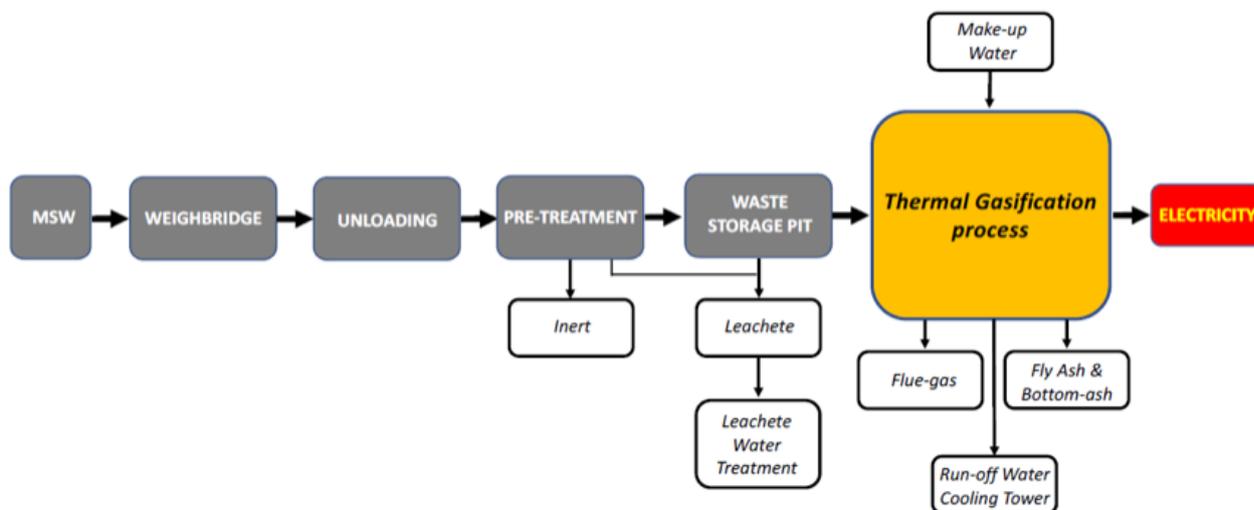
Gambar 3-1 menunjukkan diagram proses PSEL di TPST Bantargebang. Sampah yang masuk ke bunker merupakan sampah yang sudah terpilah. Sampah lalu masuk ke tungku pembakaran stoker. Panas yang dihasilkan dari pembakaran sampah, selanjutnya digunakan untuk menguapkan air pada boiler. Uap air lalu digunakan untuk menggerakkan turbin yang dapat menghasilkan listrik.



Gambar 3-1
Diagram proses PSEL (PLTSa) di TPST Bantargebang
Sumber: DLH DKI Jakarta

PSEL Benowo adalah pembangkit listrik tenaga sampah yang dijalankan di Kota Surabaya. Seperti namanya, sumber sampah dan letak PSEL berada di TPA Benowo. Sampah yang dibuang ke TPA Benowo mencapai 1.600 ton setiap harinya (Pemkot Surabaya, 2022) dan PSEL Benowo mampu mengolah sampah hingga 1.000 ton per harinya. Seperti pada PSEL Merah Putih, PSEL Benowo pun melakukan pemilahan khusus atau pre-treatment sampah sebelum masuk ke pembakaran. Tetapi, kapasitas TPA benowo merujuk pada kapasitas sampah segar yang masuk, bukan sampah yang sudah diolah (*treatment*) sebelumnya seperti di PSEL Merah Putih.

PSEL Benowo dapat menghasilkan listrik sebesar 12 MW. Jumlah listrik yang dijual ke PLN yaitu sebesar 9 MW atau 216 MWh/hari, sementara sisanya digunakan untuk pengoperasian internal. Gambar 3-2 menunjukkan alur pemrosesan sampah di PSEL Benowo.



Gambar 3-2
Alur pemrosesan sampah menjadi listrik di PSEL Benowo

Sampah yang diolah pada PSEL Benowo memiliki karakteristik nilai kalor sebesar 1.330 kcal/kg (LHV) dengan kandungan air sebesar 51 – 53%. Proses pengolahan sampah di PSEL Benowo terdiri dari *pre-treatment*, penampungan sampah, gasifier, dan sistem pembangkit listrik. Sampah yang masuk diberi perlakuan awal seperti pemilahan dan reduksi ukuran. Hal ini dilakukan untuk memisahkan sampah yang tidak dapat diolah dengan proses gasifikasi, sehingga dapat meningkatkan efisiensi proses. Selanjutnya sampah dimasukkan ke penampungan sampah (*waste storage pit*) untuk mencampur sampah dan juga untuk mengurangi kandungan air yang terdapat pada sampah. Sampah lalu lanjut masuk ke proses gasifikasi dengan kondisi seragam dan kandungan air yang lebih rendah. Proses ini menghasilkan syngas yang digunakan sebagai bahan bakar pada tungku pembakaran. Panas yang dihasilkan pada pembakaran selanjutnya digunakan

untuk mengubah air menjadi uap air di boiler. Uap air ini digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang selanjutnya diubah menjadi listrik oleh generator.

Sekalipun proses yang digunakan pada PSEL Merah Putih dan PSEL Benowo adalah sama-sama pengolahan termal, namun jenis metode pengolahan yang digunakan keduanya berbeda. Pada PSEL Merah Putih, proses pembakaran menggunakan satu buah insinerator jenis *moving grate*, sedangkan PSEL Benowo memakai *gasifier* sebanyak 2 jalur operasi dengan kapasitas besar. Panas yang dihasilkan dari pembakaran sampah di insinerator dapat langsung digunakan untuk memanaskan boiler. Sementara itu, produk dari gasifikasi masih berupa syngas yang selanjutnya digunakan sebagai bahan bakar pada tungku, sehingga menghasilkan panas yang dapat digunakan untuk *boiler*.

3.1.2 Refuse Derived Fuel

Pengolahan sampah menjadi Refuse Derived Fuel (RDF) merupakan salah satu pilihan teknologi pengolahan sampah yang mulai digunakan di Indonesia. Hal ini karena hampir seluruh jenis sampah rumah tangga dapat diolah menjadi RDF. Selain itu, RDF juga sudah terbukti dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk proses *co-firing* dengan batu bara di pabrik semen maupun di PLTU. Saat ini, pengolahan RDF di Indonesia sudah cukup banyak diinisiasi di berbagai daerah.

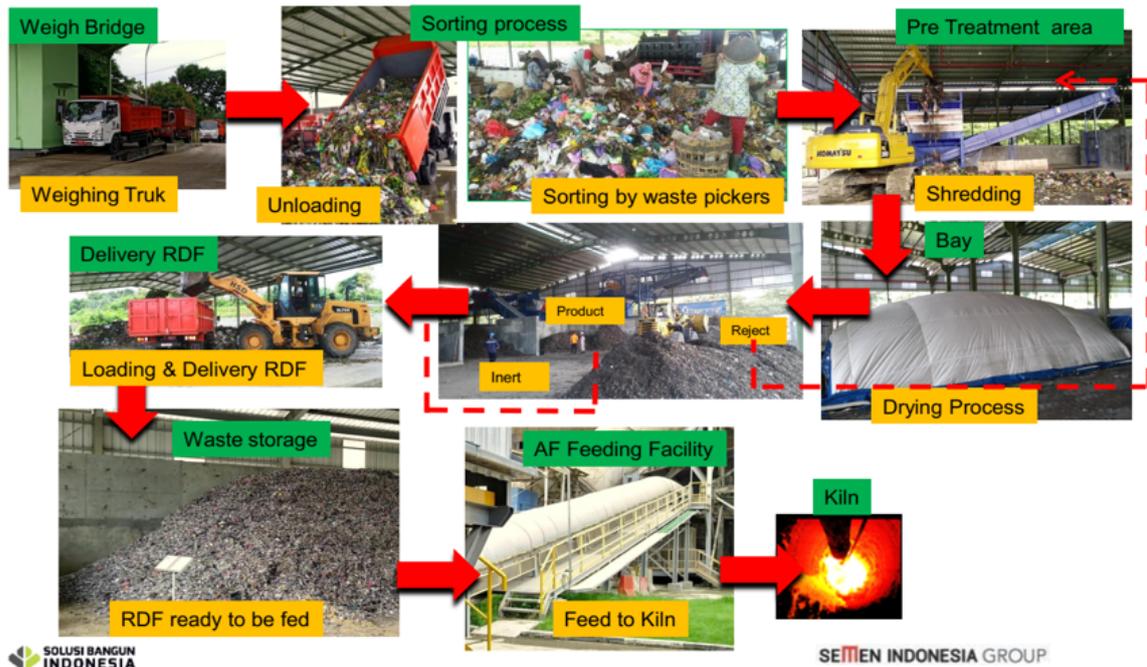
RDF plant yang telah beroperasi dan menghasilkan bahan bakar yang dapat dimanfaatkan diantaranya RDF Cilacap yang dikelola oleh PT. Solusi Bangun Indonesia (SBI) dan RDF Tempat Olah Sampah Setempat (TOSS) yang dikelola pemerintah Kabupaten Klungkung di Provinsi Bali. RDF Cilacap memiliki kapasitas penuh mencapai 200 tpd, tetapi baru dapat mengelola sampah sebesar 110 tpd di tahun 2019 dan naik hingga 140 ton di tahun 2021. Sementara itu, untuk kapasitas TOSS adalah 80 tpd yang merupakan gabungan dari banyak pengolahan titik-titik sampah yang dikelola oleh Dinas Lingkungan Hidup dan Pertanian (DLHP) Kabupaten Klungkung.

Alur pengolahan sampah di RDF plant Cilacap dapat dilihat pada Gambar III 3. Sampah yang masuk dipilah secara manual untuk memisahkan sampah daur ulang. Selanjutnya, sampah yang tidak terpilah akan masuk ke proses pencacahan untuk

mereduksi ukuran. Sampah yang berukuran seragam lalu dikeringkan dengan metode *biological drying* untuk menurunkan kandungan air. Metode ini dapat menurunkan kandungan air dari 57,60% menjadi 22,75% dalam waktu 20 hari. Saat ini, sedang dikembangkan metode *biological drying* dengan menggunakan bioaktivator untuk mempercepat waktu pengeringan.

Sampah yang telah dikeringkan selanjutnya melewati proses penyaringan untuk mendapatkan RDF dengan ukuran yang diinginkan. Produk yang dihasilkan di RDF *plant* Cilacap berupa RDF *fluff* yang selanjutnya diangkut ke pabrik semen untuk digunakan pada proses *co-firing*. Jumlah produk yang dihasilkan yaitu sebesar 55,2 ton/hari.





Gambar 3-2
Alur pengolahan di RDF plant Cilacap
Sumber: Presentasi PT. SBI

Pengolahan sampah di Kabupaten Klungkung menerapkan sistem pemilahan di sumber yang telah dilakukan sejak tahun 2017. Saat ini masyarakat yang telah melakukan pemilahan sampah sudah mencapai 82,84%. Pengangkutan sampah dibagi berdasarkan jenisnya yaitu organik dan anorganik. Sampah yang telah diangkut ini selanjutnya dipilah lagi secara manual di atas conveyor. Sampah yang diolah di TOSS Kabupaten Klungkung mayoritas adalah sampah organik yang bersumber dari hotel dan restoran.

Sampah organik yang masuk diolah lebih lanjut menjadi kompos dan RDF. Kompos yang dihasilkan selanjutnya digunakan secara mandiri dan disumbangkan ke beberapa instansi. Teknologi yang digunakan dalam pengolahan sampah menjadi RDF di TOSS yaitu pemilahan manual, pencacahan, pengeringan, pengayakan, dan pembuatan pellet. Pengeringan yang dilakukan yaitu menggunakan metode *biological drying* dengan tambahan bioaktivator atau biasa disebut dengan metode peuyeumisasi.

Sementara itu, pemilahan sampah anorganik dilakukan untuk sampah yang dapat didaur ulang. Sampah daur ulang dijual melalui koperasi dan hasil yang didapatkan dari penjualan sampah daur ulang ini dibagikan kepada tenaga kerja. Sampah daur ulang yang dipilah terdiri dari plastik, kertas, logam, dan kaca.

Kapasitas pengolahan sampah menjadi RDF di Kabupaten Klungkung mencapai 80 tpd dengan produk yang dihasilkan dapat mencapai 3 tpd. Pada tahun 2018 – 2019 RDF yang dihasilkan telah digunakan oleh Indonesia Power untuk proses *co-firing*. Dari data yang tersedia, pada tahun 2018 produksi *pellet* yang digunakan oleh Indonesia Power yaitu sebesar 2.460 kg dan pada tahun 2019 mencapai 9.850 kg.

Sementara itu, untuk tahun 2020 hingga saat ini, RDF digunakan untuk *gasifier* yang berada di TOSS. Listrik yang dihasilkan dari proses gasifikasi digunakan untuk menjalankan peralatan yang ada di TOSS. Jumlah *pellet* yang dihasilkan pada tahun 2020 yaitu 14.065 kg dan tahun 2021 sebesar 8.545 kg (data Januari – Oktober).

Pengolahan sampah menjadi RDF di Cilacap dan Klungkung memiliki persamaan dalam proses yang digunakan yaitu menggunakan metode *mechanical and biological treatment* (MBT). Kedua lokasi tersebut juga menghasilkan produk RDF yang telah digunakan dalam proses di industri. Perbedaan dari kedua lokasi tersebut dari sisi teknologi yaitu terdapat *gasifier* di TOSS Klungkung yang dapat memasok listrik untuk operasional internal.

3.1.3 Landfill Mining

Landfill mining di Indonesia yang telah beroperasi terletak di TPST Bantargebang dengan kapasitas sebesar 100 tpd. Metode yang digunakan di Landfill Mining Bantargebang yaitu penambangan sampah lama yang berusia lebih dari 5 tahun. Sampah yang berada di TPST digali dan dilakukan pretreatment pada sampah tersebut sehingga menghasilkan RDF. Proses pretreatment yang dilakukan yaitu pemisahan dan pencacahan. Alur pemrosesan ditunjukkan pada Gambar 3-4.

Gambar 3-4
Alur Landfill Mining di TPST Bantargebang
Sumber: UPST Bantargebang



Terdapat 2 alur pemrosesan sampah untuk Landfill Mining di TPST Bantargebang dengan perbedaan pada proses pencacahan. Alur pertama menggunakan mekanisme pemilahan dengan trommel dan selanjutnya dicacah. Sementara, untuk alur kedua menggunakan pemilahan dengan trommel dan wind shifter yang menghasilkan RDF yang tidak tercacah. Teknologi pengolahan tersebut termasuk ke dalam kategori *mechanical treatment* (MT).

Produk yang dihasilkan dari proses landfill mining ini yaitu RDF, yang saat ini sudah dimanfaatkan oleh PT Solusi Bangun Indonesia (SBI) dan PT. Indocement Tunggul Prakasa Tbk., untuk proses co-firing dan co-processing. Jumlah RDF yang dihasilkan dari proses landfill mining ini mencapai 44 ton/hari. RDF ini memiliki nilai kalor sekitar 2.350 – 2.570 kcal/kg (HHV) dengan kandungan air 44 – 45 %. Pada tahun 2020, jumlah sampah yang

diolah pada proses landfill mining ini mencapai 17.760 ton dan menghasilkan RDF sebanyak 7.766 ton. Sementara itu proses landfill mining juga menghasilkan produk berupa kompos yang dapat digunakan untuk penghijauan area TPST Bantargebang, serta tanah yang dapat digunakan sebagai cover soil di TPA.

Landfill Mining Study Bantargebang (LM SBG) adalah rencana jangka panjang dari landfill mining yang sudah ada saat ini. Data yang diketahui, LM SBG akan dibangun dengan skala 1.000 tpd yang hasil pengolahan akhirnya akan berupa RDF. Diperkirakan, produk RDF yang dihasilkan dari LM SBG ini mencapai 330 ton/hari. LM SBG pada dasarnya menggunakan teknologi yang sama dengan LM yang telah beroperasi saat ini, namun dengan kapasitas yang lebih besar. LM SBG saat ini masih dalam proses pelelangan dan belum beroperasi.

3.2 PENGURANGAN VOLUME SAMPAH

3.2.1 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

Pada proses pengolahan sampah menjadi RDF, baik di Cilacap maupun di Klungkung, terdapat proses-proses yang dapat mengurangi jumlah volume sampah. Pengurangan volume tersebut dapat terjadi karena ada pemilahan material, pengeringan sampah, maupun dari reduksi ukuran.

Proses pemilahan awal yang dilakukan di RDF plant Cilacap dilakukan secara manual sebelum sampah diolah. Sampah

yang masuk ke RDF plant pada dasarnya sudah dipisahkan dari sampah-sampah besar sehingga mengurangi kebutuhan pemilahan sampah-sampah besar. Pemilahan manual dilakukan oleh pemulung setempat dengan cara memisahkan sampah daur ulang dari timbulan sampah. Jumlah pengurangan sampah daur ulang yang dilakukan oleh pemulung ini diketahui tidaklah banyak dari jumlah volume sampah yang masuk, hanya sekitar 1 – 3% dari sampah total.

Proses pengolahan RDF di Cilacap menghasilkan residu berupa batu sebesar 5 - 10% yang langsung dibuang ke TPA. Residu yang dibuang ke TPA biasanya keluar dari proses penyaringan. Diketahui RDF plant ini mampu mengolah sebanyak 90 – 95% sampah dari timbulan sampah yang masuk.

Pengolahan RDF di Klungkung dibandingkan dengan pengolahan sampah di RDF Cilacap sangatlah berbeda. Sampah yang masuk sudah terpilah dari sumber karena Pemerintah daerah Kabupaten

Klungkung melakukan upaya edukasi masyarakat yang sangat baik. Tidak dibutuhkan alat-alat yang rumit dari pengolahan sampah ini karena sampah yang dibutuhkan sudah terpilah. Pengurangan volume sampah paling tinggi disebabkan oleh pengurangan kadar air saat peuyeumisasi. Dari data yang tersedia, diketahui RDF *plant* di Klungkung dapat mengolah hingga 70% sampah yang masuk. Sementara itu, residu yang dihasilkan yaitu sebesar 30% langsung dikirim ke TPA.

3.1.2 Refuse Derived Fuel

Pada proses pengolahan sampah menjadi RDF, baik di Cilacap maupun di Klungkung, terdapat proses-proses yang dapat mengurangi jumlah volume sampah. Pengurangan volume tersebut dapat terjadi karena ada pemilahan material, pengeringan sampah, maupun dari reduksi ukuran.

Proses pemilahan awal yang dilakukan di RDF plant Cilacap dilakukan secara manual sebelum sampah diolah. Sampah yang masuk ke RDF plant pada dasarnya sudah dipisahkan dari sampah-sampah besar sehingga mengurangi kebutuhan pemilahan sampah-sampah besar. Pemilahan manual dilakukan oleh pemulung setempat dengan cara memisahkan sampah daur ulang dari timbulan sampah. Jumlah pengurangan sampah daur ulang yang dilakukan oleh pemulung ini diketahui tidaklah banyak dari jumlah volume sampah yang masuk, hanya sekitar 1 – 3% dari sampah total.

Proses pengolahan RDF di Cilacap menghasilkan residu berupa batu sebesar 5 - 10% yang langsung dibuang ke TPA. Residu yang dibuang ke TPA biasanya keluar dari proses penyaringan. Diketahui RDF plant ini mampu mengolah sebanyak 90 – 95% sampah dari timbulan sampah yang masuk.

Pengolahan RDF di Klungkung dibandingkan dengan pengolahan sampah di RDF Cilacap sangatlah berbeda. Sampah yang masuk sudah terpilah dari sumber karena Pemerintah daerah Kabupaten Klungkung melakukan upaya edukasi masyarakat yang sangat baik. Tidak dibutuhkan alat-alat yang rumit dari pengolahan sampah ini karena sampah yang dibutuhkan sudah terpilah. Pengurangan volume sampah paling tinggi disebabkan oleh pengurangan kadar air saat peuyeumisasi. Dari data yang tersedia, diketahui RDF plant di Klungkung dapat mengolah hingga 70% sampah yang masuk. Sementara itu, residu yang dihasilkan yaitu sebesar 30% langsung dikirim ke TPA.

3.2.3 Landfill Mining

Proses pengolahan sampah dengan metode *landfill mining* merupakan metode pengolahan sampah yang berasal dari TPA, sehingga walaupun pengolahannya menjadi RDF melalui proses yang sama dengan pengolahan sampah baru, produk yang dihasilkan akan berbeda.

Landfill mining dilakukan dengan cara menggali sampah di zona tidak aktif, kemudian mengolah sampah hasil galian menjadi material bernilai guna. Sampah yang berasal dari *landfill* cenderung sudah tidak memiliki komponen sampah yang dapat didaur ulang, sehingga tidak ada pengurangan volume dari proses pemilahan. Selain itu, komponen sampah organik juga sudah terdekomposisi sehingga persentase sampah dan kandungan air

dari sampah organik akan lebih kecil.

Dalam pengolahan sampah menggunakan teknik *landfill mining*, produk utama yang dihasilkan yaitu RDF. Hal ini tidak terlalu menguntungkan mengingat kualitas sampah yang digunakan sudah tentu menurunkan nilai kalor yang dibutuhkan. Pengurangan jumlah sampah yang diolah menggunakan metode *landfill mining* ini mencapai 60%. Pengurangan tersebut tidak signifikan karena sampah yang telah tertimbun sudah terdegradasi dan sebagian material organik sudah menjadi humus/tanah. Sisa humus/tanah yang tidak terolah ini termasuk ke dalam residu dan kembali masuk ke TPA. Residu yang dihasilkan dari pengolahan sampah yang berasal dari *landfill mining* ini mencapai 30%, sementara untuk skala yang lebih besar pada LM SBG dapat mencapai 40%.

3.3 KONSTRUKSI DAN KEBUTUHAN LAHAN

3.2.1 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

PSEL Merah Putih merupakan PSEL yang terletak di TPST Bantargebang, Kota Bekasi. PSEL ini mulai beroperasi pada tahun 2018 setelah konstruksi yang memakan waktu selama 2 tahun. Luas area dari lahan yang digunakan untuk PSEL ini yaitu sebesar 4.500 m². Luas ini termasuk kebutuhan lahan untuk unit pemilahan awal, PSEL, dan juga air pollution control. Lahan yang digunakan PSEL Merah Putih dapat dilihat pada Gambar 3-5. Jika dibandingkan dengan kapasitas pengolahan sampah di PSEL ini yang bernilai 100 tpd, ukuran lahan spesifik dari PSEL Merah Putih yaitu sebesar 45 m²/tpd.



Gambar 3-5
Lahan PSEL Merah Putih
Sumber: earth.google.com

Selain PSEL Merah Putih, terdapat PSEL Benowo yang lokasinya bersebelahan dengan TPA Benowo, Kota Surabaya. Konstruksi dari PSEL Benowo diselesaikan selama 3 tahun dan mulai beroperasi pada tahun 2021. Luas area dari PSEL Benowo ini mencapai 19.000 m² dengan gambar tampak atas dapat dilihat pada Gambar III 6. Lahan tersebut termasuk di dalamnya terdapat 6 unit gasifier, 3 unit boiler, dan 2 unit turbin uap. Selain itu, pada fasilitas ini juga terdapat unit pemilahan awal, pengolahan emisi gas buang, dan pengolahan air limbah. Dibandingkan dengan kapasitas pengolahan sampah yang mencapai 100 tpd, ukuran lahan spesifik dari PSEL Benowo yaitu sebesar 19 m²/tpd.



Gambar 3-6
Lahan PSEL Benowo
Sumber: earth.google.com

PSEL Benowo memiliki lahan dan kapasitas yang lebih besar dibandingkan PSEL Merah Putih. Selain itu, walaupun keduanya menggunakan teknologi termal, PSEL Benowo menggunakan teknologi gasifikasi sementara PSEL Merah Putih menggunakan insinerasi. Oleh karena itu, terdapat perbedaan jenis, ukuran, dan kapasitas dari peralatan yang digunakan. Pada dasarnya pengolahan sampah PSEL Merah Putih adalah proyek pilot sehingga ukuran dari pemakaian lahan sebenarnya masih dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi. Hal tersebut yang menjadikan kedua jenis pengolahan memiliki ukuran lahan spesifik yang berbeda. Namun demikian, PSEL memiliki ukuran lahan spesifik yang kecil jika dibandingkan dengan teknologi lainnya.

3.3.2 Refuse Derived Fuel (RDF)

RDF plant di Cilacap merupakan RDF plant pertama di Indonesia yang telah beroperasi sejak tahun 2020 dengan luas 10.000 m². Lokasi RDF plant ini berada di TPA Tritih Lor, Kabupaten Cilacap. Pembangunan RDF *plant* ini memakan waktu selama 1 tahun. Tampak atas dari RDF plant Cilacap dapat dilihat pada Gambar 3-7. Lahan dan jalan akses untuk RDF *plant* Cilacap ini disediakan oleh Pemerintah Kabupaten Cilacap. Adapun konstruksi bangunan utama disediakan oleh Kementerian PUPR.

Lahan yang digunakan oleh fasilitas pengolahan sampah ini termasuk dengan area pemilahan yang dilakukan di area terbuka oleh pemulung, pengolahan, dan penyimpanan. Proses pengolahan RDF di Kabupaten Cilacap menggunakan metode *biodrying*, sehingga area yang dibutuhkan cukup luas. Ukuran lahan spesifik dari RDF plant ini yaitu sebesar 50 m²/tpd.

Gambar 3-7
Lahan RDF *plant* Cilacap
Sumber: earth.google.com



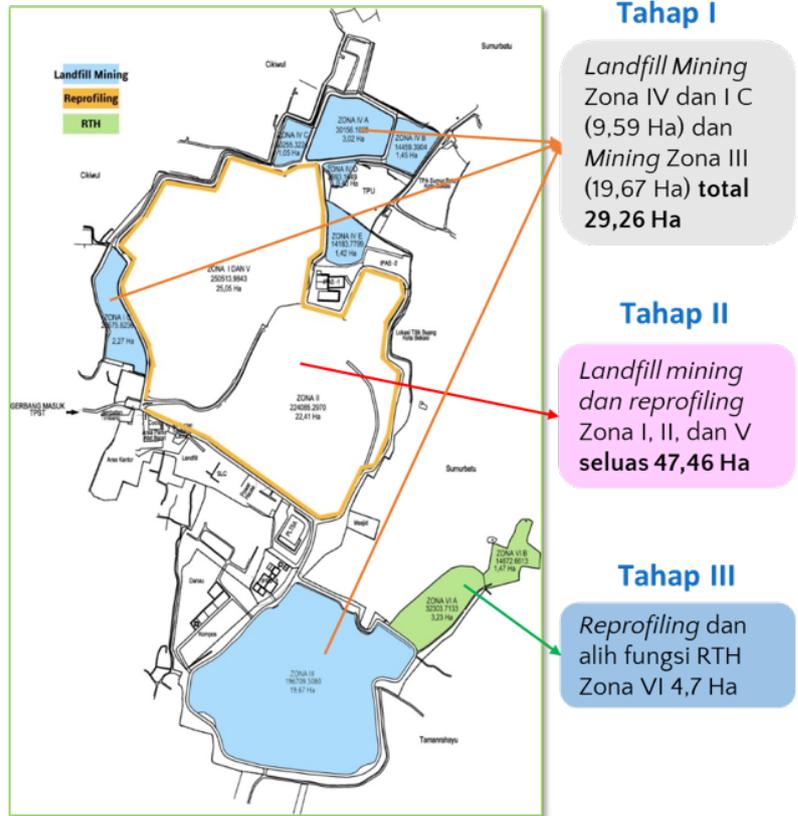
TOSS *Center* terletak di Kabupaten Klungkung merupakan tempat pengolahan sampah menjadi RDF. Luas area RDF plant ini mencapai 6.450 m², termasuk dengan tempat pemilahan dan pengolahan. Pembangunan RDF *plant* ini memakan waktu selama 1 tahun. Tampak atas dari RDF *plant* di Klungkung dapat dilihat pada Gambar 3-8. Sama seperti RDF plant di Cilacap, pengeringan yang dilakukan di TOSS menggunakan metode *biodrying*, sehingga diperlukan area yang luas untuk lahan *biodrying* ini. Ukuran lahan spesifik dari RDF *plant* di Klungkung ini mencapai 80,6 m²/tpd

Gambar 3-8
Lahan RDF *plant* Klungkung
Sumber: earth.google.com



3.3.3 Landfill Mining

Lokasi *landfill mining* Bantargebang berada di area TPST Bantargebang, Kecamatan Bantargebang, Kota Bekasi. Penggalian sampah lama yang dilakukan adalah memanfaatkan lahan yang telah ada seluas 81,40 hektar. Penggalian dilakukan secara bertahap di beberapa titik yang sudah direncanakan. Skenario tahap penggalian sampah di TPST Bantargebang dapat dilihat pada Gambar 3-9. Landfill mining yang telah dilakukan saat ini yaitu di Zona IV dan Zona V dengan total 17.760 ton pada tahun 2020.



Gambar 3-9
Skenario *landfill mining* di TPST Bantargebang
Sumber: UPST Bantargebang

Landfill mining Bantargebang telah beroperasi sejak tahun 2020 dengan lama konstruksi 1 tahun. Saat ini terdapat dua lokasi pengolahan sampah hasil *landfill mining* menjadi RDF, salah satunya ditunjukkan pada Gambar III 10. Terdapat excavator, trommel screen, dan shredder dalam area tersebut. Luas area yang saat ini digunakan untuk pengolahan sampah menjadi RDF yaitu sebesar 9.600 m², sehingga ukuran lahan spesifiknya yaitu 96 m²/tpd.



Gambar 3-10
Lokasi *landfill mining* di TPST Bantargebang

Pada tahun 2023, *landfill mining study* Bantargebang direncanakan akan mulai beroperasi dengan kapasitas 1.000 tpd. Lahan yang tersedia untuk LM SBG yaitu 35.000 m², sehingga untuk ukuran lahan spesifik yang tersedia yaitu sebesar 35 m²/tpd.

3.4 TANTANGAN SETIAP JENIS PENGOLAHAN SAMPAH

Pemilihan proses pengolahan sampah tentu memiliki tantangannya masing-masing. Setiap jenis pengolahan sampah pada dasarnya dipilih menyesuaikan kebutuhan di area sekitar sumber timbulan. Keunggulan dan kekurangan dari setiap jenis teknologi pengolahan sampah terpilih harus dapat menutupi dan menyelesaikan masalah yang ada di area yang akan dikelola.

3.4.1 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

Penggunaan teknologi termal sebagai alternatif pengolahan sampah menjadi listrik memiliki kelebihan dan tantangan untuk pengembangan di masa yang akan datang. Kelebihan dari proses di PSEL yaitu pengurangan timbulan sampah yang tinggi, waktu pengolahan yang singkat, kebutuhan lahan yang rendah untuk kapasitas tinggi, dan produk yang siap pakai.

Pengurangan timbulan sampah yang tinggi dapat dicapai karena teknologi termal dapat mengolah berbagai macam sampah dengan reduksi volume hingga 90% dan menyisakan residu berupa abu. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan PSEL dapat mengurangi jumlah lahan yang dibutuhkan untuk menampung residu di TPA. Penggunaan teknologi termal juga dapat mengolah sampah dalam waktu singkat karena baik insinerator maupun *gasifier* dioperasikan pada temperatur yang sangat tinggi, sehingga sampah akan terbakar dengan cepat.

Selain dari sisi proses pengolahan, dilihat dari kebutuhan lahan dan kapasitas pengolahan, ukuran lahan spesifik dari PSEL terbilang rendah. Untuk lahan spesifik yang rendah tersebut, PSEL sudah dapat menghasilkan listrik yang bisa langsung digunakan. Listrik

tersebut bisa langsung dimanfaatkan baik untuk operasional PSEL sendiri maupun masuk ke jaringan grid PLN.

Walaupun PSEL memiliki banyak kelebihan dalam proses pengolahan sampah, masih ada tantangan yang harus dihadapi dalam pengembangan teknologi termal sebagai alternatif pengolahan sampah. Tantangan tersebut diantaranya yaitu proses insinerasi dan gasifikasi masih tergolong sebagai teknologi yang masih jarang digunakan di Indonesia dan masih diperlukan banyak tenaga ahli dalam operasionalnya.

Pengolahan sampah menggunakan proses insinerasi dan gasifikasi menjadi listrik bukan termasuk teknologi baru. Namun demikian, penggunaannya di Indonesia masih tergolong baru, sehingga masih banyak studi yang harus dilakukan terkait pembangunan dan pengoperasian PSEL dengan teknologi insinerasi dan gasifikasi. Selain itu, tenaga ahli yang tersedia khusus untuk operasional dari PSEL ini dapat dikatakan masih minim. Hal ini sangat perlu diperhatikan, agar keberadaan PSEL dapat secara efektif mengurangi timbulan sampah yang masuk ke TPA.

3.4.2 Refuse Derived Fuel

Pengolahan sampah menjadi RDF memiliki kelebihan dan tantangan dibandingkan dengan metode pengolahan sampah lainnya. Kelebihannya yaitu memungkinkan pengurangan timbulan sampah yang tinggi, kebutuhan tenaga ahli yang lebih sedikit, dan durasi pembangunan yang relatif lebih singkat.

Pengurangan timbulan sampah pada pengolahan menjadi RDF termasuk tinggi karena semua jenis sampah yang dapat terbakar bisa diolah menjadi RDF. Residu yang dihasilkan dari pengolahan ini yaitu berupa *inert* yang jumlahnya sedikit, sehingga kebutuhan lahan di TPA untuk menampung *inert* ini akan menjadi lebih kecil. Dari sisi teknologi, pengolahan sampah menjadi RDF menggunakan alat-alat yang sudah banyak dijumpai pada industri-industri. Oleh karena itu, tidak diperlukan tenaga ahli yang banyak dalam pengoperasian alat-alat di RDF *plant*. Selain dari proses dan teknologi, pembangunan RDF *plant* membutuhkan waktu yang relatif lebih singkat. Hal ini disebabkan alat-alat yang dibutuhkan sudah banyak tersedia dengan berbagai macam kapasitas dan ukuran, sehingga hanya perlu menyesuaikan dengan kebutuhan dan ketersediaan lahan.

Proses pengolahan sampah menjadi RDF memiliki beberapa kekurangan dan tantangan jika dibandingkan dengan metode pengolahan sampah lainnya. Kekurangan dan tantangan tersebut diantaranya yaitu kapasitas yang bergantung pada ketersediaan lahan, kebutuhan lahan yang tinggi, dan waktu pengolahan yang lebih lama.

Proses dan kapasitas yang dipilih dalam pengolahan dipengaruhi oleh ketersediaan lahan yang ada. Semakin tinggi kapasitas yang dipilih membuat kebutuhan alat menjadi lebih besar sehingga lahan yang dibutuhkan akan menjadi lebih besar. Selain itu, karena sampah di Indonesia cenderung memiliki kandungan air yang tinggi, proses pengeringan sangat disarankan. Metode pengeringan dengan *biodrying* menjadi salah satu pilihan yang saat ini digunakan dalam RDF *plant* di Cilacap dan Klungkung. Namun demikian, metode ini membutuhkan lahan yang cukup luas karena pengeringan sampah dilakukan dalam waktu yang cukup lama, sedangkan sampah akan selalu masuk setiap hari.

3.4.3 Landfill Mining

Pengolahan sampah menjadi RDF dengan metode *landfill mining* memiliki kelebihan dan tantangan sendiri dibandingkan dengan metode pengolahan lainnya. Kelebihan dari pengolahan sampah dengan metode *landfill mining* diantaranya yaitu kapasitas pengolahan yang tinggi, meningkatkan umur pakai TPA, dan minim ongkos transportasi.

Seperti pengolahan RDF dengan sampah baru, proses pada *landfill mining* menggunakan teknologi yang sama. Kapasitas alat-alat yang tersedia bervariasi sehingga kapasitas pengolahan dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Saat ini, sudah direncanakan pembangunan *landfill mining* di TPST Bantargebang dengan kapasitas mencapai 1000 tpd. Proses *landfill mining* dapat memisahkan sampah yang masih dapat dimanfaatkan dari sampah yang telah lama ditumpuk di *landfill* sehingga lahan akan tersedia kembali untuk menampung residu. Selain itu, pengolahan sampah ini biasanya memanfaatkan lahan di sekitar *landfill* sehingga akan mengurangi biaya transportasi sampah ke lokasi pengolahan dan transportasi residu ke TPA.

Kekurangan dan tantangan yang harus dihadapi dalam pengolahan sampah menjadi RDF dengan metode *landfill mining* diantaranya yaitu kebutuhan lahan yang besar, perlu adanya aturan *processing fee*, lokasi yang tidak stabil, dan persentase residu yang tinggi.

Seperti pengolahan sampah menjadi RDF pada sampah baru, *landfill mining* membutuhkan lahan yang besar sesuai dengan kapasitasnya. Selain itu dalam pengolahan sampah dengan metode *landfill mining* diperlukan adanya aturan untuk *processing fee*. Proses *landfill mining* juga memiliki risiko karena penggalian sampah yang sudah lama berada di *landfill* dapat melepaskan metana yang terperangkap di dalam tumpukan sampah. Sementara itu, jika dilihat dari material yang diproses, sampah di *landfill* memiliki kandungan tanah/humus yang tinggi hingga 40%. Kandungan tanah/humus tersebut termasuk ke dalam residu dan dikembalikan ke TPA.

4

PERBANDINGAN ASPEK FINANSIAL PENGOLAHAN SAMPAH

4.1 Alur Pembiayaan

4.2 CAPEX

4.3 OPEX

4.4 *Revenue*

4.5 Pembiayaan dari Pihak Terkait

4.6 Perbandingan Analisis Finansial Teknologi Pengolahan Sampah

4.1 ALUR PEMBIAYAAN

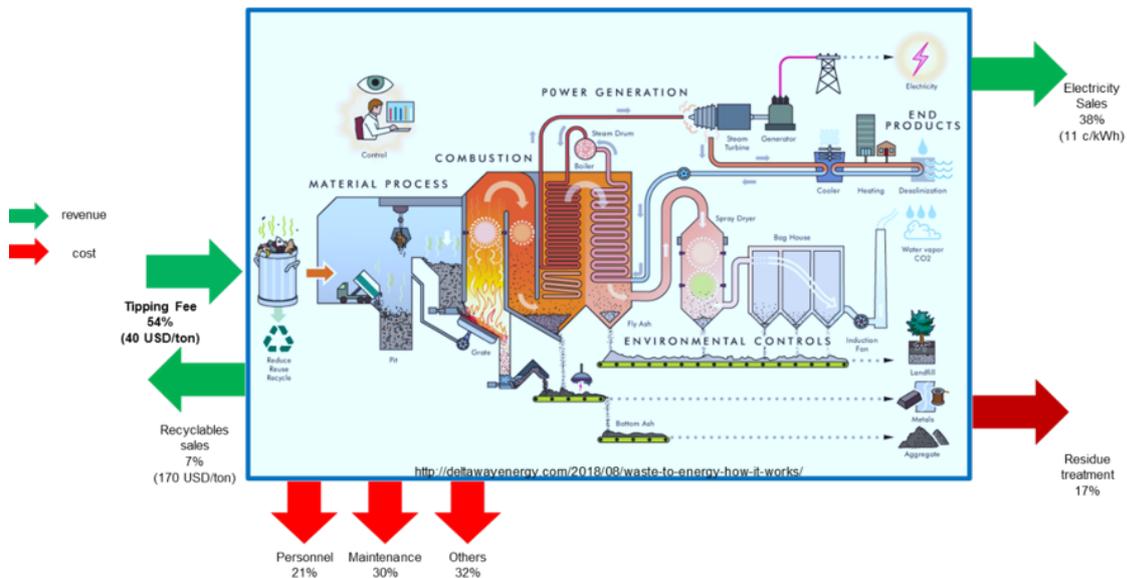
Pada perhitungan aspek finansial pengolahan sampah dengan berbagai teknologi, diperlukan data-data terkait alur pembiayaan sampah. Pada dasarnya, pembiayaan terkait pembangunan dan operasional pengolahan sampah membutuhkan alur yang jelas antara biaya masuk-keluar dalam keseluruhan sistem. Dengan alur pengolahan dan teknologi yang berbeda, sudah tentu biaya yang dikeluarkan maupun yang didapatkan itu berbeda. Alur pembiayaan pada masing-masing teknologi akan dijelaskan lebih rinci untuk PSEL, RDF, maupun *landfill mining*.

4.1.1 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

Aliran biaya masuk yang terdapat pada pengolahan sampah di PSEL dapat dilihat pada Gambar 4-1 yang ditunjukkan oleh panah berwarna hijau. Aliran biaya masuk pada PSEL terdiri dari *tipping fee*, penjualan barang daur ulang, dan listrik sebagai produk akhir. *Tipping fee* yang masuk diberikan dari pemerintah daerah selaku pengelola sampah terpadu. *Tipping fee* tersebut digunakan sebagai biaya pengelolaan sampah yang biasanya dikaitkan dengan biaya operasional rutin dari pembangkit. Pada PSEL menggunakan sistem termal, pemilahan sangat dibutuhkan sebagai penyeragaman sampah untuk mendapatkan bahan bakar yang optimal. Pemilahan pada sampah basah biasanya termasuk pemilahan sampah daur ulang. Sampah daur ulang bisa menjadi sumber aliran biaya masuk yang cukup tinggi jika dikelola dengan baik. Sumber pendapatan utama dihasilkan dari penjualan listrik

ke PLN. Listrik yang dihasilkan tidak seluruhnya dijual, akan tetapi digunakan pada operasional PSEL.

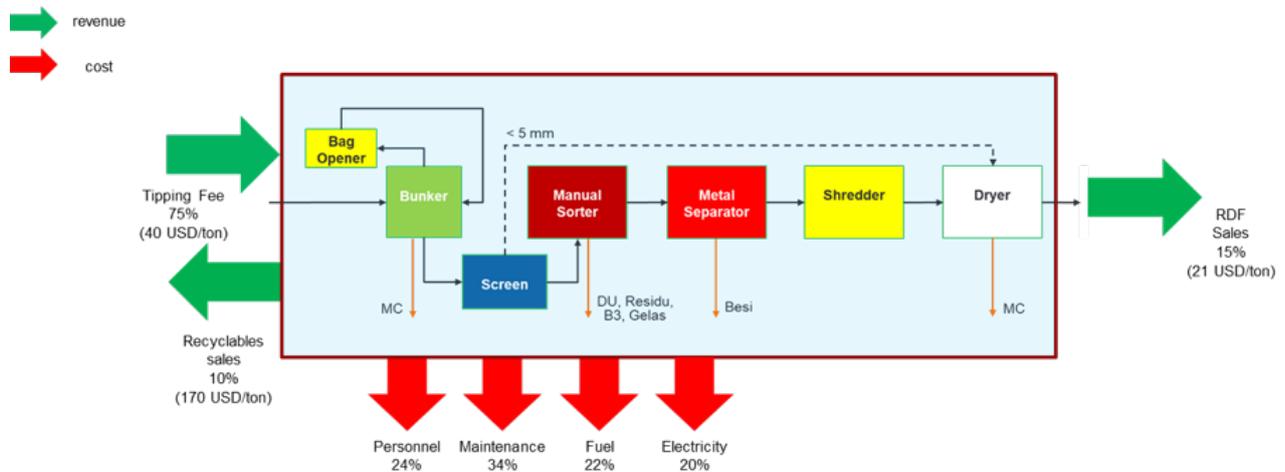
Aliran biaya keluar pada sistem PSEL pada Gambar 4-1 diperlihatkan pada panah berwarna merah. Unsur-unsur biaya yang menyebabkan aliran keluar atau kerugian diantaranya pengolahan lindi, pengelolaan *flying ash-bottom ash* (FABA), pengolahan gas buang, dan rugi-rugi panas dalam proses pembangkitan. Pengolahan lindi di PSEL biasanya dibutuhkan dalam proses *pre-treatment* awal sampah sebelum masuk ke ruang pembakaran dan pengolahan gas buang mengeluarkan biaya *air pollution control* (APC) yang tidak sedikit. Kerugian yang menyebabkan berkurangnya sumber pendapatan yaitu kerugian panas yang terjadi pada mesin pembangkit.



Gambar 4-1
Aliran biaya masuk dan keluar pada PSEL

4.1.2 Refuse Derived Fuel

Alur biaya masuk pada pengolahan sampah menggunakan sistem RDF dapat dilihat pada Gambar 4-2 yang ditunjukkan oleh panah berwarna hijau. Aliran pemasukan pada RDF Plant terdiri dari *tipping fee*, penjualan barang daur ulang, dan penjualan RDF ke industri. Sama seperti PSEL, *tipping fee* yang masuk diberikan dari pemerintah daerah selaku pengelola sampah terpadu. Biaya *tipping fee* yang digunakan untuk biaya pengelolaan sampah akhir dengan metode tersebut. Nilai *tipping fee* pada RDF Plant terkait dengan biaya operasional rutin. Untuk mendapatkan hasil RDF yang baik dan sesuai standar, pemilahan sangat dibutuhkan untuk memilah sampah-sampah yang tidak akan menguntungkan untuk hasil produk akhir. Pemilahan yang menghasilkan aliran dana masuk adalah pemilahan barang daur ulang. Sama halnya dengan PSEL, sampah daur ulang masih bisa menjadi sumber aliran biaya masuk yang cukup tinggi jika dikelola dengan baik. Sumber pendapatan utama pada RDF plant adalah penjualan produk akhir berupa RDF ke industri-industri

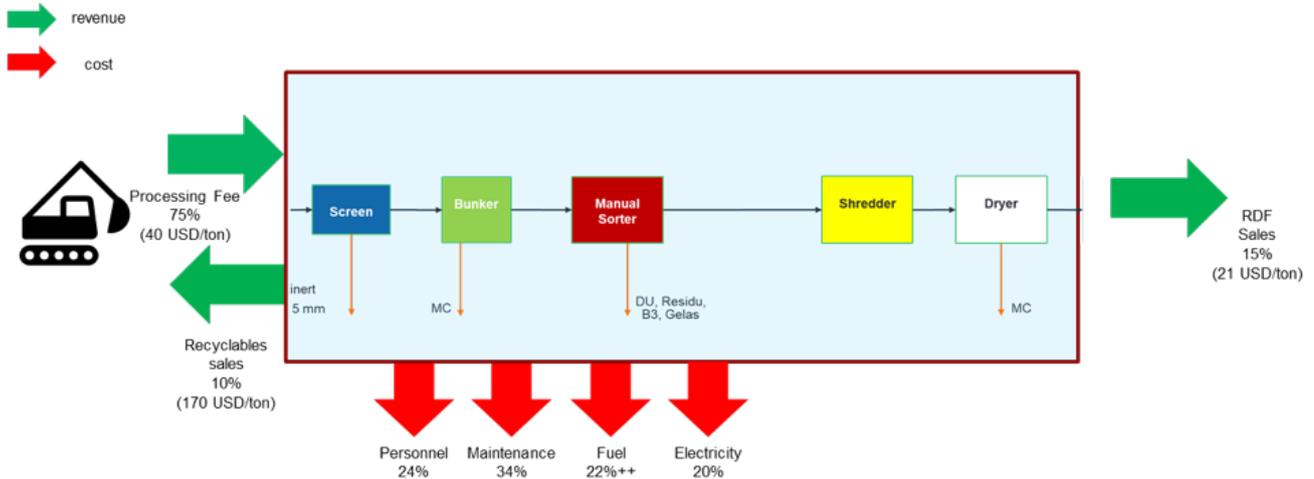


Gambar 4-2
Aliran biaya masuk dan keluar pada RDF plant

Aliran biaya keluar pada sistem RDF plant pada Gambar 4-2 diperlihatkan pada panah yang berwarna merah. Unsur-unsur pembiayaan yang menyebabkan aliran keluar atau kerugian diantaranya pengolahan lindi dan pembuangan sampah *inert* yang akan dikembalikan ke TPA. Pembuangan sampah inert ke TPA pun mengeluarkan biaya yang tidak sedikit. Pengolahan lindi pada RDF plant dibutuhkan untuk membuang lindi yang dihasilkan saat pengeringan di *bunker*.

4.1.3 Landfill Mining

Alur pembiayaan pada pengolahan sampah dengan sistem *landfill mining* dapat dilihat pada Gambar 4-3. Biaya masuk pada diagram alir tersebut ditunjukkan pada panah berwarna hijau. Aliran biaya masuk pada landfill mining terdiri dari tipping fee, penjualan barang daur ulang, dan penjualan produk akhir berupa RDF. Tipping fee yang masuk diberikan dari pemerintah daerah selaku pengelola sampah terpadu.



Gambar 4-3
Aliran biaya masuk dan keluar pada *landfill mining*

Alur pembiayaan pada pengolahan sampah dengan sistem *landfill mining* dapat dilihat pada Gambar 4-3. Biaya masuk pada diagram alir tersebut ditunjukkan pada panah berwarna hijau. Aliran biaya masuk pada *landfill mining* terdiri dari tipping fee, penjualan barang daur ulang, dan penjualan produk akhir berupa RDF. Tipping fee yang masuk diberikan dari pemerintah daerah selaku pengelola sampah terpadu.

4.2 CAPEX

Capital expenditure (CAPEX) pada ketiga sistem yang dibandingkan dibagi menjadi beberapa kelompok pekerjaan umum. Seluruh pembiayaan awal pada pengelolaan sampah menggunakan PSEL, RDF *Plant* dan *landfill mining* dikelompokkan sebagai berikut:

- Peralatan utama (*mechanical*)
- Pekerjaan sipil
- *Utilities*
- Infrastruktur lain
- Lahan
- Biaya pra-operasional

Tabel 3-1
Perbandingan CAPEX pengolahan sampah

Aspek	WtE- BNW*	WtE- BG**	RDF- Cil#	RDF- Bali	LM- BG	LM- SBG
CAPEX – Peralatan utama (juta Rp)	268.862	74.340	43.000	1.589	32.000	203.500
CAPEX – Pekerjaan sipil (juta Rp)	278.974	3.700	26.000	4.500	Existing	60.613
CAPEX – <i>Utilities</i> (juta Rp)	75.574	14.000	0	0	0	0
CAPEX – Infrastruktur lainnya (juta Rp)	21.029	7.500	9.200	Existing	Existing	102.000
CAPEX – Lahan (juta Rp)	0	0	3.000	Provinsi	Existing	Existing
CAPEX – Biaya pra-operasional (juta Rp)	59.992	1.300	0	0	0	79.959
Total (juta Rp)	704.431	100.840	81.200	6.089	32.000	446.072
Biaya CAPEX spesifik (juta Rp/tpd)	704	1.008	406	76,1	320	446

4.2.1 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

PSEL membutuhkan biaya investasi yang paling tinggi dibandingkan dengan teknologi lainnya. Peralatan utama (*mechanical*) merupakan salah satu komponen yang membutuhkan pembiayaan paling tinggi. Biaya yang dikeluarkan untuk peralatan utama di PSEL Benowo termasuk diantaranya peralatan *pretreatment*, *gasifier*, pembangkit listrik, dan pengolahan residu. Pada PSEL Benowo, biaya yang tinggi juga dibutuhkan untuk pekerjaan sipil dalam proses pembangunan. Total CAPEX dapat dibandingkan dengan kapasitas PSEL Benowo yang mencapai 1.000 tpd, menghasilkan biaya CAPEX spesifik sebesar Rp 704 juta/tpd.

Serupa dengan PSEL, biaya CAPEX tertinggi pada PSEL Merah Putih adalah biaya untuk peralatan utama (*mechanical*). Total CAPEX dari PSEL Merah Putih yaitu Rp 100.840 juta, jauh lebih kecil dari PSEL Benowo karena terdapat perbedaan kapasitas pada kedua PSEL dengan kapasitas PSEL Benowo mencapai 10 kali lebih besar dari PSEL Merah Putih. Biaya CAPEX spesifik dari PSEL Merah Putih yaitu Rp 1.008 juta/tpd. Walaupun kapasitas PSEL Merah Putih lebih kecil dibandingkan PSEL Benowo, biaya CAPEX spesifik dari PSEL Merah Putih menunjukkan nilai yang lebih besar. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan teknologi *insinerator* dan *gasifier* yang memiliki harga yang berbeda. Pemilihan teknologi yang digunakan akan mempengaruhi jumlah investasi yang dibutuhkan.

4.2.2 Refused Derived Fuel

Biaya investasi tertinggi yang dikeluarkan dalam pengolahan sampah menjadi RDF di Cilacap yaitu biaya untuk peralatan utama. Selain itu, biaya CAPEX dalam pembangunan RDF plant Cilacap juga termasuk pekerjaan sipil, infrastruktur lainnya, dan lahan. Untuk kapasitas 200 tpd, biaya CAPEX spesifik untuk RDF plant Cilacap yaitu sebesar Rp 406 juta/tpd.

RDF plant di Klungkung mempunyai kapasitas yang lebih kecil sehingga total biaya CAPEX juga lebih kecil dibandingkan RDF

plant di Cilacap. Total CAPEX RDF plant di Cilacap mencapai Rp 81 M sementara di Klungkung jauh lebih kecil dengan nilai Rp 6 M. Jika dibandingkan dengan kapasitas RDF plant Klungkung sebesar 80 tpd, biaya CAPEX spesifik memiliki nilai sebesar Rp 76,1 juta/tpd. Selain karena perbedaan kapasitas, pembangunan RDF plant di Klungkung juga tidak mengeluarkan biaya infrastruktur tambahan selain infrastruktur utama karena sudah tersedia di lokasi TOSS Center. Pembangunan RDF plant di Klungkung juga tidak memerlukan biaya untuk penyediaan lahan karena lahan telah disediakan oleh Pemerintah Daerah Provinsi Bali.

4.2.3 Landfill Mining

Sama dengan teknologi PSEL dan RDF, biaya CAPEX terbesar dari pengolahan sampah dengan metode *landfill mining* adalah biaya peralatan utama (*mechanical*). Pada *landfill mining* yang telah berjalan saat ini, total biaya CAPEX hanya dari peralatan utama saja. Hal ini karena bangunan sipil dan infrastruktur lainnya, serta lahan dalam pembangunan sudah tersedia di TPST Bantargebang. Biaya CAPEX spesifik untuk *landfill mining* yang telah tersedia saat ini yaitu Rp 320 juta/tpd dengan kapasitas olah sebesar 100 tpd.

Saat ini pembangunan *landfill mining* dengan skala yang lebih besar telah direncanakan. Biaya CAPEX yang telah diperhitungkan

mencapai Rp 446 M untuk total pembangunan *landfill mining* dengan skala 1000 tpd. Biaya tersebut tidak termasuk biaya untuk lahan, karena lahan sudah tersedia di TPST Bantargebang. Namun demikian, perhitungan CAPEX termasuk dengan biaya pekerjaan sipil dan infrastruktur lainnya, serta biaya pra-operasional. Sehingga jika dibandingkan dengan kapasitasnya, *landfill mining* dengan skala 1000 tpd memiliki biaya CAPEX spesifik Rp 446 juta/tpd, sedikit lebih besar dibandingkan *landfill mining* yang saat ini telah beroperasi.

4.3 OPEX

Operational expenditure (OPEX) atau biaya operasional pada ketiga metode pengolahan sampah dibagi menjadi beberapa aspek yaitu upah tenaga kerja, perawatan rutin, *heavy maintenance*, operasional lainnya, konsumsi listrik, asuransi, pengolahan dan pembuangan abu, bahan kimia, kontribusi lokal, transportasi, dan *co-processing*. Biaya operasional tersebut dibandingkan dengan kapasitas pengolahan dari tiap teknologi pengolahan sampah dan menghasilkan biaya OPEX spesifik. Perbandingan biaya OPEX untuk setiap metode pengolahan sampah dapat dilihat pada Tabel 4-2.

Tabel 4-2
Perbandingan CAPEX pengolahan sampah

Aspek	WtE- BNW*	WtE- BG**	RDF- Cil#	RDF- Bali	LM- BG	LM- SBG
OPEX – Tenaga kerja (juta Rp/tahun)	7.407	6.212	1.417	1.835	Existing	9.965
OPEX – Perawatan rutin (juta Rp/tahun)	14.199	956	2.022	859	Existing	13.354
OPEX – Heavy maintenance (juta Rp/tahun)	23.652	281	0	0	0	4.000
OPEX – Operasional lainnya (juta Rp/tahun)	5.352	5.768	3.960	135	0	721
OPEX – Konsumsi Listrik (juta Rp/tahun)	0	0	1.395	39	0	8.410
OPEX – Asuransi (juta Rp/tahun)	704	0	0	0	0	0
OPEX – Pengolahan dan pembuangan abu (juta Rp/tahun)	N/A	214	0	0	0	0
OPEX – Bahan kimia (juta Rp/tahun)	5.284	630	0	0	0	0
OPEX – Kontribusi lokal (juta Rp/tahun)	7.566	1.126	0	0	0	0
OPEX – Transportasi dan co-processing (juta Rp/tahun)	0	13	4.164	0	0	9.039
Total (juta Rp/tahun)	64.164	15.200	12.958	2.868	Existing	45.489
Biaya OPEX Spesifik (juta Rp/tahun.tpd)	64	152	65	35	N/A	45

4.3.1 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

Biaya operasional yang paling besar dari PSEL Benowo yaitu biaya perawatan. Total dari biaya operasional yang dikeluarkan dalam setahun pada PSEL Benowo yaitu sebesar Rp 64 M. Biaya ini merupakan nilai terbesar jika dibandingkan dengan metode pengolahan sampah lainnya. Namun karena PSEL Benowo dapat mengolah sampah dengan kapasitas 1.000 tpd, nilai biaya OPEX spesifik menjadi Rp 64 juta/tahun.tpd.

Sementara itu untuk PSEL Merah Putih, biaya terbesar adalah biaya untuk tenaga kerja. Total dari biaya operasional PSEL ini yaitu Rp 15,2 M/tahun. Perbedaan dengan PSEL Benowo disebabkan oleh perbedaan proses pengolahan, kapasitas, dan aspek pembiayaan yang dihitung. Untuk PSEL Merah Putih dengan kapasitas 100 tpd, nilai biaya OPEX spesifiknya yaitu sebesar Rp 152 juta/tahun.tpd.

4.3.2 *Refused Derived Fuel*

Biaya operasional dari RDF *plant* di Cilacap dan Klungkung mencakup biaya untuk tenaga kerja, perawatan rutin, biaya operasional lainnya, listrik, dan transportasi dari *co-processing* produk ke *offtaker*. Untuk RDF *plant* di Cilacap, biaya operasional terbesar dikeluarkan untuk transportasi produk RDF menuju lokasi *offtaker* sebesar Rp 4 M/tahun. Total biaya operasional dari RDF *plant* Cilacap yaitu mencapai Rp 12,9 M/tahun dengan biaya OPEX spesifik sebesar Rp 65 juta/tahun.tpd.

Sementara itu, untuk RDF *plant* di Klungkung, biaya operasional terbesar dikeluarkan untuk tenaga kerja. Pada RDF *plant*

di Klungkung, total biaya yang dibutuhkan jauh lebih kecil dibandingkan RDF *plant* Cilacap karena kapasitas pengolahan yang berbeda. Selain itu, terdapat *gasifier* pada RDF *plant* Klungkung yang dapat menghasilkan listrik, sehingga biaya yang dibutuhkan untuk listrik dapat menjadi lebih kecil. Pada RDF *plant* di Klungkung, transportasi produk RDF dari lokasi pengolahan menuju *offtaker* ditanggung oleh *offtaker* sehingga tidak masuk ke dalam biaya operasional. Total biaya operasional dari RDF *plant* Klungkung yaitu mencapai Rp 2,8 M/tahun dengan biaya OPEX spesifik sebesar Rp 35 juta/tahun.tpd.

4.3.3 *Landfill Mining*

Biaya operasional untuk pengolahan sampah dengan metode *landfill mining* yang saat ini sudah beroperasi mencakup juga biaya untuk tenaga kerja dan perawatan rutin peralatan. Sementara, untuk *landfill mining study* dengan kapasitas yang lebih besar, telah direncanakan biaya operasional dengan nilai paling tinggi untuk biaya perawatan rutin. Total biaya yang dikeluarkan untuk operasional yaitu Rp 45 M/tahun. Jika dibandingkan dengan kapasitas pengolahan sebesar 1000 tpd, biaya OPEX spesifik dari *landfill mining study* adalah sebesar Rp 45 juta/tahun.tpd.



4.4 REVENUE

Revenue atau pendapatan pada ketiga metode pengolahan sampah dibagi menjadi beberapa aspek yaitu pendapatan dari *tipping fee*, penjualan listrik, penjualan sampah daur ulang, penjualan lainnya, insentif, dan penjualan RDF. Jumlah pendapatan di setiap metode pengolahan dibandingkan dengan kapasitas pengolahan dari setiap teknologi untuk menghasilkan pendapatan spesifik. Perbandingan pendapatan untuk setiap metode pengolahan sampah dapat dilihat pada Tabel 4-3.

Tabel 4-3
Perbandingan revenue pengolahan sampah

Aspek	WtE- BNW*	WtE- BG**	RDF- Cil#	RDF- Bali	LM- BG	LM- SBG
Revenue – Tipping fee (juta Rp, 2021/tahun)	72.769	0	7.358	0	0	0
Revenue – Listrik (juta Rp/tahun)	147.400	0	0	0	0	0
Revenue – Daur ulang (juta Rp/tahun)	0	0	Scaven- ger	Co-op	0	0
Revenue – Lainnya (juta Rp/tahun)	0	0	0	93	0	0
Revenue – Insentif (juta Rp/tahun)	65.287	0	0	0	0	Planned
Revenue – Penjualan RDF (juta Rp/tahun)	0	0	5.600	0	Planned	45.540
Total (juta Rp/tahun)	285.456	0	12.958	93	0	45.540
Revenue spesifik (juta Rp/tahun.tpd)	285	0	107,98	1,2	0	45,5

4.3.1 Pengolah Sampah menjadi Energi Listrik (PSEL)

Pendapatan dari PSEL merupakan yang tertinggi dibandingkan dengan teknologi pengolahan sampah lainnya. Pendapatan dari PSEL di Indonesia dapat berasal dari *tipping fee*, penjualan listrik, dan penjualan sampah daur ulang jika terdapat proses pemilahan. Pendapatan yang dihasilkan oleh PSEL Benowo berasal dari *tipping fee*, penjualan listrik, dan insentif. Total dari pendapatan PSEL Benowo mencapai Rp 285 M/tahun dengan pendapatan terbesar berasal dari penjualan listrik ke PLN sebesar Rp 147 M setiap tahunnya. Pendapatan total tersebut jika dibandingkan dengan kapasitas pengolahan PSEL Benowo, menghasilkan pendapatan spesifik sebesar Rp 285 juta/tahun.tpd. Sementara itu, untuk PSEL Merah Putih, listrik yang dihasilkan masih digunakan untuk operasional internal PSEL sehingga belum ada pendapatan yang masuk.

4.4.2 *Refused Derived Fuel*

Pendapatan untuk RDF plant dapat berasal dari *tipping fee*, penjualan RDF, dan penjualan sampah daur ulang jika terdapat proses pemilahan. Untuk RDF *plant* Cilacap, pendapatan yang masuk berasal dari *tipping fee* dan penjualan RDF. Terdapat proses pemilahan oleh pemulung, namun hasil penjualannya tidak termasuk ke dalam pendapatan RDF *plant*. Pendapatan total dari RDF *plant* Cilacap yaitu sebesar Rp 12 M dengan pendapatan terbesar berasal dari *tipping fee*. Pendapatan total tersebut jika dibandingkan dengan kapasitas pengolahan RDF *plant* Cilacap, menghasilkan pendapatan spesifik sebesar Rp 285 juta/tahun.tpd.

Sementara untuk RDF *plant* di Klungkung produk yang dihasilkan adalah RDF, kompos, dan material daur ulang. Penjualan material

daur ulang dilakukan oleh koperasi yang hasil pendapatannya dibagikan kepada pekerja yang melakukan pemilahan. Untuk produk kompos, saat ini digunakan mandiri oleh keperluan di fasilitas pengolahan dan disumbangkan ke beberapa institusi. Penggunaan kompos hasil dari RDF *plant* ini dapat mengurangi pengeluaran untuk pembelian kompos sebesar Rp 93 juta/tahun. Sementara itu pemanfaatan RDF oleh Indonesia *Power* tidak melalui proses pembelian, sehingga tidak ada pendapatan yang masuk dari produk RDF. Hal tersebut menyebabkan pendapatan spesifik dari RDF *plant* di Klungkung dapat dilihat sangat kecil sebesar Rp 1,2 juta/tahun.tpd

4.4.3 *Landfill Mining*

Sama seperti RDF *plant*, pendapatan untuk pengolahan sampah dengan metode *landfill mining* dapat berasal dari *tipping fee*, penjualan RDF, dan penjualan sampah daur ulang yang terpilah saat proses pemilahan. Untuk *landfill mining* pendapatan utama berasal dari penjualan RDF. Pada *landfill mining study* Bantargebang, diproyeksikan penjualan RDF dapat mencapai Rp 45 M/tahun. Dengan kapasitas pengolahan yang sama, hasil penjualan RDF pada pengolahan sampah dari *landfill mining* akan lebih kecil dibandingkan dengan penjualan RDF pada pengolahan sampah baru karena produk RDF yang dihasilkan pada *landfill mining* lebih sedikit.

4.5 PEMBIAYAAN DARI PIHAK TERKAIT

Skema pembiayaan dari pengolahan sampah di Indonesia dapat dibagi menjadi 2 skenario yaitu pembiayaan utama oleh pemerintah dan swasta. Untuk Skenario 1 CAPEX berasal dari pemerintah pusat dan OPEX berasal dari pemerintah daerah. Sementara itu untuk Skenario 2 CAPEX dan OPEX berasal dari swasta dan *tipping fee* dari pemerintah daerah.

4.5.1 *Pembiayaan oleh Pemerintah Pusat dan Pemerintah Daerah*

Pembiayaan CAPEX oleh pemerintah pusat dapat dilihat pada Tabel 4-4. Dalam skenario ini pemerintah pusat hanya akan melakukan pembiayaan awal untuk teknologi pengolahan sampah yang dipilih. Perbandingan CAPEX dilakukan kepada beberapa teknologi yaitu pengelolaan sampah *Sanitary Landfill* (SL), MRF, PSEL, RDF, dan *landfill mining* dengan RDF *plant*. Pengelolaan sampah secara *Sanitary Landfill* (SL) dijadikan acuan, karena pengelolaan ini merupakan metode yang saat ini paling umum dilakukan.

Tabel 4-4

Pembiayaan CAPEX oleh pemerintah pusat

Sumber: *Permendagri 7/2021, **Data PSEL Benowo,

*** <https://jacksonlab.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj15141/f/cm2012.pdf>, ^ Sekitar 30% pengurangan volume, ^^ Dari perhitungan 1500 tpd MRF dan landfill,

^^^ Harga RDF Rp 300.000/ton

Teknologi	CAPEX (juta Rp/tpd)	Lahan (m2/tpd)	OPEX (juta Rp/tahun.tpd)	Ext. Revenue (juta Rp/tahun.tpd)	Reduksi Sampah (%)	GHG*** (kg CO2 eq)
SL	248*	290*	0	0	0	1257
MRF-based	510^^	203^	0	0	10	1257
PSEL	1008	19	0	0	90	374
RDF	406	50	0	0	85	9
LM (+RDF)	446	35	0	0	60	11

Pembiayaan OPEX pada skenario ini dilakukan oleh pemerintah daerah yang dapat dilihat pada Tabel 4-5. Dalam skenario ini, pemerintah daerah akan mengelola pembiayaan operasional yang diperlukan dan pendapatan untuk setiap tahunnya. Dari tabel di bawah dapat dilihat bahwa pembiayaan operasional terbesar dibutuhkan oleh pengolahan sampah menjadi listrik dengan PSEL. Namun demikian, pendapatan yang dihasilkan dari PSEL ini paling besar jika dibandingkan dengan pengolahan lainnya.

Tabel 4-5

Pembiayaan OPEX oleh pemerintah daerah

Sumber: *Permendagri 7/2021, **Data PSEL Benowo,

*** <https://jacksonlab.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj15141/f/cm2012.pdf>, ^ Sekitar 30% pengurangan volume, ^^ Dari perhitungan 1500 tpd MRF dan landfill,

^^^ Harga RDF Rp 300.000/ton

Teknologi	CAPEX (juta Rp/tpd)	Lahan (m2/tpd)	OPEX (juta Rp/tahun.tpd)	Ext. Revenue (juta Rp/tahun.tpd)	Reduksi Sampah (%)	GHG*** (kg CO2 eq)
SL	0	415*	52*	204	0	1257
MRF-based	0	290^	85^^	295	10	1257
PSEL	0	19	114**	340	90	374
RDF	0	50	65	254^^^	85	9
LM (+RDF)	0	35	45	236^^^	60	11

5.5.2 Pembiayaan oleh Pemerintah Daerah dan Swasta

Dalam skenario pembiayaan ini, pemerintah daerah hanya memberikan *tipping fee* kepada pengolah sampah. Pembiayaan yang termasuk ke dalam lingkup pemerintah daerah dapat dilihat pada Tabel 4-6. *Tipping fee base* merupakan biaya yang dikeluarkan saat kondisi biasa (*business as usual*), sementara untuk *tipping fee high* dan *low* masih dapat ditentukan dengan accuan Permendagri No. 7 Tahun 2021.

Tabel 4-6

Pembiayaan OPEX oleh pemerintah daerah

Sumber: *Permendagri 7/2021, **Data PSEL Benowo,

*** <https://jacksonlab.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj15141/f/cm2012.pdf>, ^ Sekitar 30% pengurangan volume, ^^ Dari perhitungan 1500 tpd MRF dan landfill,

^^^ Harga RDF Rp 300.000/ton

Teknologi	CAPEX (juta Rp/tpd)	Lahan (m2/tpd)	OPEX (juta Rp/tahun. tpd)	Ext. Revenue (juta Rp/tahun. tpd)	Interests	Tipping Fee	Reduksi Sampah (%)	GHG*** (kg CO2 eq)
SL	0	290*	0	0	0	(=) BASE	0	1257
MRF-based	0	203^	0	0	0	(=) BASE	10	1257
PSEL	0	19	0	0	0	(+) HIGH	90	374
RDF	0	50	0	0	0	(+) LOW	85	9
LM (+RDF)	0	35	0	0	0	(+) LOW	60	11

Pembiayaan CAPEX dalam skenario ini dilakukan oleh pihak swasta. Selain itu pengelolaan pembiayaan OPEX dan pendapatan juga dilakukan oleh swasta. Perbandingan pembiayaan dapat dilihat pada Tabel 4-7. Pengelolaan sampah secara konvensional dijadikan acuan, karena pengelolaan ini merupakan metode yang saat ini paling umum dilakukan. Dapat dilihat bahwa pengolahan sampah menjadi listrik dengan PSEL memiliki CAPEX dan OPEX serta pendapatan yang paling tinggi.

Tabel 4-7

Pembiayaan OPEX oleh pemerintah daerah

Sumber: *Permendagri 7/2021, **Data PSEL Benowo,

*** <https://jacksonlab.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj15141/f/cm2012.pdf>, ^ Sekitar 30% pengurangan volume, ^^ Dari perhitungan 1500 tpd MRF dan landfill,

^^^ Harga RDF Rp 300.000/ton

Teknologi	CAPEX (juta Rp/tpd)	Lahan (m2/tpd)	OPEX (juta Rp/tahun. tpd)	Ext. Revenue (juta Rp/tahun. tpd)	Interests	Tipping Fee	Reduksi Sampah (%)	GHG*** (kg CO2 eq)
SL	248*	290*	52*	204	YES	0	1257	1257
MRF-based	510^^	203^	85^^	295	YES	10	1257	1257
PSEL	1,008	19	114**	340	YES	90	374	374
RDF	406	50	65	254^^^	YES	85	9	9
LM (+RDF)	446	35	45	236^^^	YES	60	11	11

4.6 PERBANDINGAN ANALISIS FINANSIAL TEKNOLOGI PENGOLAHAN SAMPAH

Teknologi pengolahan sampah yang digunakan di Indonesia saat ini sudah cukup bervariasi. Secara umum pengelolaan sampah akhir masih didominasi dengan cara konvensional dengan pembuangan di TPA tanpa pengolahan akhir. Sistem MRF, PSEL, RDF Plant, dan *Landfill Mining* juga sudah mulai banyak diminati untuk pengolahan sampah dengan skala besar. Pemilihan pengelolaan sampah ini bisa dilakukan dengan mempertimbangkan analisis finansial terkait pengelolaan.

Pemilihan sistem pengolahan sampah yang digunakan dapat dinilai dari biaya-biaya terkait sistem yang digunakan. Setiap teknologi yang digunakan memiliki konfigurasi komponen yang

berbeda-beda sehingga unsur pembiayaan setiap jenis teknologi memiliki nilai yang berbeda. Perbandingan analisis finansial setiap teknologi dilakukan dengan membandingkan tiga nilai yaitu nilai total investasi (CAPEX), nilai total operasional dan perawatan (OPEX) dan pendapatan dari penjualan produk (*Revenue*). Teknologi yang dibandingkan pada analisis ini tidak terbatas pada 3 (tiga) jenis teknologi yang telah dijelaskan sebelumnya, akan tetapi juga membandingkan pengolahan sampah dengan metode konvensional dan basis pemilahan yang terstruktur. Tabel 4-8 berikut menunjukkan data finansial dari kelima teknologi dengan patokan biaya yang sebenarnya.

Tabel 4-8
Data Finansial Teknologi Pengolahan Sampah

Teknologi	Capital (juta Rp/tpd)	Capital (Rp/ton)	O&M (juta Rp/ tahun .tpd)	O&M (Rp/ton)	Ext. Revenue (juta Rp/tahun. tpd)	Ext. Revenue (Rp/ton)
SL	248	33.973	52	142.466	0	-
MRF-based	510	69.863	85	232.877	91	250.000
WtE	1062	145.459	120	329.015	143	391.358
RDF	435	59.613	70	190.879	53	144.701
LM (+RDF)	454	62.165	46	125.445	33	91.575

Tabel 4-8 menunjukkan perbandingan analisis finansial antara 5 (lima) teknologi yang ada di Indonesia. Data-data pada tabel tersebut didapatkan berdasarkan data yang ada di lapangan dengan penyeragaman kapasitas di 1.000 tpd. Nilai yang didapatkan di lapangan merupakan harga-harga terpakai pada saat teknologi tersebut dibangun, sehingga dilakukan penyesuaian dengan nilai inflasi untuk menentukan biaya pada saat ini. Di antara kelima jenis teknologi yang digunakan di Indonesia, diketahui PSEL memiliki nilai investasi yang paling besar mencapai 1.062 triliun rupiah untuk kapasitas 1.000 ton per hari. Sedangkan nilai investasi paling kecil didapatkan oleh cara konvensional yaitu dengan membuang langsung ke TPA setempat mencapai 248 milyar rupiah. Pengeluaran yang digunakan untuk biaya operasional dan perawatan tertinggi juga ditempati oleh PSEL yaitu mencapai 120 miliar rupiah per tahunnya. Sedangkan pengeluaran terkecil untuk kebutuhan yang sama adalah landfill mining (+RDF) mencapai 46 miliar rupiah per tahunnya. Pendapatan (*revenue*) terbesar didapatkan oleh pengolahan sampah dengan PSEL mencapai 143 miliar rupiah per tahunnya sedangkan terkecil ditempati oleh pengolahan sampah SL dengan tidak menghasilkan apapun.

Dari tabel yang sama juga didapatkan secara umum nilai-nilai CAPEX, OPEX, dan pendapatan per ton sampah yang masuk ke sistem pengolahan terpilih. Untuk setiap ton sampah yang masuk untuk diolah, teknologi menggunakan PSEL memiliki nilai capital tertinggi mencapai Rp 145.459/ton dan disusul oleh MRF-based mencapai Rp 69.863/ton dan landfill mining mencapai Rp 62.165/ton. Nilai capital terkecil didapatkan oleh pengolahan sampah secara SL mencapai Rp 33.973/ton. Pada nilai OPEX urutan total biaya antara kelima jenis pengolahan memiliki urutan yang sama yaitu PSEL terbesar mencapai Rp 329.015 /ton dan terkecil adalah dengan cara SL mencapai Rp 142.466/ton. Sedangkan nilai revenue nilai PSEL sangat besar mencapai Rp 391.358/ton dan terkecil yaitu cara SL tidak menghasilkan apapun.

Pada analisis finansial ini pun dilakukan perbandingan dari 3 skenario simulasi biaya pengelolaan sampah, seperti yang dibahas di bagian IV.5 sebelumnya. Skenario 0 (*base scenario*) merupakan simulasi kebutuhan biaya setiap teknologi dengan memperhitungkan nilai saat ini (*present value*). Perbandingan analisis finansial dengan Skenario tersebut dapat dilihat pada tabel Tabel 4-9

Tabel 4-9
Data Finansial Teknologi Pengolahan Sampah

Teknologi	CAPEX (Rp/ton)	OPEX (Rp/ton)	Total Cost (Rp/ton)	Ext. Revenue (Rp/ton)	Subsidy (Tipping Fee) (Rp/ton)
SL	33.973	142.466	176.438	-	176.439
MRF-based	69.863	232.877	302.740	250.000	52.740
WtE	145.459	329.015	474.474	391.358	83.116
RDF	59.613	190.879	250.492	144.701	105.791
LM (+RDF)	62.165	125.445	187.610	91.575	96.035

- Asumsi peralatan dan fasilitas pengelolaan sampah memiliki umur pakai selama 20 tahun.
- Nilai tipping fee tidak termasuk untuk nilai pendapatan

Skenario lainnya adalah analisis finansial perbandingan antara teknologi-teknologi yang digunakan pada fasilitas pengolahan sampah dengan mempertimbangkan nilai di masa depan. Skenario 1 berupa pembiayaan modal dari Pemerintah Pusat memperhitungkan nilai inflasi dan tipping fee terkait, sedangkan Skenario 2 berupa pembangunan dan operasi dari Pihak Swasta memperhitungkan nilai suku bunga bank untuk perhitungan CAPEX, nilai inflasi untuk perhitungan OPEX, dan pendapatan (*revenue*).

Dalam perhitungan, nilai inflasi yang digunakan yaitu 3% dan nilai suku bunga bank yang digunakan adalah nilai Suku Bunga Dasar

Kredit (SBDK) pada bank-bank BUMN untuk kredit korporasi sebesar 8%. Asumsi umur pakai setiap teknologi adalah 20 tahun, atau dapat diartikan pembiayaan dapat dilakukan selama 20 tahun. Nilai-nilai tersebut digunakan untuk mengantisipasi dan memperhitungkan biaya yang harus disiapkan di masa yang akan datang jika diasumsikan biaya yang dikeluarkan setiap tahunnya adalah sama. Asumsi lain yang digunakan pada perhitungan tersebut bahwa nilai inflasi seragam dan tidak ada perubahan kebutuhan pada biaya operasional dan perawatan. Kegiatan pengolahan sampah di setiap jenis teknologi dianggap bekerja tanpa ada waktu berhenti atau setara dengan 365 hari/tahun. Analisis finansial untuk Skenario 1 dan Skenario 2 dapat dilihat pada Tabel 4-10 - Tabel 4-11 sebagai berikut.

Tabel 4-10
Perbandingan Finansial Pengolahan Sampah Skenario 1

Teknologi	CAPEX (Rp/ton)	OPEX (Rp/ton)	Total Cost (Rp/ton)	Ext. Revenue (Rp/ton)	Subsidy (Tipping Fee) (Rp/ton)
SL	45.670	191.519	237.189	0	237.189
MRF-based	93.918	313.059	406.977	297.638	109.339
WtE	202.838	458.801	661.639	467.213	194.427
RDF	84.150	269.445	353.595	172.748	180.847
LM (+RDF)	84.596	170.709	255.306	109.324	145.981

- Asumsi peralatan dan fasilitas pengelolaan sampah memiliki umur pakai selama 20 tahun.
- Nilai tipping fee tidak termasuk untuk nilai pendapatan

Pada Skenario 1 nilai CAPEX, OPEX, dan pendapatan (*revenue*) berubah dengan perubahan inflasi setiap tahunnya. Nilai OPEX dari yang terbesar pun diduduki oleh PSEL mencapai Rp458.801,00/ton dan SL mencapai Rp191.519,00/ton. Sedangkan pendapatan (*revenue*) dari teknologi yang digunakan PSEL mencapai Rp 467.213/ton dan SL tidak menghasilkan apapun.

Tabel 4-10
Perbandingan Finansial Pengolahan Sampah Skenario 2

Teknologi	CAPEX (Rp/ton)	OPEX (Rp/ton)	Total Cost (Rp/ton)	Ext. Revenue (Rp/ton)	Subsidy (Tipping Fee) (Rp/ton)
SL	69.204	191.519	260.722	0	260.722
MRF-based	142.314	313.059	455.374	297.638	157.735
WtE	296.307	458.801	766.163	467.213	298.950
RDF	121.434	269.445	396.957	172.748	224.210
LM (+RDF)	126.633	170.709	298.898	109.324	189.574

- Asumsi peralatan dan fasilitas pengelolaan sampah memiliki umur pakai selama 20 tahun.
- Nilai tipping fee tidak termasuk untuk nilai pendapatan

Pada Skenario 2, nilai investasi dari sistem pengolahan PSEL dengan memperhitungkan biaya inflasi yang digunakan sebesar 3% diketahui mencapai Rp 296.307,00/ton hingga habis masa pakainya seperti batasan yang telah disebutkan. Sedangkan nilai investasi terendah dari beberapa pilihan sistem pengolahan sampah dengan metode SL mencapai Rp 69.204,00/ton. Nilai OPEX dari Skenario 2 ini sama dengan nilai Skenario 1 yaitu PSEL tertinggi mencapai Rp 458.801,00/ton dan SL mencapai Rp 191.519,00/ton. Sedangkan pendapatan (*revenue*) dari teknologi yang digunakan PSEL mencapai Rp 467.213,00/ton dan SL tidak menghasilkan apapun. Total pembiayaan yang dibutuhkan untuk

setiap ton pengolahan sampah dengan sistem SL, MRF-based, PSEL, RDF Plant, dan Landfill Mining masing-masing adalah Rp260.722,00/ton, Rp 455.374,00/ton, Rp 766.163,00/ton, Rp 396.957,00/ton, dan Rp 298.898,00/ton.

Tabel 4-8 - Tabel 4-11 menunjukkan urutan biaya CAPEX, OPEX dan pendapatan dari setiap teknologi terpilih. Dari perbandingan data pada tabel tersebut diketahui pengolahan sampah dengan biaya tertinggi secara rata-rata dimiliki oleh PSEL dan terkecil adalah cara SL. Pembiayaan setiap tahun berbeda karena nilai uang pada setiap tahun selalu berkembang akibat adanya inflasi.



5

ANALISIS TEKNOLOGI DAN PEMBIAYAAN

5.1 Analisis Teknologi Optimal

5.2 Skema Pembiayaan Optimal

5.3 Analisis Sensitivitas Pembiayaan

5.1 ANALISIS TEKNOLOGI OPTIMAL

Analisis pemilihan teknologi yang optimal dapat dilakukan dengan pembobotan beberapa aspek dari sisi CAPEX, OPEX, *revenue*, lahan, reduksi sampah, dan GHG yang dihasilkan dari setiap teknologi. Pembobotan dari masing-masing aspek tersebut dapat dilihat pada Tabel 5-1 - Tabel 5-5.

Pembobotan ini membandingkan teknologi SL, MRF, PSEL, RDF *Plant*, dan *landfill mining* dengan RDF. Skor yang diberikan untuk setiap teknologi mempunyai skala 0-10 dengan skor 0

menunjukkan nilai yang paling rendah dan skor 10 menunjukkan nilai yang paling baik. Sementara itu, untuk persentase pembobotan dibagi menjadi 20% CAPEX, 30% untuk OPEX dan *revenue*, 10% untuk lahan, 30% untuk reduksi sampah, dan 10% untuk GHG. Pembobotan ini berdasarkan prioritas dalam pemilihan teknologi pengolahan sampah. Dalam hal ini, *tipping fee* dianggap sama untuk seluruh teknologi yaitu USD 40/ton atau Rp 570.000/ton.

Tabel 5-1
Pembobotan CAPEX

Teknologi	CAPEX (Rp/ton)	Skor	Bobot (20%)
SL	248	8	1,6
MRF-based	510	5	1
PSEL	1.008	1	0,2
RDF	406	6	1,2
LM (+RDF)	446	6	1,2

Tabel 5-2
Pembobotan CAPEX dan *revenue*

Teknologi	OPEX (juta Rp/tpd)	Ext. Revenue (juta Rp/tpd)	Skor	Bobot (20%)
SL	52*	204	5	1,5
MRF-based	85 ^{^^}	295	8	2,4
PSEL	114 ^{**}	340	10	3
RDF	65	254 ^{^^^}	7	2,1
LM (+RDF)	45	236 ^{^^^}	7	2,1

Tabel 5-3
Pembobotan lahan

Teknologi	Lahan (m2/tpd)	Skor	Bobot (10%)
SL	290*	1	0,1
MRF-based	203^	2	0,2
PSEL	19	10	1
RDF	50	6	0,6
LM (+RDF)	35	8	0,8

Tabel 5-4
Pembobotan reduksi sampah

Teknologi	Reduksi sampah (%)	Skor	Bobot (30%)
SL	0	0	0
MRF-based	10	1	0,3
PSEL	90	9	2,7
RDF	85	8	2,4
LM (+RDF)	60	6	1,8

Tabel 5-5
Pembobotan GHG

Teknologi	Reduksi sampah (%)	Skor	Bobot (10%)
SL	0	0	0
MRF-based	10	1	0,3
PSEL	90	9	2,7
RDF	85	8	2,4
LM (+RDF)	60	6	1,8

Pembobotan dari setiap aspek ini selanjutnya dijumlahkan dengan hasilnya yang dapat dilihat pada Tabel 5-6. Hasil pembobotan menunjukkan bahwa PSEL memiliki nilai yang paling tinggi. Hal ini disebabkan oleh produk listrik yang dihasilkan dianggap pasti dibeli oleh PLN sehingga pembobotan OPEX dan *revenue* dapat menunjukkan nilai yang tinggi. Selain itu, pengurangan sampah yang tinggi juga membuat pembobotan reduksi sampah PSEL bernilai tinggi.

Selain PSEL, RDF juga memiliki total yang sedikit lebih kecil dari PSEL namun juga berpotensi menjadi teknologi pengolahan sampah yang dapat diterapkan di Indonesia. Tantangan dari pengolahan sampah menjadi RDF yaitu *offtaker* yang dapat memanfaatkan produk RDF tersebut.

Tabel 5-6
Total pembobotan

Teknologi	Bobot CAPEX (20%)	Bobot OPEX dan Revenue (30%)	Bobot Lahan (10%)	Bobot reduksi sampah (30%)	Bobot GHG (10%)	Total
SL	1,6	1,5	0,1	0	0	3,2
MRF-based	1	2,4	0,2	0,3	0	3,9
PSEL	0,2	3	1	2,7	0,7	7,6
RDF	1,2	2,1	0,6	2,4	1	7,3
LM (+RDF)	1,2	2,1	0,8	1,8	0,9	6,8

5.2 SKEMA PEMBIAYAAN OPTIMAL

Pembobotan pemilihan teknologi menunjukkan PSEL dan RDF merupakan teknologi yang paling optimal dan berpotensi untuk diimplementasikan di Indonesia dibandingkan dengan teknologi lainnya. Pembobotan skema pembiayaan optimal selanjutnya hanya dilakukan untuk teknologi PSEL dan RDF saja. Skenario pembiayaan dibagi menjadi dua dengan pembobotan berskala 1 – 10.

Pada skenario 1 digunakan asumsi bahwa pembiayaan CAPEX

dilakukan oleh pemerintah pusat dan pembiayaan OPEX diberikan oleh pemerintah daerah. Nilai pembobotan skenario 1 tersebut dapat dilihat pada Tabel 5-7 dan Tabel 5-8. Dari tabel tersebut total skor pada teknologi RDF menunjukkan nilai CAPEX yang lebih tinggi. Sementara itu, untuk pembiayaan OPEX, kedua teknologi menunjukkan nilai yang sama. Perhitungan pada kolom *revenue* (pendapatan) dalam tabel di bawah ini tidak memasukkan biaya tipping fee yang harus dikeluarkan oleh pemerintah daerah karena pengelolaan dilakukan oleh pemerintah daerah sendiri.

Tabel 5-7
Pembobotan pembiayaan CAPEX oleh pemerintah pusat

Teknologi	CAPEX (juta Rp/tpd)	Skor CAPEX	Kebutuhan Lahan (m2/tpd)	Skor Lahan	Total Skor
PSEL	1.008	1	19	10	11
RDF	406	6	50	6	12

Tabel 5-8
Pembobotan pembiayaan OPEX oleh pemerintah daerah

Teknologi	OPEX (juta Rp/tahun.tpd)	Skor OPEX	Ext. Revenue (juta Rp/tahun.tpd)	Skor pendapatan	Total Skor
PSEL	114**	1	136*	9	10
RDF	65	6	50*	4	10

Pada pembobotan CAPEX yang dibandingkan antara teknologi pengolahan sampah PSEL dan RDF memiliki nilai yang berbeda 1 poin dengan PSEL memiliki nilai yang lebih tinggi. Sedangkan pada sisi OPEX diketahui keduanya memiliki bobot yang sama besar yaitu 10. Sehingga untuk pembiayaan skenario 1 dengan menjumlahkan skor antara CAPEX dan OPEX dari kedua teknologi tersebut diketahui teknologi RDF lebih unggul. Teknologi ini membutuhkan nilai CAPEX dan OPEX yang lebih rendah sehingga pembiayaannya akan lebih aman untuk pemerintah pusat maupun daerah.

Sementara itu, untuk skenario 2 pembiayaan CAPEX dan OPEX berasal dari swasta dan *tipping fee* dari pemerintah daerah. Perbandingan dan hasil pembobotan dapat dilihat pada Tabel 5-9 dan Tabel 5-10. Dari pembobotan pembiayaan CAPEX, OPEX, dan *revenue*, RDF menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan PSEL. *Tipping fee* termasuk ke dalam perhitungan pendapatan karena pengelolanya adalah pihak swasta. Dalam pembobotan pembiayaan oleh pemerintah daerah, diberlakukan nilai *tipping fee* yang sama untuk kedua teknologi. PSEL dapat mengurangi sampah lebih banyak dibandingkan RDF, sehingga skor PSEL menjadi lebih besar dibandingkan dengan RDF.

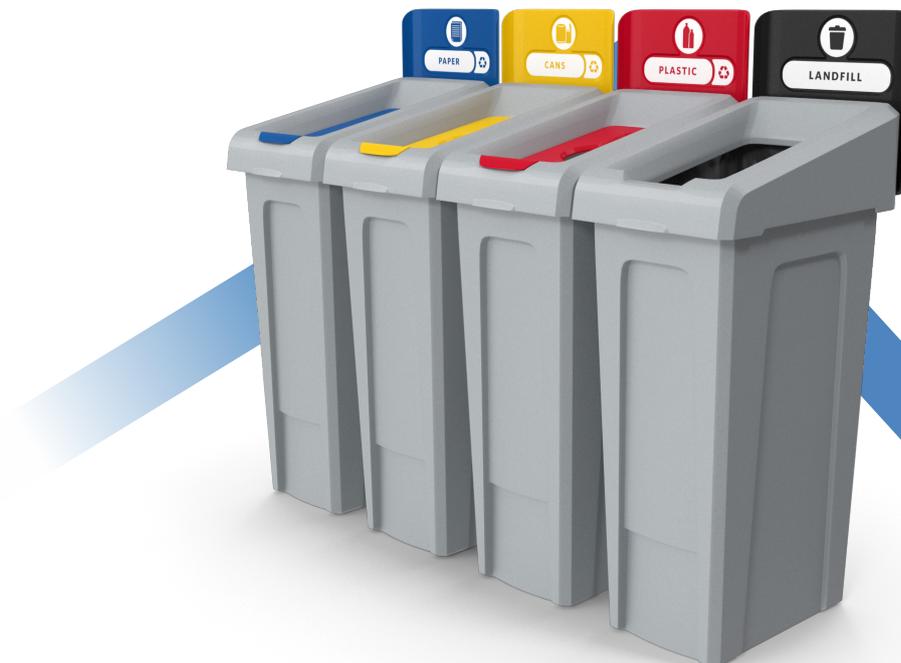
Tabel 5-9
Pembobotan pembiayaan CAPEX dan OPEX oleh swasta

Teknologi	CAPEX (juta Rp/tpd)	Skor	OPEX (juta Rp/tahun.tpd)	Skor	Ext. Revenue (juta Rp/tahun.tpd)	Skor	Total Skor
PSEL	1.008	1	114	1	340	9	11
RDF	406	6	65	6	254	4	16

Tabel 5-10
Pembobotan pembiayaan *tipping fee* oleh pemerintah daerah

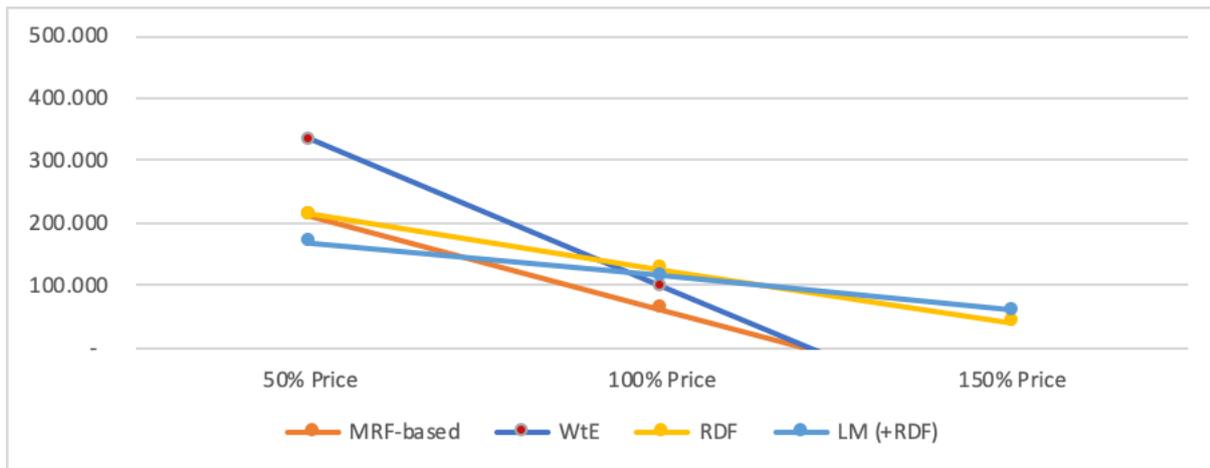
Teknologi	Tipping Fee (Rp/ton)	Skor	Waste Reduction (%)	Skor	Total Skor
PSEL	204	6	90	9	15
RDF	204	6	85	8	14

Pembobotan pembiayaan CAPEX, OPEX, dan *revenue*, serta pembobotan *tipping fee* untuk kedua teknologi menunjukkan nilai yang tidak berbeda jauh. Namun demikian, nilai RDF lebih tinggi dibandingkan dengan PSEL sehingga untuk pembiayaan skenario 2 ini dapat dipilih teknologi RDF. Teknologi ini membutuhkan nilai CAPEX dan OPEX yang lebih rendah sehingga pembiayaannya akan lebih aman untuk pihak swasta maupun daerah selama memiliki kontrak yang jelas dengan pihak *offtaker*.



5.3 ANALISIS SENSITIVITAS PEMBIAYAAN

Analisis finansial sederhana di subbab sebelumnya didasarkan pada satu kondisi saja, namun hal ini tidak menggambarkan kinerja masing-masing teknologi jika terjadi perubahan kondisi operasi terutama dari aspek eksternal. Subbab ini menggambarkan kinerja finansial teknologi PSEL (WtE), RDF, LM dan MRF jika satu aspek eksternal yaitu harga jual produk berubah. Teknologi SL tidak masuk dalam analisis karena tidak memiliki produk yang dapat dijual.



Gambar 5-1
Besarnya biaya subsidi PSEL (WtE), RDF, LM dan RDF saat harga jual berubah dalam Skenario 1.

Dari gambar di atas terlihat bahwa pada Skenario 1, penurunan harga jual listrik hingga 50% akan menyebabkan kebutuhan subsidi melonjak hampir tiga kali lipat dari kisaran 120 ribu menjadi 330 ribu, sedangkan dalam kasus yang sama di Skenario 2 (gambar di bawah) kenaikan subsidi akan sedikit lebih landai dari kisaran 220 ribu menjadi 455 ribu (dua kali lipat), namun secara absolut nilainya menjadi sangat tinggi.



Gambar 5-2
Besarnya subsidi PSEL (WtE), RDF, LM dan RDF saat harga jual berubah dalam Skenario 2.

Berbeda dengan teknologi PSEL, teknologi RDF, LM dan MRF tidak terlalu sensitif terhadap harga jual produk. Dari gambar di atas terlihat bahwa pada Skenario 1, penurunan harga RDF hingga 50% hanya akan menyebabkan kebutuhan subsidi meningkat dari kisaran 120 ribu menjadi 210 ribu, sedangkan dalam kasus yang sama di Skenario 2 (Gambar V-2) kenaikan subsidi juga akan terjadi dari kisaran 160 ribu menjadi 260 ribu. Hal yang serupa juga terjadi pada teknologi LM, meski pada teknologi MRF yang sangat bergantung kepada penjualan barang daur ulang, perubahan harga jual produk akan cukup mempengaruhi besar

subsidi yang diperlukan hingga dapat melampaui kebutuhan subsidi teknologi RDF.

Dari hasil di atas dapat diambil kesimpulan bahwa teknologi RDF dan LM tidak terlalu sensitif terhadap harga jual maupun kuantitas penjualan produk, namun teknologi PSEL (WtE) sangat sensitif terhadap harga jual listrik maupun jumlah ekspor listrik ke PLN, sehingga sangat perlu berhati-hati dalam perencanaan dan pengoperasiannya.



6

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1 Kesimpulan

5.2 Rekomendasi

6.1 KESIMPULAN

1. Kajian ini membandingkan kinerja pengolahan sampah PSEL, RDF, dan LM dari aspek teknologi dan finansial. Dari aspek teknologi, kajian ini mempertimbangkan kemampuan reduksi sampah dan kebutuhan lahan spesifik, sementara dari aspek finansial dilakukan melalui perbandingan CAPEX, OPEX, dan revenue.
2. Kajian kinerja finansial pengolahan sampah PSEL, RDF dan LM dalam skenario pembiayaan oleh pemerintah pusat maupun swasta menunjukkan bahwa teknologi RDF merupakan teknologi yang paling aman untuk diimplementasikan, dengan mempertimbangkan nilai CAPEX dan OPEX yang rendah namun memiliki kemampuan reduksi sampah yang cukup tinggi

6.2 REKOMENDASI

1. Persyaratan utama untuk keberhasilan aplikasi RDF Plant adalah kontrak jangka panjang dengan offtaker RDF. Dengan adanya offtaker, pendapatan dari RDF plant akan lebih terjamin, walaupun pendapatan utama RDF berasal dari tipping fee.
2. Saat tidak ada penjualan RDF atau tipping fee dalam nilai pendapatan, jumlah subsidi yang harus dikeluarkan untuk menutupi biaya operasional yaitu Rp 45 juta/tahun.tpd atau Rp 269.445/ton sampah yang diolah.
3. Untuk CAPEX, disarankan pembiayaan dilakukan oleh pemerintah pusat dengan catatan pembiayaan ini telah dianggarkan dan rekomendasi ini tidak memperhitungkan adanya pengembalian uang yang harus dilakukan oleh Pemerintah Pusat (contoh: pinjaman luar negeri).
4. Perlu ada regulasi yang mengatur penggunaan RDF pada industri karena emisi dari proses pembakaran dibebankan ke offtaker.
5. Bila teknologi RDF Plant dijalankan tanpa adanya penjualan produk dan tipping fee, nilai subsidi yang diberikan harus memenuhi setidaknya biaya OPEX.
6. Kajian finansial dalam studi ini dapat menjadi referensi untuk perbandingan antar teknologi. Adapun untuk mengkaji kondisi finansial secara detail, perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk setiap proyek teknologi pengolahan sampah yang dilakukan (site specific).





DAFTAR PUSTAKA

- Dhar, A. (2015). *Review, Landfill Mining - A Comprehensive Literature*. The University of Texas at Arlington. doi:10.13140/RG.2.2.31092.55687
- DLH DKI Jakarta. (2019). *Data-data TPST Bantargebang*. Retrieved from Portal Resmi Unit Pengelola Sampah Terpadu Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta: <https://upstdlh.id/tpst/data>
- DLH DKI Jakarta. (2019). *Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA)*. Retrieved from Portal Resmi Unit Pengelola Sampah Terpadu Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta: <https://upstdlh.id/tpst/pltsa>
- Faizah, N. (2019). *Timbulan Sampah Nasional Capai 64 juta ton per Tahun*. Retrieved from Bisnis.com: <https://ekonomi.bisnis.com/read/20190221/99/891611/timbulan-sampah-nasional-capai-64-juta-ton-per-tahun>
- Forfas. (2006). *Waste Management Benchmarking: A Baseline Assessment*. Forfas.
- Frändegård, P., Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2013). *A novel approach for environmental evaluation of landfill mining*. *Journal of Cleaner Production*, 24-34.
- Gatra, S. (2019). *Disorot Leonardo DiCaprio, Ini 7 Fakta TPST Bantargebang yang Kian Kritis*. Retrieved from Kompas: <https://megapolitan.kompas.com/read/2019/09/07/10432001/disorot-leonardo-dicaprio-ini-7-fakta-tpst-bantargebang-yang-kian-kritis?page=all>
- Helsen, L., & Bosmans, A. (2010). *Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process*. 1st Int. Symposium on Enhanced Landfill Mining.
- Joseph, K., Nagendran, R., Palanivelu, K., Thanasekaran, K., & Visvanathan, C. (2004). *Dumpsite rehabilitation and landfill mining*. Chennai, India: Anna University.
- Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*. (2017). Peraturan Presiden Nomor 97.
- KLHK. (2016). *Pedoman Umum Pemanfaatan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga Sebagai Bahan Bakar Alternatif Refuse-Derived Fuel*. KLHK.
- McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M., & Hindle, P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell.
- Pemerintah Kota Surabaya. (2022). *Pemerintah Kota Surabaya*. Retrieved from <https://www.surabaya.go.id/id/berita/65834/kurangi-volume-sampah-kader-su>
- Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*. (2013). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 3.
- Purnama Putra, H., Damanhuri, E., & Sembiring, E. (2020). *The role of MRF in Indonesia's solid waste management system (case study of the Special Region of Yogyakarta, Indonesia)*. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. doi:10.1007/s10163-020-00979-7
- Ridlo. (2019). *Ini Kendala Cilacap Olah Sampah Jadi Batubara*. Retrieved from Gatra: <https://www.gatra.com/news-444522/teknologi/category-49-Politik.html>
- SIPSN. (2019). *Data Pengelolaan Sampah*. Retrieved from sipsn.menlhk.go.id: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- Vijaya Kumar, M. (2021). *A Review on Municipal Solid Waste Disposal by Sanitary Landfilling Method*. *International Journal of Research and Review*. doi:10.52403/ijrr.20211066

LAPORAN KAJIAN
**PERBANDINGAN TEKNOLOGI
PENGOLAHAN AKHIR SAMPAH
MENGUNAKAN ANALISIS BIAYA DAN MANFAAT**

Emissions Reduction in Cities through
Improved Waste Management Project
2022

