



TUGAS AKHIR – RE 141581

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)
PENGOLAHAN SAMPAH SECARA TERMAL
(STUDI KASUS: TPA BENOWO, KOTA
SURABAYA)

TAMARA AULIA RACHIM
3313100063

Dosen Pembimbing
I D A A Warmadewanthi, S.T, M.T, Ph.D
NIP. 19750212 199903 2 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR – RE 141581

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)
PENGOLAHAN SAMPAH SECARA TERMAL
(STUDI KASUS: TPA BENOWO, KOTA
SURABAYA)

TAMARA AULIA RACHIM
3313100063

Dosen Pembimbing
I D A A Warmadewanthi, S.T, M.T, Ph.D
NIP. 19750212 199903 2 001

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT – RE 141581

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF SOLID WASTE THERMAL TREATMENT (CASE STUDY: BENOWO LANDFILL, SURABAYA)

TAMARA AULIA RACHIM
3313100063

SUPERVISOR
I D A A. Warmadewanthi, S.T, M.T, Ph.D
NIP. 19750212 199903 2 001

DEPARTEMEN OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil and Planning
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

LEMBAR PENGESAHAN

*LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) PENGOLAHAN SAMPAH
SECARA TERMAL (STUDI KASUS: TPA BENOWO, KOTA
SURABAYA)*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

TAMARA AULIA RACHIM

Nrp. 3313 100 063

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

s/n



IDA A Wamadewanthi, S.T, MT, PhD.

NIP. 19750212 199903 2 001



LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) PENGOLAHAN SAMPAH SECARA TERMAL (STUDI KASUS: TPA BENOWO, KOTA SURABAYA)

Nama : Tamara Aulia Rachim
NRP : 3313100063
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : I D A A Warmadewanthi, S.T, M.T,
Ph.D

ABSTRAK

Saat ini, TPA Benowo Kota Surabaya, masih menggunakan metode *controlled landfill* yang memerlukan lahan yang luas dan menghasilkan emisi yang besar dari produksi gas dan lindi. Metode ini bisa diganti dengan teknologi yang mampu meminimalisir lahan adalah pengolahan termal. Untuk itu, penelitian ini bertujuan untuk memprediksi berbagai metode pengolahan termal sampah yang paling menguntungkan dari aspek teknis dan lingkungan.

Penelitian ini diawali dengan analisis komposisi sampah berdasarkan ASTM D5231-92 dengan metode *cluster sampling*. Selain itu, jumlah sampah yang masuk untuk perencanaan termal diproyeksikan menggunakan proyeksi penduduk. Analisis karakteristik sampah yaitu analisis proksimat, perhitungan analisis ultimat, dan nilai kalor dengan metode bom kalorimetri dilakukan untuk mengetahui kemampuan sampah untuk diproses dengan pengolahan termal. Analisis aspek teknis dihitung berdasarkan data karakteristik dan jumlah sampah yang masuk. Analisis aspek lingkungan dengan metode LCA dilakukan dengan memasukkan data *input* dan *output* proses pengolahan termal ke dalam *software* SimaPro v.8.3

Analisis aspek teknis dan lingkungan menggunakan proyeksi timbulan sampah yang masuk ke TPA Benowo pada tahun 2027, yaitu sebesar 2.528 ton/hari. Dari hasil analisis aspek teknis, dapat diketahui bahwa pengolahan termal insinerasi sampah tercampur paling menguntungkan karena hanya membutuhkan lahan seluas 2.281 m², 2 buah reaktor, dan 27 pekerja. Sedangkan dari aspek lingkungan, metode pengolahan

termal yang memiliki dampak paling kecil terhadap lingkungan adalah gasifikasi. Selain itu, jenis sampah yang menghasilkan emisi paling kecil merupakan sampah organik dengan *biowaste*. Dampak lingkungan dari gasifikasi sampah organik dengan *biowaste* dalam waktu satu tahun adalah 22.840 kg CO₂ eq GRK, $8,22 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq *ozone layer depletion*, 3,28 kg C₂H₄ eq *photochemical oxidation*, 25,8 kg SO₂ eq zat penyebab asidifikasi, serta 331 kg PO₄ eq zat penyebab eutrofikasi.

Kata Kunci: Karakteristik sampah, *Life Cycle Assessment* (LCA), Pengolahan Termal, SimaPro v.8.3, TPA Benowo Surabaya

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) PENGOLAHAN SAMPAH SECARA TERMAL (STUDI KASUS: TPA BENOWO, KOTA SURABAYA)

Name of Student : Tamara Aulia Rachim
ID Number : 3313100063
Department : Environmental Engineering
Supervisor : I D A A Warmadewanthi, S.T, M.T,
Ph.D

ABSTRACT

Currently, Benowo Landfill in Surabaya still uses controlled landfill method that requires a large area of land and produces large emissions from gas and leachate production. This method can be replaced with technology called thermal processing that is able to minimize the use of the land. Therefore, this study aims to predict various thermal processing methods of the most profitable waste from the technical and environmental aspects.

This research began with analysis of solid waste composition based on ASTM D5231-92 with cluster sampling method. The amount of incoming waste for thermal planning was projected by using population projections. Analysis of garbage characteristic such as proximate analysis, calculation of ultimate analysis, and calorific value with bomb method of calorimetry were conducted to know the ability of garbage to be processed by thermal treatment. Technical aspect analysis was calculated based on characteristic data and amount of incoming waste. Environmental aspect analysis by LCA method was conducted by entering input and output data of thermal processing process into SimaPro v.8.3.

Analysis of technical and environmental aspects using the projection of garbage generation into TPA Benowo in 2027, which amounted to 2.528 tons/day. The result of technical aspect analysis was that thermal waste incineration processing is the most advantageous because it only requires 2,281 m² of land, 2 reactors, and 27 workers. While from the environmental aspect, the thermal processing method that has the least impact on the environment was gasification. In addition, the type of waste that

produces the least emission was organic waste with biowaste. The environmental impact of organic waste gasification with biowaste within one year is 22.840 kg CO₂ eq GRK, $8,22 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq ozone layer depletion, 3,28 kg of C₂H₄ eq photochemical oxidation, 25,8 kg SO₂ eq substances cause acidification, and 331 kg PO₄ eq substances cause eutrophication.

Keyword: Benowo Landfill Surabaya, Life Cycle Assessment (LCA), SimaPro v. 8.3, thermal treatment, waste characteristic

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT atas segenap rahmat dan hidayah yang senantiasa diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan laporan Tugas Akhir yang berjudul **“Life Cycle Assessment (LCA) Pengolahan Sampah Secara Termal (Studi Kasus: TPA Benowo, Kota Surabaya)”**. Banyak pihak telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang kepada:

1. Ibu I D A A Warmadewanthi, ST., MT., Ph.D sebagai dosen pembimbing tugas akhir atas arahnya selama penyusunan tugas akhir
2. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc, Bapak Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc, Ph.D, Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, M,T, dan Ibu Dr. Ir. Eliina S Pandebesie, M.T selaku dosen pengarah seminar tugas akhir
3. Bapak Mohamad Amin, Bapak Agus, Bu Eta, Mbak Andin, dan segenap pegawai Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau Kota Surabaya
4. Bapak Andy, Bapak Asnawi, dan segenap karyawan PT. Sumber Organik, *ranger* serta pemulung di TPA Benowo yang telah membantu di lapangan
5. Segenap dosen pengajar, terutama Bapak Welly Herumurti, ST, M.Sc, para laboran khususnya Pak Hadi dan Pak Eddy, Pakde Ardhi, dan segenap karyawan TU.
6. Kedua orang tua, Ibu Endah Kurniadarmi dan Bapak Nanang Abdul Manaf atas kasih sayang dan doa yang mengiringi penulis hingga saat ini
7. Tete Tania, Ade Kiki, Faris, dan A Fadhli yang selalu mendengar keluh kesah serta mencarikan solusi saat pengerjaan tugas akhir
8. Teman-teman Departemen Teknik Lingkungan Angkatan 2013, 2014, 2015, dan 2016 yang telah membantu pelaksanaan pengambilan sampel di TPA Benowo

9. Teman-teman angkatan 2013 Departemen Teknik Lingkungan ITS; Bara, Andre, Alif, Sasa, Martha, Mira, Raras, atas dukungan dan bantuannya selama masa penyusunan tugas akhir
10. Pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu atas semua bantuan yang telah diberikan.

Penulis menyadari masih ada kekurangan dalam laporan tugas akhir ini. Semoga segala yang telah penulis susun dapat menjadi manfaat bagi kita semua.

Surabaya, 20 Juni 2017

Penyusun

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	1
1.4 Ruang Lingkup	1
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB 2	3
TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Komposisi sampah	3
2.2 Karakteristik Sampah	4
2.2.1 <i>Proximate Analysis</i>	4
2.2.2 <i>Ultimate Analysis</i>	7
2.2.3 Nilai Kalor.....	9
2.3 Pengolahan Sampah.....	10
2.3.1 Pengolahan Sampah Secara Fisik.....	11
2.3.2 Pengolahan Sampah Secara Biologis.....	12
2.3.3 Pengolahan Sampah Secara Kimia	12
2.4 Pengolahan Sampah Secara Termal	12
2.4.1 Insinerasi.....	14
2.4.2 Gasifikasi	19
2.4.3 Pirolisis.....	21
2.5 Life Cycle Assessment (LCA).....	22
2.5.1 Aplikasi Metode LCA.....	24
2.5.2 Aplikasi Metode LCA pada Pengelolaan Sampah	25
2.6 SimaPro v.8.3.....	25
2.7 Metode Environmental Product Declarations (EPD) 2007.....	27
2.7.1 Global Warming (GWP100).....	27

2.7.2	Senyawa Penyebab Asidifikasi	28
2.7.3	Senyawa Penyebab Eutrofikasi.....	28
2.8	Gambaran Umum Wilayah Studi	28
BAB 3	.....	33
METODE PENELITIAN	.....	33
3.1	Kerangka Alur Penelitian	33
3.2	Studi Literatur	36
3.3	Pengumpulan Data.....	36
3.3.1	Pengumpulan Data Primer	36
3.3.2	Pengumpulan Data Sekunder	38
3.4	Analisis dan Pembahasan.....	38
3.4.1	Analisis Dampak Lingkungan menggunakan Metode LCA.....	38
3.4.2	Analisis Aspek Teknis	40
BAB 4	.....	43
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	43
4.1	Analisis Kuantitas dan Komposisi Sampah	43
4.2	Analisis Karakteristik Sampah.....	54
4.3	Analisis Aspek Teknis Pengolahan Sampah Secara Termal.....	67
4.3.1	Gasifikasi	74
4.3.2	Insinerasi.....	77
4.3.3	Pirolisis.....	79
4.3.4	Teknis Operasional	82
4.4	Analisis Aspek Lingkungan dengan Metode LCA	83
4.4.1	Tujuan dan Batasan Penelitian	83
4.4.2	Inventarisasi Siklus Hidup	84
4.4.3	Perkiraan Dampak dari Siklus Hidup.....	99
4.4.4	Interpretasi Data.....	105
4.5	Rekomendasi Proses Pengolahan Secara Termal	105
BAB 5	.....	107
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	107
5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran.....	107
DAFTAR PUSTAKA	.....	109

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Sampah di Kota Metropolitan di Indonesia Tahun 2003	4
Tabel 2.2 Analisis Proksimat Tipikal Per Komponen Sampah	5
Tabel 2.3 Data Tipikal <i>Ultimate Analysis</i> pada Sampah ..	7
Tabel 2.4 Nilai Kalor Sampah per Komponen.....	9
Tabel 2.5 Input-output (Energi dan Residu) pada Pengolahan Termal Sampah	13
Tabel 2.6 Emisi Gas sebagai Output dari Pengolahan Termal Sampah	14
Tabel 3.1 Data yang Dibutuhkan untuk Penelitian.....	36
Tabel 3.2 Contoh Jadwal Pengambilan Sampel.....	37
Tabel 3.3 Korelasi Aspek Teknis yang Dianalisis dan Data Penunjangnya.....	41
Tabel 4.1 Jumlah Sampah yang Masuk ke TPA Benowo	43
Tabel 4.2 Jumlah Penduduk Kota Surabaya Tahun 2005-2016.....	44
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai Korelasi Masing-masing Metode.....	45
Tabel 4.4 Proyeksi Penduduk Kota Surabaya Tahun 2017-2027.....	45
Tabel 4.5 Proyeksi Sampah yang Masuk ke TPA Tahun 2018-2027.....	46
Tabel 4.6 Hasil Analisis Komposisi Sampah TPA Benowo	51
Tabel 4.7 Analisis Densitas Sampah	54
Tabel 4.8 Hasil Analisis Proksimat Sampah TPA Benowo	55
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Berat Kering Komponen Sampah	57
Tabel 4.10 Perhitungan Berat Unsur Komponen Sampah	59
Tabel 4.11 Perhitungan Koefisien Senyawa Sampah Organik dengan <i>Biowaste</i>	62
Tabel 4.12 Perhitungan Koefisien Senyawa Sampah Organik Tanpa <i>Biowaste</i>	62

Tabel 4.13 Nilai Kalor per Komponen Sampah.....	63
Tabel 4.14 Perhitungan Nilai Kalor Sampah TPA Benowo	64
Tabel 4.15 Hasil Analisis Nilai Kalor Sampah TPA Benowo.....	65
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Nilai Kalor Basah Sampah TPA Benowo.....	67
Tabel 4.17 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Gasifikasi Sampah Tercampur	75
Tabel 4.18 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Gasifikasi Sampah Organik dengan <i>Biowaste</i>	76
Tabel 4.19 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Gasifikasi Sampah Organik tanpa <i>Biowaste</i>	76
Tabel 4.20 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Insinerasi Sampah Tercampur	78
Tabel 4.21 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Insinerasi Sampah Organik dengan <i>Biowaste</i>	78
Tabel 4.22 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Insinerasi Sampah Organik tanpa <i>Biowaste</i>	79
Tabel 4.23 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Pirolisis Sampah Tercampur	81
Tabel 4.24 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Pirolisis Sampah Organik dengan <i>Biowaste</i>	81
Tabel 4.25 Kebutuhan Lahan <i>Plant</i> Pirolisis Sampah Organik Tanpa <i>Biowaste</i>	82
Tabel 4.26 Hasil Perhitungan <i>Input</i> Proses	85
Tabel 4.27 Hasil Perhitungan <i>Output</i> Proses.....	89
Tabel 4.28 Hasil Analisis Dampak <i>Global Warming</i> Pengolahan Termal Sampah	99
Tabel 4.29 Hasil Analisis Dampak Senyawa Penyebab Eutrofikasi dari Pengolahan Termal Sampah	100
Tabel 4.30 Hasil Analisis Dampak Senyawa Penyebab Asidifikasi.....	101
Tabel 4.31 Hasil Analisis Dampak <i>Photochemical</i> <i>Oxidation</i> Pengolahan Termal Sampah	102
Tabel 4.32 Hasil Analisis Dampak <i>Ozone Layer Depletion</i> Pengolahan Termal Sampah	104

Tabel 4.33 Perbandingan Pengolahan Termal dari Segi Teknis	106
--	-----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Fixed Grate Incinerator</i>	15
Gambar 2.2. <i>Rotary Kiln Incinerator</i>	16
Gambar 2.3 <i>Fluidised Bed Incinerator</i>	17
Gambar 2.4 <i>Fixed Bed Incinerator</i>	18
Gambar 2.5 <i>Vertical Fixed Bed Gasifier</i>	20
Gambar 2.6 <i>Fluidized Bed Gasifier</i>	21
Gambar 2.7 Reaktor Pirolisis.....	22
Gambar 2.8 Denah TPA Benowo, Kota Surabaya.....	31
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian	35
Gambar 3.2 Batasan Analisis LCA	39
Gambar 4.1 Diagram Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Sampah di TPA Benowo Kota Surabaya.....	53
Gambar 4.2 Unit <i>crane</i>	69
Gambar 4.3 Unit mesin pencacah.....	70
Gambar 4.4 Unit <i>magnetic separator</i>	71
Gambar 4.5 Unit <i>trommel</i>	72
Gambar 4.6 Unit mesin pengering.....	73
Gambar 4.7 Unit <i>gasifier</i>	75
Gambar 4.8 Unit insinerator.....	77
Gambar 4.9 Reaktor Pirolisis.....	80
Gambar 4.10 Batasan Analisis dengan Metode LCA	83
Gambar 4.11 Diagram Alir Insinerasi Sampah Tercampur Tahun 2027.....	90
Gambar 4.12 Diagram Alir Insinerasi Sampah Organik dengan Biowaste Tahun 2027.....	91
Gambar 4.13 Diagram Alir Insinerasi Sampah Organik Tanpa Biowaste Tahun 2027.....	92
Gambar 4.14 Diagram Alir Gasifikasi Sampah Tercampur Tahun 2027.....	93
Gambar 4.15 Diagram Alir Gasifikasi Sampah Organik dengan Biowaste Tahun 2027.....	94
Gambar 4.16 Diagram Alir Gasifikasi Sampah Organik Tanpa Biowaste Tahun 2027.....	95
Gambar 4.17 Diagram Alir Pirolisis Sampah Tercampur Tahun 2027.....	96

Gambar 4.18 Diagram Alir Pirolisis Sampah Organik dengan Biowaste Tahun 2027	97
Gambar 4.19 Diagram Alir Pirolisis Sampah Organik Tanpa Biowaste Tahun 2027	98
Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Dampak <i>Global Warming</i> Pengolahan Termal Sampah .	100
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Dampak Senyawa	101
Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Dampak Senyawa Penyebab Asidifikasi Pengolahan Termal Sampah	102
Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Dampak <i>Photochemical Oxidation</i> Pengolahan Termal Sampah	103
Gambar 4.24 Grafik Perbandingan Dampak <i>Ozone Layer Depletion</i> pada Pengolahan Termal Sampah	104

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Prosedur Analisis Komposisi dan Densitas Sampah.....	113
Lampiran B Prosedur Analisis Proksimat Sampah.....	115
Lampiran C Hasil Perhitungan Nilai Korelasi.....	117
Lampiran D Hasil Analisis Nilai Kalor.....	119
Lampiran E Dokumentasi Kegiatan Analisis.....	121

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Dinas Kebersihan dan Pertamanan (2016), jumlah timbulan sampah rumah tangga Kota Surabaya mencapai 1.471 ton/hari. Angka ini merupakan timbulan sampah pada tahun 2010 yang telah mengalami penurunan secara signifikan setelah sebelumnya mencapai 1.800 ton/hari pada tahun 2005 (Badan Lingkungan Hidup Kota Surabaya, 2012). Walaupun demikian, angka tersebut masih tergolong besar dan sangat berpengaruh terhadap ketersediaan lahan di TPA Benowo. Luas lahan TPA Benowo mencapai 37,4 Ha, jika proses di TPA hanya penimbunan sampah, maka TPA akan cepat penuh, sehingga teknologi pengolahan sampah dengan persentase reduksi yang besar tetap perlu direncanakan.

Di TPA Benowo, teknologi pembuangan sampah yang digunakan adalah *controlled landfill*. Teknologi konvensional ini masih umum digunakan di Indonesia karena biaya operasional yang murah namun membutuhkan lahan yang luas serta menimbulkan dampak negatif yang besar terhadap lingkungan. Kerugian dari sistem *landfilling* yaitu potensi pencemaran air dan tanah dari produksi lindi, timbulan gas metana dan CO₂ yang mudah terbakar, potensi terpaparnya manusia oleh zat kimia volatil, timbulnya bau, serta perlunya *monitoring* dan remediasi lahan secara intensif pasca penutupan *landfill* (UNEP, 1995). Diperlukan teknologi alternatif yang dapat mengurangi kebutuhan lahan sekaligus memperoleh kembali energi yang terkandung dalam sampah seperti pengolahan termal (Gunamantha, 2011). Salah satu keuntungan dari pengolahan termal adalah reduksi massa dan volume dari timbulan sampah yang telah diolah. Hasil residu akhir sampah bervariasi sekitar 3 – 20% dari berat awalnya. Maka dari itu, luas lahan yang dibutuhkan untuk TPA dapat direduksi. Selain itu, pengolahan termal juga dapat mereduksi emisi gas rumah kaca dari dekomposisi

anaerobik sampah. Sebuah riset independen mengestimasi CO₂ yang dihasilkan oleh pengolahan termal lebih sedikit dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh sistem *landfilling* (Psomopoulos *et al.*, 2009). Selain itu, pengolahan termal juga mampu mereduksi senyawa organik total, menghancurkan kontaminan organik, serta memperoleh kembali kandungan energi dari limbah padat (Sabbas *et al.*, 2003) sehingga pengolahan termal nantinya dapat dikembangkan menjadi pabrik *waste to energy*.

Ada macam-macam pengolahan termal yang dapat diaplikasikan, yaitu insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis. Untuk memilih metode pengolahan termal yang tepat, dibutuhkan analisis masing-masing metode secara menyeluruh dari berbagai aspek. Untuk itu, digunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) yang merupakan sistem pendekatan secara holistik yang bertujuan untuk mengkuantifikasi dampak lingkungan yang potensial (perubahan iklim, penggunaan energi yang tidak dapat diperbaharui, dan lain – lain) yang ditimbulkan dari siklus hidup produk, mulai dari perolehan bahan mentah, penggunaan, daur ulang, dan pembuangan akhir (ISO, 2006). Untuk keperluan analisis, digunakan software SimaPro yang dapat mengumpulkan, menganalisis, dan memonitor lingkungan kinerja produk atau proses secara sistematis dan transparan, sesuai standar ISO 14040 (Grzesik dan Guca, 2011).

1.2 Rumusan Permasalahan

Masalah yang akan didiskusikan dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

- Bagaimana aspek teknis yang berpengaruh pada pengolahan sampah secara termal?
- Bagaimana dampak lingkungan yang timbul dari pengolahan termal sampah di TPA Benowo Kota Surabaya?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

- Menganalisis aspek teknis yang berpengaruh pada pengolahan sampah secara termal di TPA Benowo, Kota Surabaya
- Menganalisis dampak lingkungan dari pengolahan termal sampah di TPA Benowo, Kota Surabaya

1.4 Ruang Lingkup

Batasan permasalahan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

- Timbulan sampah yang digunakan merupakan timbulan sampah perkotaan di TPA Benowo, Surabaya
- Kegiatan pemilahan dan survei lapangan dilakukan di TPA Benowo, Surabaya, sedangkan penelitian berbasis laboratorium akan dilaksanakan di Laboratorium Departemen Teknik Lingkungan ITS
- Metode penelitian yang digunakan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA)
- Jenis pengolahan termal yang akan dianalisis adalah insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis
- Aspek yang dikaji dalam penelitian lapangan ini adalah aspek teknis dan aspek lingkungan dari pengolahan termal sampah dalam kurun waktu 10 tahun perencanaan
- Metode LCA pada software yang digunakan adalah *Environmental Product Declaration* (EPD) 2007
- Aspek lingkungan yang dianalisis menggunakan parameter Gas Rumah Kaca (GRK), senyawa penyebab asidifikasi, senyawa penyebab eutrofikasi, deplesi gas ozon, dan *photochemical ozone creation*
- *Software* yang digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan adalah SimaPro v.8.3 oleh

PRe Consultants.

- Aspek teknis yang dikaji yaitu kebutuhan fasilitas pra pengolahan termal, jumlah reaktor, lahan, dan pekerja yang dibutuhkan

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah:

- Memberikan informasi mengenai pengolahan sampah secara termal yang paling menguntungkan dari aspek teknis
- Memberikan informasi mengenai pengolahan sampah secara termal yang paling minim

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan secara komprehensif pemaparan dari literatur mengenai komposisi dan karakteristik sampah, pengolahan sampah secara umum, pengolahan sampah secara termal, metode *Life Cycle Assessment* (LCA), serta penelitian terdahulu mengenai LCA untuk pengolahan sampah.

2.1 Komposisi sampah

Untuk menentukan pengolahan sampah yang tepat, komposisi sampah perlu diketahui. Komposisi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan komponen individu yang membentuk aliran limbah padat dan distribusi relatif mereka, biasanya didasarkan pada persen berat (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Perbedaan komponen sampah dapat disebabkan oleh perbedaan sumber sampah, misalnya, komposisi sampah rumah tangga di negara berkembang akan berbeda dengan komposisi sampah rumah tangga di negara maju. Adapun perhitungan masing – masing komponen sampah dapat dihitung dengan cara berikut:

$$\text{Persentase komposisi} = \frac{\text{berat komponen (kg)}}{\text{berat timbulan sampah total (kg)}} \times 100\%$$

Berdasarkan SNI 19-3964-1994, komponen sampah terbagi menjadi sisa-sisa makanan, kertas-karton, kayu, kain-tekstil, karet-kulit, plastik, logam besi-non besi, kaca dan lain-lain (misalnya tanah, pasir, batu, keramik). Contoh komposisi sampah di berbagai kota di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi Sampah di Kota Metropolitan di Indonesia Tahun 2003

Komposisi sampah	Jakarta (%)	Makassar (%)	Surabaya (%)	Medan (%)	Bandung (%)	Rata-rata (%)
Makanan	66,41	85,60	65,60	16,20	63,55	59,47
Kertas	10,11	4,50	13,30	17,5	10,42	11,17
Karton	3,12	0	4,9	0	0	1,68
Plastik dan karet	11,90	7,10	9,00	15,8	9,76	10,71
Logam	1,12	2,30	1,00	3,5	0,95	1,77
Kaca	1,60	0,30	1,00	2,3	1,45	1,33
Tekstil	0,55	0	1,80	0	1,70	0,81
Daun-daun	2,45	0,15	0	32,0	0	6,92
Debu	2,74	0,05	3,40	12,7	12,16	6,21

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup, (2005)

2.2 Karakteristik Sampah

Selain komposisi sampah, faktor yang berpengaruh dalam menentukan proses pengolahan sampah yang tepat adalah karakteristik sampah, baik karakteristik fisik maupun kimiawi. Karakteristik sampah sangat variatif tergantung pada komponen-komponen sampah. Karakteristik sampah juga berpengaruh pada emisi yang dihasilkan dari berbagai metode pengolahan.

2.2.1 *Proximate Analysis*

Proximate analysis sampah bertujuan untuk mengetahui kadar air, zat volatil, *fly ash* (abu), dan *fixed carbon* (Gidarakos *et al.*, 2005). Karakteristik ini didapatkan dari analisa gravimetri dengan perhitungan stoikiometri. *Proximate analysis* berkaitan erat dengan nilai kalor. Dalam beberapa kasus, untuk menyederhanakan prosedur dan mengurangi biaya analisis banyak korelasi dikembangkan untuk menentukan nilai kalor dari *proximate analysis* (Majumder *et al.*, 2008).

Berdasarkan Tchobanoglous *et al.*, 1993, karakteristik proksimat sampah menurut komponennya terdapat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Analisis Proksimat Tipikal Per Komponen Sampah

No.	Komponen Sampah	Analisis Proksimat (% berat)			
		Kadar Air	<i>Volatile Solid</i>	<i>Fixed Carbon</i>	Abu
1.	Sampah makanan tercampur	70,0	21,4	3,6	5,0
2.	Sampah kebun	60,0	30,0	9,5	0,5
3.	Plastik PE	0,2	98,5	<0,1	1,2
4.	Plastik PS	0,2	98,7	0,7	0,5
5.	Plastik PVC	0,2	86,9	10,8	2,1
6.	Plastik tercampur	0,2	95,8	2,0	2,0
7.	Kertas tercampur	10,2	75,9	8,4	5,4
8.	<i>Waxed cartons</i>	3,4	90,9	4,5	1,2
9.	Kardus	5,2	77,5	12,3	5,0
10.	Tekstil	10,0	66,0	17,5	6,5
11.	Karet	1,2	83,9	4,9	9,9
12.	Kulit	10,0	68,5	12,5	9,0
13.	Kaca	2,0	-	-	96-99+
14.	Kaleng	5,0	-	-	94-99+
15.	Logam besi	2,0	-	-	96-99+
16.	Logam non besi	2,0	-	-	94-99+
17.	Lain-lain (debu)	3,2	20,5	6,3	70,0

Sumber: Tchobanoglous *et al.*, (1993)

Kadar air dipengaruhi oleh letak geografis, musim, dan rentang waktu penumpukan sampah. Kadar air sampah dapat dihitung dari berat basah dan berat kering dengan metode perhitungan matematis. Kadar air dihitung berdasarkan persentase massa satu gram sampah yang

telah dikeringkan pada suhu 105° C selama dua jam (Omari, 2015). Rumus yang digunakan adalah:

$$\text{Moisture content } (M) = \frac{w - d}{w} \times 100\%$$

Dimana : M = kadar air (%)
w = berat sampah sebelum dikeringkan (kg)
d = berat sampah setelah dikeringkan (kg)

Analisis kadar zat volatil didapatkan setelah analisis kadar air sampah. Prinsip dari analisis ini yaitu pemanasan senyawa pada suhu 950° C pada *furnace* untuk menguapkan zat – zat volatil tanpa merusak zat – zat lainnya selama dua jam (Omari, 2015). Perhitungan zat volatil menggunakan rumus:

$$\%VS = \left[\frac{(b - a) - (c - a)}{b - a} \right] \times 100\%$$

Dimana :
a = cawan kosong
b = cawan dan sampel sebelum dipanaskan
c = cawan dan sampel setelah dipanaskan

Analisis persentase kadar abu didapatkan dari residu sampel yang tidak menguap setelah dipanaskan pada *furnace* pada suhu 550° C selama satu jam (Omari, 2015). Pada pengolahan termal sampah, *fly ash* merupakan hasil proses yang cukup dominan yang perlu diolah secara kimia sebelum dibuang ke *landfill*. Besarnya produksi *fly ash* dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan metode pengolahan termal yang tepat (Arena, 2012). Perhitungan kadar abu dalam sampah dapat dihitung sebagai berikut:

$$\% \text{ abu} = \frac{c - a}{b - a} \times 100\%$$

Dimana :

a = cawan kosong

b = cawan dan sampel sebelum dipanaskan pada suhu 575°C

c = cawan dan sampel setelah dipanaskan pada suhu 575°C

Analisis persentase *fixed carbon* didapatkan dengan perhitungan manual dari pengurangan massa total sampah dengan kadar air, zat volatil, dan abu. *Fixed carbon* merepresentasikan unsur karbon padat dari sampah yang tersisa setelah proses devolatilisasi. Perhitungan *fixed carbon* dapat menggunakan rumus berikut:

$$\% \text{ fixed carbon} = 100 - M - VS - \text{ash}$$

Dimana :

M = persentase kadar air

VS = persentase massa senyawa volatil

ash = persentase massa abu (Omari, 2015)

2.2.2 *Ultimate Analysis*

Ultimate analysis sampah bertujuan untuk menganalisis persentase unsur karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur. Setiap komponen sampah tentunya memiliki persentase unsur – unsur yang berbeda. Persentase berat kering masing-masing unsur dari tiap komponen sampah dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Data Tipikal *Ultimate Analysis* pada Sampah

Komponen	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Makanan dan Produk Makanan					
Lemak	73,0	11,5	14,8	0,4	1,0
Sampah makanan (tercampur)	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4
Sampah buah	48,5	6,2	39,5	1,4	0,2
Sampah daging	59,60	9,40	24,70	1,20	0,2

Komponen	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Makanan dan Produk Makanan					
Karton	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2
Majalah	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1
Koran	49,1	6,1	43,0	0,1	0,2
Kertas (tercampur)	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2
Karton berlapis wax	59,2	9,3	30,1	0,1	0,1
Plastik					
Plastik (tercampur)	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0
<i>Polyethylene</i>	85,2	14,2	0,0	0,1	0,1
<i>Polystyrene</i>	87,1	8,4	4,0	0,2	0,0
<i>Polyurethane</i>	63,3	6,3	17,6	6,0	0,1
PVC	45,2	5,6	1,6	0,1	0,1
Tekstil, karet, dan kulit					
Tekstil	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2
Karet	69,7	8,7	0,0	0,0	1,6
Kulit	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4
Kaca, logam, dll					
Sampah kebun	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3
Kayu (kayu hijau)	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1
Kayu keras	49,6	6,1	43,2	0,1	0,1
Kayu (tercampur)	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1
Kaca, logam, dll					
Kaca dan mineral	0,5	0,1	0,4	0,1	0,0
Logam (tercampur)	4,5	0,6	4,0	0,1	0,0
Lain-lain	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2

Sumber: Tchobanoglous *et al.*, (1993)

2.2.3 Nilai Kalor

Nilai kalor dari suatu zat adalah jumlah panas yang dilepaskan selama pembakaran dari jumlah yang ditentukan. Nilai kalor adalah karakteristik untuk setiap substansi. Hal ini diukur dalam satuan energi per unit dari substansi, biasanya massa, seperti: kkal/kg, kJ/kg, atau Btu/m³. Nilai kalor umumnya ditentukan dengan menggunakan bom kalorimeter. Semakin tinggi nilai kalor, biaya investasi suatu proses pengolahan menjadi semakin tinggi pula, begitu pun sebaliknya (World Bank, 1999). Nilai kalor komponen sampah dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai Kalor Sampah per Komponen

Tipe Sampah	Nilai Kalor (Btu/lb)	
	Saat Dikumpulkan	Kering
Makanan dan Produk Makanan		
Lemak	16.135	16.466
Sampah makanan (tercampur)	1.797	5.983
Sampah buah	1.707	8.013
Sampah daging	7.623	12.455
Produk kertas		
Karton	7.042	7.428
Majalah	5.254	5.478
Koran	7.975	8.484
Kertas (tercampur)	6.799	7.571
Karton berlapis wax	11.326	11.724
Plastik		
Plastik (tercampur)	14.101	14.390
<i>Polyethylene</i>	18.687	18.724
<i>Polystyrene</i>	16.419	16.451
<i>Polyurethane</i>	11.204	11.226
PVC	9.755	9.774
Tekstil, karet, dan kulit		
Tekstil	7.960	8.844
Karet	10.890	11.022
Kulit	7.500	8.040

Tipe Sampah	Nilai Kalor (Btu/lb)	
	Saat Dikumpulkan	Kering
Kayu, pohon, dll		
Sampah kebun	2.601	6.503
Kayu (kayu hijau)	2.100	4.200
Kayu keras	7.352	8.354
Kayu (tercampur)	6.640	8.316
Kaca, logam, dll		
Kaca dan mineral	84 ^b	86
Kaleng timah	301 ^b	319
Kaleng besi	-	-
Kaleng non besi	-	-
Lain-lain		
Sapuan	3.669	3.791
Sampah perumahan	5.000	6.250
Sampah komersial	5.500	6.470
Sampah perkotaan	4.600	5.750

Sumber: Tchobanoglous et al., (1993)

2.3 Pengolahan Sampah

Setiap hari volume sampah yang ditimbun di area TPA bertambah. Maka dari itu, setiap wilayah administrasi (umumnya kota dan kabupaten) memerlukan fasilitas pengolahan sampah untuk mereduksi volumenya. Definisi pengolahan sampah itu sendiri adalah proses untuk mendegradasi, menghilangkan, atau mentransformasi bentuk sampah menjadi fase atau zat yang lain. Menurut Pasal 21 Peraturan Pemerintah No.81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Rumah Tangga pengolahan sampah meliputi kegiatan pemadatan, pengomposan, daur ulang materi, dan/atau daur ulang energi. Dalam pasal ini, disebutkan bahwa pengelolaan sampah dilakukan oleh pemerintah kabupaten/kota dan masing-masing kabupaten/kota wajib memiliki Tempat Pemrosesan Akhir (TPA).

Definisi TPA sendiri menurut Undang-undang No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah adalah

tempat untuk memroses dan mengembalikan sampah ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan. Sedangkan pemrosesan akhir adalah bentuk pengembalian sampah dan/atau residu hasil pengolahan sebelumnya ke media lingkungan secara aman. Pemrosesan akhir sampah sebagaimana dimaksud dapat dilakukan dengan menggunakan metode lahan urug terkendali (*controlled landfill*), metode lahan urug saniter (*sanitary landfill*) dan/atau teknologi ramah lingkungan. *Controlled* dan *sanitary landfill* atau yang biasa dikenal sebagai TPA harus memiliki fasilitas dasar, fasilitas perlindungan lingkungan, fasilitas operasi dan fasilitas penunjang. Teknologi yang digunakan sebagai pemrosesan akhir dibagi ke dalam tiga kategori, yaitu proses secara fisik, kimia, dan biologi.

2.3.1 Pengolahan Sampah Secara Fisik

Pengolahan sampah secara fisik dibagi menjadi tiga, yaitu pemilahan komponen sampah, densifikasi/kompaksi, dan reduksi ukuran secara mekanis. Pemilahan komponen sampah dilakukan pada timbulan sampah yang bercampur agar nilai dari masing – masing komponen dapat diolah sesuai karakteristiknya dan memulihkan nilai material untuk dikonversi sebagai produk lainnya. Densifikasi/kompaksi merupakan proses reduksi volume dengan kekuatan atau tekanan, misalnya dengan pemadatan atau *baling*. Reduksi ukuran secara mekanis bertujuan untuk menghasilkan ukuran sampah yang lebih seragam. Namun, pengurangan ukuran tidak selalu berarti volume contoh reduksi mekanis adalah *shredding*, *grinding*, dan *milling*. Pengolahan sampah secara fisik hanya dapat dilakukan pada sampah dengan kadar air yang rendah, seperti kardus, plastik, kertas, dan sejenisnya, sehingga pengolahan ini tidak cocok bagi sampah rumah tangga yang mayoritas komposisinya merupakan sampah makanan dengan kadar air yang tinggi.

2.3.2 Pengolahan Sampah Secara Biologis

Pengolahan sampah secara biologis terjadi karena degradasi oleh mikroorganisme yang terjadi secara aerobik dan anaerobik. Keuntungan dari pengolahan biologis meliputi: mengurangi volume bahan limbah, stabilisasi limbah, perusakan patogen dalam bahan limbah, dan produksi biogas untuk penggunaan energi. Akhir produk dari pengolahan biologis dapat, tergantung pada kualitasnya, didaur ulang sebagai pupuk atau dibuang di TPA. Beberapa metode pengolahan sampah secara biologis yaitu komposting aerobik, *anaerobic digestion* untuk sampah organik, dan pengolahan biologis-mekanis (IPCC, 2006).

2.3.3 Pengolahan Sampah Secara Kimia

Transformasi sampah secara kimiawi biasa diketahui sebagai pengolahan termal yang perhitungannya dapat dilakukan dengan stoikiometri. Pengolahan termal ditandai dengan temperatur yang tinggi dan laju konversi yang relatif tinggi. Karena adanya proses biokimia dan fisik-kimia, pengolahan ini cocok untuk berbagai karakteristik sampah, terutama sampah yang tidak terpilah (Arena, 2012). Pengolahan secara kimia dijelaskan dalam sub bab berikut.

2.4 Pengolahan Sampah Secara Termal

Pengolahan termal merupakan konversi limbah padat menjadi fase gas, cair, atau padat terkonversi dengan adanya energi panas yang dilepaskan. Menurut Sabbas *et al.* (2003), berikut merupakan tujuan dari pengolahan limbah padat secara termal:

- Mereduksi senyawa organik total
- Menghancurkan kontaminan organik
- Mendapatkan konsentrat dari kontaminan inorganik
- Mengurangi masa dan volume limbah padat
- Memperoleh kembali kandungan energi dari limbah padat

- Mempertahankan bahan baku dan sumber daya

Untuk analisis aspek lingkungan menggunakan *software* SimaPro, diperlukan skema diagram alir untuk sebagai gambaran proses dengan alur *input* dan *output* yang jelas yang tertera pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 *Input-output* (Energi dan Residu) pada Pengolahan Termal Sampah

<i>Input/output</i>	Gasifikasi	Pirolisis	Insinerasi
Energi listrik operasional (kWh/ton)	339,3*	339,3*	77,8*
Energi listrik produksi (kWh/ton)	685*	685*	544*
Residu padatan (kg/ton)	120*	-	180*
<i>Char</i> (kg/ton)	-	150**	-
Minyak pirolisis (kg/ton)	-	51**	-

Sumber: *Zaman, (2010)

**Cherubini *et al.*, (2009)

**Chen *et al.*, (2014)

Selain itu, berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan oleh Zaman (2010) ada perkiraan emisi yang dikeluarkan dari proses termal. Emisi yang dihasilkan dari proses insenerasi, gasifikasi dan pirolisis berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Emisi Gas sebagai *Output* dari Pengolahan Termal Sampah

Senyawa	Gasifikasi (gram/ton sampah)	Insinerasi (gram/ ton sampah)	Pirolisis (gram/ ton sampah)
Nitrogen oksida	390	1600	390
Partikulat	6	38	6
Sulfur dioksida	9	42	9
Hidrogen klorida	16	58	16
Hidrogen florida	0,11	1	0,11
VOC	3	8	3
Kadmium	0,0017	0,005	0,0017
Nikel	0,02	0,05	0,02
Arsen	0,055	0,005	0,055
Merkuri	0,017	0,05	0,017
Dioxin dan furan	4×10^{-9}	1×10^{-7}	4×10^{-9}
<i>Polychlorinated biphenyls</i> (PCBs)	0	0,0001	0
Karbon dioksida	700.000	700.000	700.000
Karbon monoksida	20	0	20

Sumber: Enviro Consulting Ltd *et al.*, 2004

2.4.1 Insinerasi

Insinerasi merupakan pembakaran material berbasis karbon di sebuah lingkungan yang kaya oksigen (kadar oksigen di lingkungan lebih besar dari kebutuhan oksigen yang dihitung secara stoikiometri), biasanya pada suhu di atas 850° C (Moustakas dan Loizidou, 2010). Emisi gas yang dihasilkan ke atmosfer dari proses insinerasi adalah gas (CO₂ dan H₂O), polutan (SO₂, NO_x, HCl, dan partikulat), serta *bottom ash* dan material *inert* (Arena, 2012).

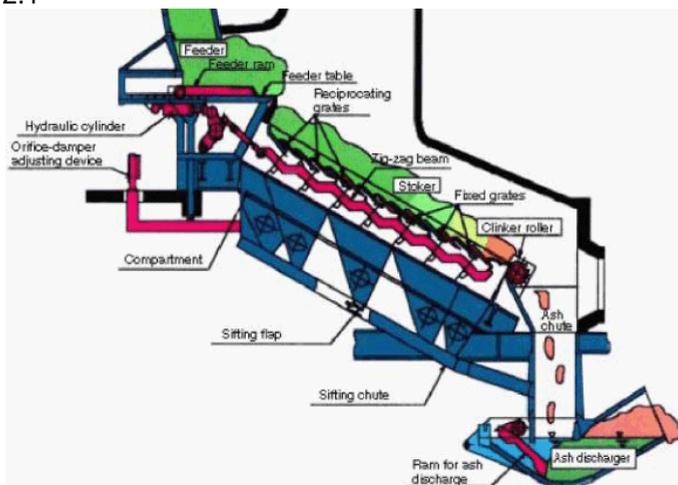
a. *Moving Grate Incinerator*

Tipe insinerator yang biasa digunakan untuk limbah padat domestik adalah *moving grate incinerator* sehingga seringkali disebut sebagai *Municipal Solid Waste*

Incinerators (MSWI). Pergerakan *grate* memungkinkan sampah untuk masuk ke dalam tungku pembakaran secara optimal sehingga pembakaran lebih efisien dan berjalan sempurna. Masing-masing tungku berkapasitas hingga 35 ton sampah per jam dan dapat dioperasikan selama 8.000 jam per tahun dengan adanya *shut down* untuk inspeksi dan perawatan alat selama satu bulan (Moustakas dan Loizidou, 2010).

b. *Fixed Grate Incinerator*

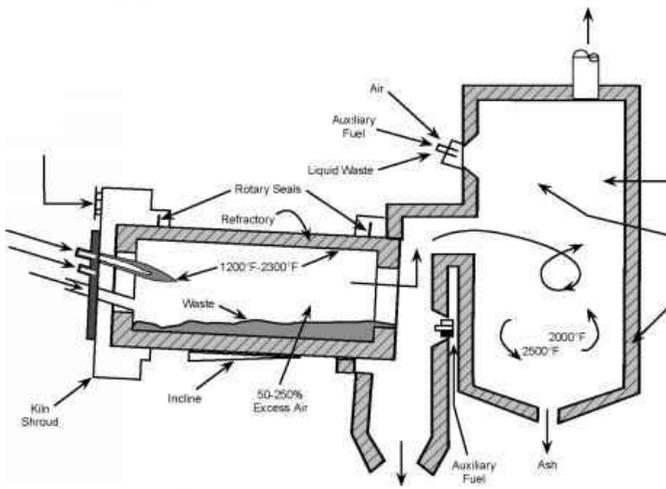
Insinerator tipe ini merupakan insinerator yang lebih tua dan sederhana dengan sel pembakaran terbuat dari bata yang di bawahnya terdapat lubang penyimpanan abu (*ash pit*). Bukaan insinerator ini terletak di atas atau di salah satu sisi tungku dan sisi lainnya merupakan ruangan yang disebut *clinkers* sebagai penampung padatan *non combustible* yang harus dikeluarkan (Moustakas dan Loizidou, 2010). Insinerator tipe ini secara umum hanya dioperasikan secara kecil seperti di apartemen. Bagian-bagian *fixed grate incinerator* dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 *Fixed Grate Incinerator*
Sumber: Global Environment, (2010)

c. Rotary-kiln Incinerator

Insinerator tipe *rotary kiln* diaplikasikan baik di perkotaan maupun di pabrik industri yang besar. Proses pembakaran terjadi di dua tahap, yaitu kiln sebagai bilik primer yang terletak miring ke bawah dan bilik pembakaran sekunder yang terpisah (DEFRA, 2013). Bilik primer terdiri dari tabung silinder tahan panas. Gerakan silinder pada porosnya menyebabkan limbah bergerak. Pada bilik primer, terdapat konversi padatan menjadi fase gas melalui proses volatilisasi, distilasi destruktif, dan pembakaran parsial. Bilik sekunder berfungsi sebagai tempat terjadinya reaksi pembakaran gas secara sempurna. Selain itu, sistem ini membutuhkan cerobong yang tinggi, kipas, atau *jet* uap untuk memasukan udara yang dibutuhkan. Di akhir proses, abu dan padatan *non combustible* lainnya bergerak menuju ujung silinder lalu masuk ke dalam *clinker* (Moustakas dan Loizidou, 2010). Bagian-bagian *rotary kiln incinerator* dapat dilihat pada Gambar 2.2.

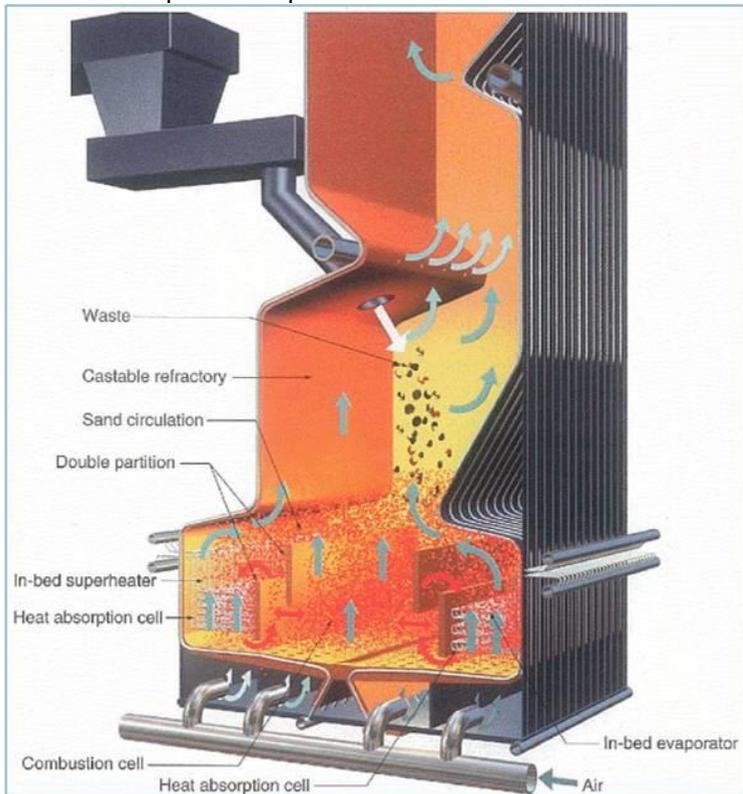


Gambar 2.2. Rotary Kiln Incinerator

Sumber: Dempsey dan Oppelt, 1993 dalam Liu dan Liptak, (1999)

d. *Fluidised-Bed Incinerator*

Penyortiran sampah untuk mengeluarkan sampah berukuran besar dan senyawa inert seperti logam harus dilakukan untuk mengawali proses insinerasi tipe *fluidized-bed*. Sampah juga harus diproses secara mekanis untuk mereduksi ukuran partikel. Proses pembakaran biasanya terjadi dalam satu tahap pada sebuah bilik yang di dalamnya dilapisi oleh *granular bubbling bed* berbahan material *inert* seperti pasir kasar, pasir silika, atau media lain (DEFRA, 2013). Bagian-bagian *fluidised grate incinerator* dapat dilihat pada Gambar 2.3

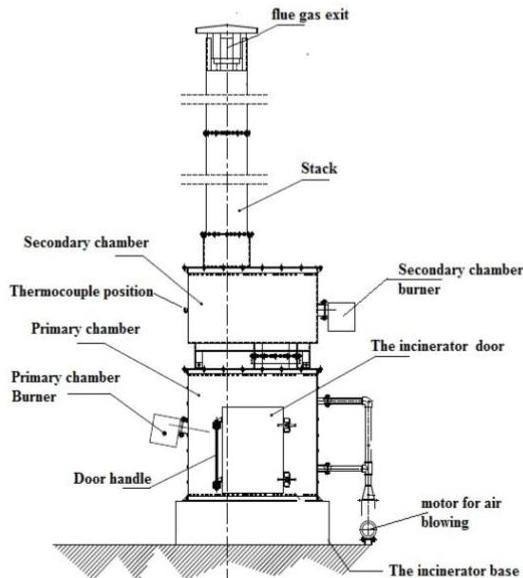


Gambar 2.3 *Fluidised Bed Incinerator*

Sumber: Eisenmann, (2016)

e. *Fixed Bed Incinerator*

Insinerator yang memiliki dua tungku pembakaran ini dioperasikan dalam kondisi kekurangan oksigen. Sampah sebagai *feed* dimasukkan dengan sistem *batch*. Dua tungku pembakaran ini memiliki fungsi yang berbeda. Tungku primer yang bersuhu 400-500° C berfungsi untuk memicu adanya pembakaran dan mempertahankan suhu minimum yang cukup untuk pembakaran serta membunuh mikroorganismenya. Suhu ini harus dipertahankan untuk meminimisasi timbulnya senyawa volatil dari pembakaran berlebihan yang akan menyebabkan padatan logam ter evaporasi di tungku primer dan masuk ke tungku sekunder sebagai uap air sehingga dapat meningkatkan produksi partikulat pada *flue gas*. Setelah itu, *feed* masuk ke dalam tungku sekunder yang beroperasi pada suhu 800-1.000° C (Omari *et al.*, 2015). Bagian-bagian *fixed bed incinerator* dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 *Fixed Bed Incinerator*

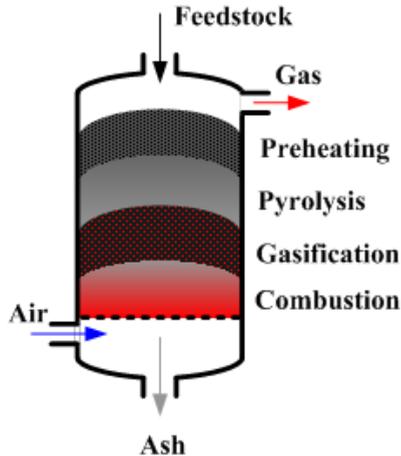
Sumber: Omari *et al.*, (2015)

2.4.2 Gasifikasi

Gasifikasi atau pembakaran tidak langsung, secara khusus merupakan konversi limbah padat melalui reaksi pembentukan gas. Proses ini dapat didefinisikan sebagai oksidasi parsial limbah padat karena adanya jumlah oksidan yang lebih rendah daripada jumlah yang diperlukan sebenarnya secara stoikiometri (Arena, 2012). Produk utama gasifikasi adalah *syngas* yang komposisinya bervariasi dengan tergantung kondisi operasi dan jenis oksidan digunakan. *Syngas* pada umumnya terdiri dari karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂). Komponen yang tersisa dari *syngas* adalah karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), O₂ dan nitrogen (N₂) (Begum *et al.*, 2013). Terdapat lima tipe utama dari unit gasifikasi, yaitu *vertical fixed bed*, *horizontal fixed bed*, *fluidized bed*, *multiple hearth*, dan *rotary kiln* (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Tiga unit yang paling sering digunakan, yaitu *vertical fixed bed*, *horizontal fixed bed*, dan *fluidized bed*.

a. *Vertical Fixed Bed Gasifier*

Vertical fixed bed gasifier memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan *gasifier* jenis lain dari ditinjau dari pengoperasian dan sederhana dan biaya modal yang relatif rendah. Namun, jenis ini reaktor lebih sensitif terhadap karakteristik bahan bakar, karena memerlukan bahan bakar yang homogen, seperti bahan bakar sampah yang diturunkan dan dipadatkan atau *refuse-derived fuel* (RDF). Aliran bahan bakar melalui tipe *gasifier* ini adalah dengan gravitasi dengan udara dan bahan bakar yang mengalir secara bersamaan melalui reaktor. Produk akhir dari proses ini adalah gas dengan panas yang rendah dan arang (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Bagian-bagian *vertikal fixed bed gasifier* dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 *Vertical Fixed Bed Gasifier*
 Sumber: Kopeliovich, (2013)

b. *Horizontal Fixed Bed Gasifier*

Sistem gasifikasi ini merupakan sistem yang paling banyak digunakan. Sistem ini memiliki dua tungku pembakaran, tungku primer dan tungku sekunder. Di tungku primer, sampah digasifikasi dengan pembakaran parsial pada kondisi substoikiometri, memproduksi gas panas yang rendah yang menuju tungku sekunder, dimana sampah dibakar dengan kelebihan oksigen. Temperatur gas yang dihasilkan di tungku sekunder cukup tinggi, yaitu $650 - 870^{\circ} \text{C}$ karena proses yang terjadi adalah pembakaran sempurna, yang memungkinkan gas untuk memproduksi air panas atau uap melalui *boiler* untuk pemulihan energi (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

c. *Fluidized-bed Gasifier*

Sistem gasifikasi dengan *fluidized-bed* hampir sama dengan sistem insinerasi dengan tipe yang sama. Dengan sedikit modifikasi, insinerasi tipe *fluidized-bed* dapat dioperasikan dalam kondisi substoikiometri sebagai *gasifier*. Beberapa proyek dengan *pilot-scale* telah dilakukan dengan sampah rumah tangga sebagai bahan bakar. Sebuah gasifier tipe fluidized bed dengan kapasitas

bahan baku berupa RDF sebesar satu ton/jam telah dioperasikan di Kingston, Ontario (Black *et al.*, 1980). Kinerja optimal pemrosesan sampah perkotaan dengan fluidized-bed gasifier terjadi pada suhu 700° C (Begum *et al.*, 2013). Bagian-bagian *fluidized bed gasifier* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



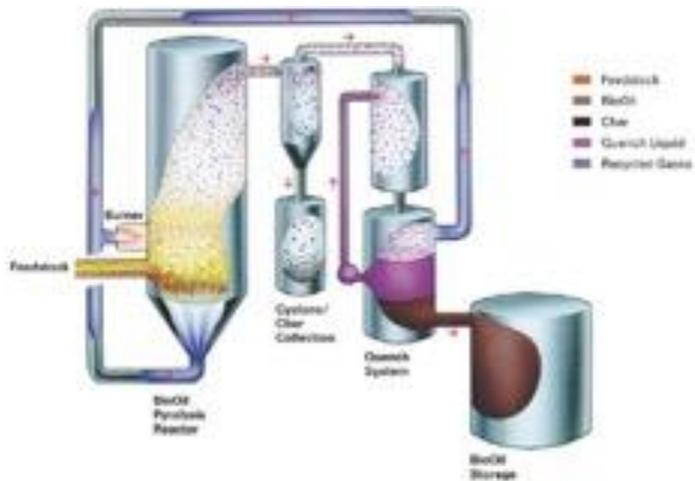
Gambar 2.6 *Fluidized Bed Gasifier*
Sumber: Kopeliovich, (2013)

2.4.3 Pirolisis

Pirolisis adalah pengolahan termal limbah tidak adanya lengkap oksigen. Pirolisis bertujuan untuk memaksimalkan dekomposisi termal limbah padat menjadi gas dan fase terkondensasi. Suhu yang dibutuhkan untuk proses ini berkisar antara 500-800° C. Produk yang dihasilkan oleh pirolisis yaitu gas dengan kandungan senyawa CO, H₂, CH₄ dan hidrokarbon lainnya, polutan seperti H₂S, HCl, NH₃, HCN, tar, dan partikulat, serta abu yang harus diolah dan dibuang sebagai limbah industri khusus (Arena, 2012).

Hingga saat ini, masih ada perdebatan antar literatur karena adanya pernyataan bahwa sistem pirolisis sebenarnya sistem gasifikasi. Kedua teknologi ini sama-

sama merupakan proses konversi sampah menjadi gas, cair, dan bahan bakar padat. Perbedaan utama antara kedua sistem adalah bahwa sistem pirolisis menggunakan sumber eksternal panas untuk mendorong reaksi pirolisis endotermik dalam lingkungan bebas oksigen, sedangkan sistem gasifikasi menggunakan udara atau oksigen untuk pembakaran parsial limbah padat. (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Bagian-bagian reaktor pirolisis dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Reaktor Pirolisis
Sumber: Ruijg, (2012)

2.5 Life Cycle Assessment (LCA)

Life Cycle Assessment merupakan sebuah metode untuk mengidentifikasi, mengkuantifikasi, dan mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu proses, produk, atau kegiatan melalui siklus hidup yang dikenal sebagai analisis "*cradle to grave*". Menurut ISO (2006), terdapat empat fase dari studi LCA, yaitu:

- a. Tujuan dan ruang lingkup

Pada tahap ini, penyelenggara studi mendefinisikan tujuan dan batasan dari penelitian. Variabel penelitian juga ditentukan, karenanya fase ini menentukan arah studi dan berperan sebagai pedoman penelitian (Khasreen *et al.*, 2009). Di tahap ini, functional unit (fu) ditentukan sebagai parameter input dan output dari inventarisasi data yang memungkinkan perbandingan antar sistem yang dianalisis (ISO, 2006).

b. Inventarisasi siklus hidup

Inventarisasi siklus hidup bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi arah aliran bahan dan energi serta emisi yang dilepaskan ke lingkungan dari sistem yang diamati. Kunci dalam LCI yaitu memodelkan aliran masuk dan keluar dari sistem. Berbagai model LCI untuk pengolahan sampah telah dikembangkan untuk memfasilitasi aplikasi LCA (Gunamantha *et al.*, 2010).

Menurut Finnveden *et al.*, 2000, LCI dibagi menjadi empat tahap, yaitu:

- Identifikasi seluruh proses yang terkait dalam siklus produksi
- Pengumpulan data di setiap proses
- Penentuan batasan sistem
- Penyesuaian bahan atau energi yang masuk dan keluar dari proses untuk menghubungkan unit fungsional

Dalam LCI, energi, sumber daya, dan emisi dipertimbangkan dalam berbagai proses termasuk:

- Pengambilan bahan baku
- Pengolahan dan transformasi bahan baku untuk produk akhir
- Produksi dan penggunaan bahan setengah jadi
- Transportasi untuk pengangkutan bahan baku dan produk akhir
- Pembuangan akhir dari setiap pengolahan limbah yang dihasilkan selama periode pengolahan hingga masa produksi berakhir

c. Penilaian dampak

Penilaian dampak merupakan kalkulasi dari hasil analisis inventaris yang telah dikuantifikasi untuk mengetahui dampak pada lingkungan (Kalinci *et al.*, 2012). Data LCI diklasifikasikan ke dalam kategori dampak dan digabungkan sehingga diperoleh suatu indikator kategori dampak. Indikator – indicator tersebut mempresentasikan potensi dampak lingkungan terhadap kategori dampak (Gunamantha *et al.*, 2010).

LCIA dibagi menjadi beberapa tahapan, yaitu:

- *Classification*: proses ini membutuhkan semua data sumber daya yang masuk dan emisi lingkungan yang dihasilkan untuk berbagai kategori dampak.
- *Characterisation*: proses mengkuantifikasi emisi dan konsumsi sumber daya untuk berbagai kategori dampak yang ditentukan
- *Valuation or weighing*: proses memfasilitasi dalam pembuatan keputusan dengan membandingkan semua dampak produk atau sistem yang dikaji.

d. Interpretasi

Interpretasi adalah langkah terakhir dari LCA yaitu mengevaluasi inventaris siklus hidup, penilaian dampak atau keduanya, dalam kaitannya dengan ruang lingkup yang ditetapkan dan dengan tujuan untuk memberikan rekomendasi.

2.5.1 Aplikasi Metode LCA

Studi dengan metode LCA harus dilakukan di awal perencanaan suatu proses, produksi barang, atau produksi jasa. Hal ini juga berlaku dengan perencanaan ulang atau perbaikan proses dalam siklus hidup suatu produk, terutama jika terjadi interaksi antara suatu proses dengan proses lainnya atau antar tahap siklus hidup (Rebitzer *et al.*, 2004).

2.5.2 Aplikasi Metode LCA pada Pengelolaan Sampah

Penelitian mengenai analisis pengolahan sampah dengan metode LCA di Swedia dengan membandingkan pengolahan dengan sistem landfill dengan kombinasi antara insinerasi, daur ulang plastik dan kardus, serta pengolahan biologis (*anaerobic digestion* dan komposting) sampah *biodegradable*. Aspek yang dievaluasi yaitu sumber energi, dampak lingkungan, serta biaya (Eriksson *et al.*, 2005). Penelitian serupa juga pernah dilakukan di Promnik Landfill, Polandia dengan membandingkan dampak lingkungan secara umum dengan metode LCA dari *input* data yang berbeda ke dalam software yang digunakan yaitu SimaPro. Skenario pertama yaitu memasukan data sampah per komponen yang didapatkan dari proses pemilahan secara manual, sedangkan skenario kedua yaitu memasukan data karakteristik sampah keseluruhan yang telah melalui proses landfilling (Kulczyka *et al.*, 2015). Metode LCA juga memungkinkan untuk mengkaji dampak lingkungan secara spesifik, seperti penelitian yang dilakukan di Basilicata, Italia, dengan membandingkan efek emisi gas rumah kaca dari sistem pengolahan sampah dengan landfilling dan insinerasi (Trulli, 2013).

2.6 SimaPro v.8.3

Untuk menganalisis data yang telah dikumpulkan, digunakan *software* SimaPro v.8.3 dari PRè Consultants. Software ini dipilih karena merupakan software yang paling baik untuk menganalisis LCA. Terdapat penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Inès dan Ammar, (2015) yang membandingkan beberapa software, yaitu Simapro v.7, TEAM 4.0, GaBi4, Umberto 5.1, KCL-ECO 4.0, dan EcoLab 6.2.0e.

Penelitian ini menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dengan mempertimbangkan 20 kriteria yang dibagi ke dalam dua kategori, yaitu kriteria teknis dan kriteria manajerial. Kriteria teknis meliputi pengembangan tampilan antarmuka, definisi sistem,

database, penilaian dampak, hasil/*output*, dan kualitas hasil, sedangkan kriteria manajerial meliputi biaya dan dukungan dari vendor.

Perbandingan ini dilakukan secara kuantitatif dengan proses pembobotan dan *scoring*. Dari penilaian yang telah dilakukan pada sub-kriteria definisi sistem, dapat diketahui bahwa semua *software* dapat membuat satuannya sendiri dalam *database*, kecuali *software* Umberto 5.1. *Software* SimaPro 7 dan GaBi 4 memiliki fitur agar satuan parameter ditentukan oleh masing-masing pengguna, yang mana fitur ini sangat mendukung untuk analisis metode LCA.

Pada sub-kriteria *database*, SimaPro 7 dan Gabi 4 diketahui menyediakan akses dan *editing* terbatas dari banyak *file database* (Ecoinvent, BUWAL 250, ETH-ESU) yang merupakan karakteristik yang menawarkan fleksibilitas dan kesederhanaan. *Database* ini mencakup data yang terkait dengan transportasi, energi, dan sumber daya. *Database* didokumentasikan dengan baik. Ini menawarkan juga kemampuan untuk menghubungkan *database* dan impor data. KCL-ECO 4.0 dan Ecolab 6.2.0e dapat mengimpor *database* Ecoinvent. Pengguna *software* Team dapat memperoleh *update* otomatis *database*.

Pada sub-kriteria penilaian dampak, Penilaian dampak sub-kriteria yang ditentukan oleh kategori dampak yang dapat menengah atau kerusakan, metode yang tersedia dan kemampuan untuk menciptakan atau metode perubahan. Enam *software* LCA dibandingkan melibatkan beberapa metode untuk memperkirakan dampak lingkungan dan memberikan kemungkinan untuk membuat metode baru dengan kategori dampak lainnya.

Pada sub-kriteria hasil analisis, perbandingan, presentasi grafis, ekspor, dan pencetakan adalah fitur yang dibandingkan. KCL-ECO 4.0 dan EcoLab 6.2.0e menawarkan presentasi modular berdasarkan kategori, metode dampak, dan kemampuan untuk mengedit grafis. Kedua *software* ini mampu untuk membandingkan dua skenario, sementara SimaPro 7 dan Gabi 4 hanya dapat

membandingkan banyak skenario dalam proyek yang sama. Semua software ini memiliki fitur untuk *printing*.

Untuk sub-kriteria kualitas hasil, hal yang dipertimbangkan adalah sensitivitas dan waktu yang diperlukan untuk menguraikan perhitungan. KCL-ECO 4.0 membangun analisis sensitivitas terkait dengan data dengan tidak pasti. Dengan EcoLab 6.2.0e dapat dihitung secara manual. Umberto 5.1, SimaPro 7, TEAM 4.0, dan GaBi 4 menawarkan kesempatan untuk menguraikan analisis sensitivitas.

Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa SimaPro 7 adalah software LCA yang paling tepat dalam penelitian ini.

2.7 Metode Environmental Product Declarations (EPD) 2007

Penilaian dampak lingkungan dihitung dengan menggunakan *software* SimaPro yang telah dikembangkan oleh PRè Consultants. Menurut van Haaren *et al.* (2010), program ini terdiri dari basis data produk yang luas dan perhitungan energi, bahan sumber daya, dan memancarkan zat kimia selama proses. Zat kimia yang dipancarkan sebagai output dari proses dihitung secara matematis yang akan menghasilkan besaran dampak lingkungan yang sudah dikuantifikasi. Metode yang digunakan pada *software* SimaPro v.8.3 untuk penelitian ini adalah *Environmental Product Declarations* (EPD) 2007 yang menggunakan parameter yang sangat spesifik untuk mengukur dampak lingkungan. Parameter yang tersedia pada metode EPD yaitu:

1. *Global warming* (GWP100)
2. *Ozone Layer Depletion* (ODP)
3. Senyawa penyebab asidifikasi
4. *Photochemical ozone creation*
5. Senyawa penyebab eutrofikasi

2.7.1 Global Warming (GWP100)

Salah satu penyebab pemanasan global adalah gas rumah kaca, yaitu proses senyawa-senyawa gas di

atmosfer yang memantulkan panas kembali ke bumi yang seharusnya lepas ke luar bumi. Beberapa gas yang merupakan gas rumah kaca yaitu karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), ozon, uap air, dan CFC. Dalam *software* SimaPro, parameter penyebab GRK direpresentasikan dalam satuan $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$.

2.7.2 Senyawa Penyebab Asidifikasi

Asidifikasi adalah proses pembentukan ion hidrogen (H^+) karena adanya SO_4 , NO_x , HCl , dan NH_3 . Efek proses asidifikasi dihitung sebagai jumlah proton yang dilepas ke lingkungan. Asidifikasi dapat merusak kualitas lingkungan sebagai hasil emisi dari gas – gas asidifikasi yang terlepas ke udara (van Haaren *et al.*, 2010). Dalam *software* SimaPro, parameter penyebab asidifikasi direpresentasikan dalam satuan $\text{kg SO}_2 \text{ eq}$.

2.7.3 Senyawa Penyebab Eutrofikasi

Eutrofikasi merupakan fenomena yang dapat mempengaruhi ekosistem air atau pencemaran air yang disebabkan oleh nutrisi yang berlebihan pada ekosistem perairan. nitrogen dan fosfor adalah dua nutrisi yang paling terlibat dalam eutrofikasi (Banar *et al.*, 2009). Eutrofikasi adalah proses menerima nutrisi anorganik berlebih, terutama nitrogen dan fosfor yang dapat merangsang pertumbuhan berlebihan dari tanaman dan ganggang. Dalam *software* SimaPro, parameter penyebab eutrofikasi direpresentasikan dalam satuan $\text{kg PO}_4 \text{ eq}$.

2.8 Gambaran Umum Wilayah Studi

TPA Benowo terletak di Kelurahan Romokalisari dan Kelurahan Sumber Rejo, Kecamatan Pakal, Kota Surabaya yang berbatasan langsung dengan Kabupaten Gresik. TPA Benowo memiliki luas lahan sebesar 37,4 Ha. Batas lokasi tapak yang merupakan luasan dan ruang rencana untuk TPA Benowo yaitu:

Sebelah utara : tambak garam dan tambak ikan
milik penduduk atau lahan

pemukiman penduduk
berkepadatan rendah

Sebelah selatan : Stadion Gelora Bung Tomo
Surabaya

Sebelah timur : lahan kosong dan tambak milik
penduduk

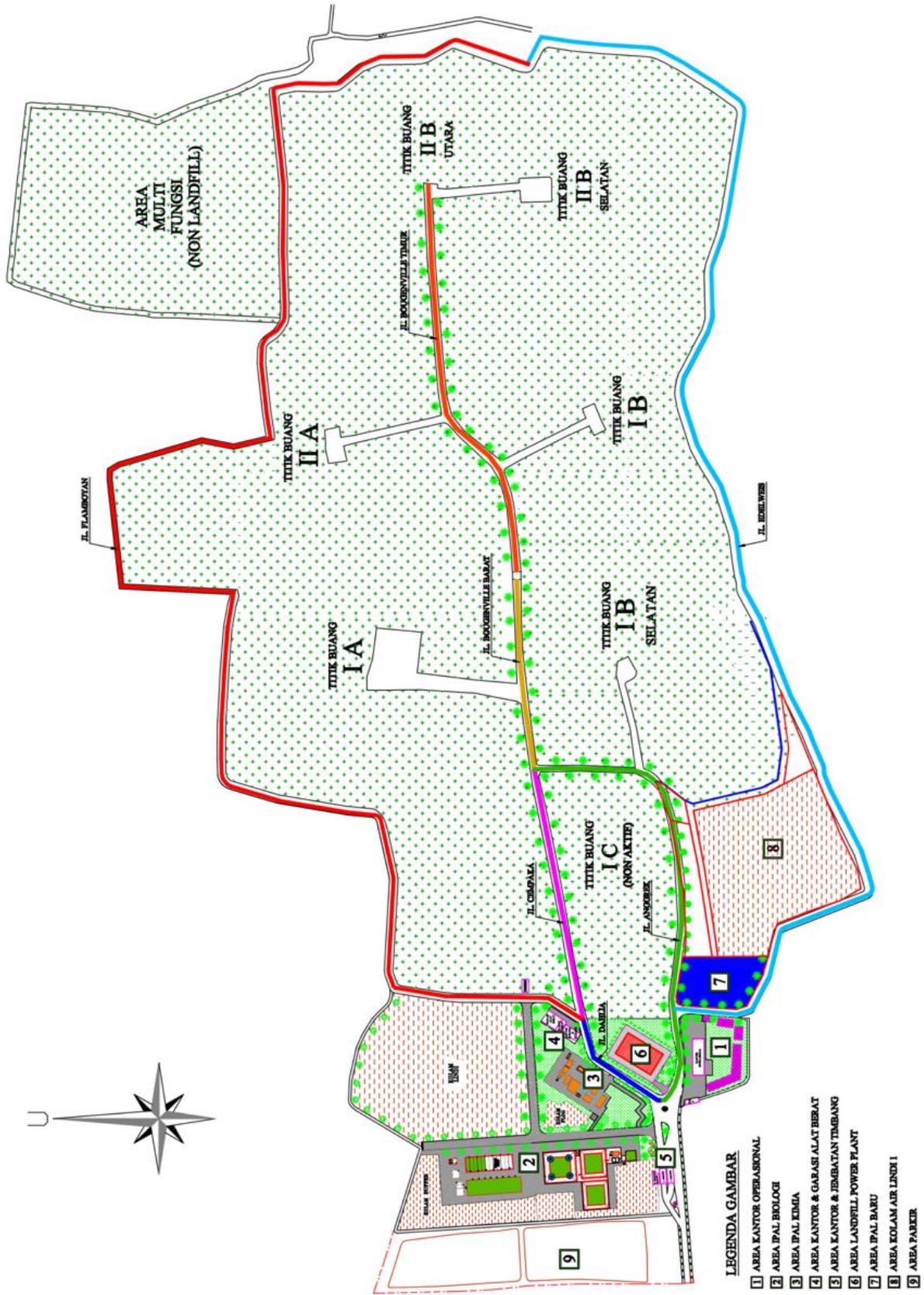
Sebelah barat : Jalan Tambak Dono

Status kepemilikan lahan TPA Benowo saat ini sudah sepenuhnya milik Pemerintah Kota Surabaya dan dikelola oleh pihak swasta yaitu PT. Sumber Organik. Tetapi, masih diperlukan lahan di sekeliling TPA yang berjarak antara 500 m – 2 km untuk kebutuhan lahan penimbunan sampah dan area terbuka hijau yang berfungsi untuk mereduksi bau dan meningkatkan estetika lahan (Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Surabaya, 2016).

Perencanaan awal sistem pengolahan di TPA Benowo adalah *sanitary landfill*, namun dalam pelaksanaannya, sistem ini tidak diterapkan dengan baik, sehingga sistem yang diterapkan sekarang adalah *controlled landfill*. Pemadatan sampah dilakukan setiap hari pada tumpukan sampah di zona operasional. Tidak ada proses penutupan tanah (*cover soil*) pada timbunan sampah. Pada saat perpindahan ke zona operasional, timbunan sampah pada zona yang tidak beroperasi dipadatkan dan ditutup dengan tanah liat setebal 30 cm sebagai *cover soil* yang dipadatkan dengan bantuan mesin pemadat tanah.

Volume timbunan sampah yang masuk ke TPA Benowo setiap harinya dihitung berdasarkan jumlah truk yang masuk. Setiap hari, jumlah truk yang masuk berkisar 290 – 295 truk sampah (Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Surabaya, 2016. Denah TPA Benowo dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Halaman ini sengaja dikosongkan



Gambar 2.8 Denah TPA Benowo, Kota Surabaya
 Sumber: Dinas Kebersihan dan Pertamanan, 2016

Halaman ini sengaja dikosongkan

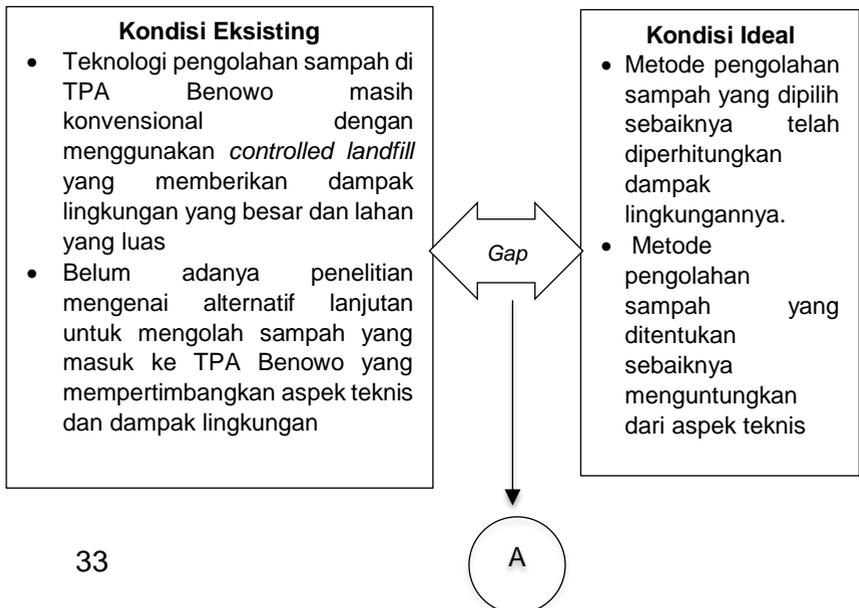
BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Alur Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis potensi pencemaran dari berbagai pengolahan termal pada sampah di TPA Benowo dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA). Untuk mencapai tujuan penelitian, dibutuhkan kerangka alur agar penelitian dapat berjalan secara sistematis, ringkas, dan logis.

Pada dasarnya, semua metode pengolahan sampah pasti menghasilkan polutan yang berdampak negatif untuk lingkungan, seperti produksi gas rumah kaca, asidifikasi, dan eutrofikasi. Namun, polutan yang dihasilkan dari setiap metode akan berbeda jumlahnya. Melalui pendekatan LCA, jumlah polutan yang diproduksi dapat dikuantifikasi sehingga masing-masing pengolahan sampah dapat dinilai secara kualitatif dari dampak lingkungan yang akan diberikan.

Secara garis besar, penelitian ini akan dilaksanakan sesuai bagan alir yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



A

Tujuan

- Menganalisis aspek teknis yang berpengaruh pada pengolahan sampah secara termal di TPA Benowo, Kota Surabaya
- Menganalisis dampak lingkungan dari pengolahan termal sampah di TPA Benowo, Kota Surabaya

Rumusan Masalah

- Apa saja aspek teknis yang berpengaruh pada pengolahan sampah secara termal?
- Apa saja dampak lingkungan yang timbul dari pengolahan termal sampah di TPA Benowo Kota Surabaya?

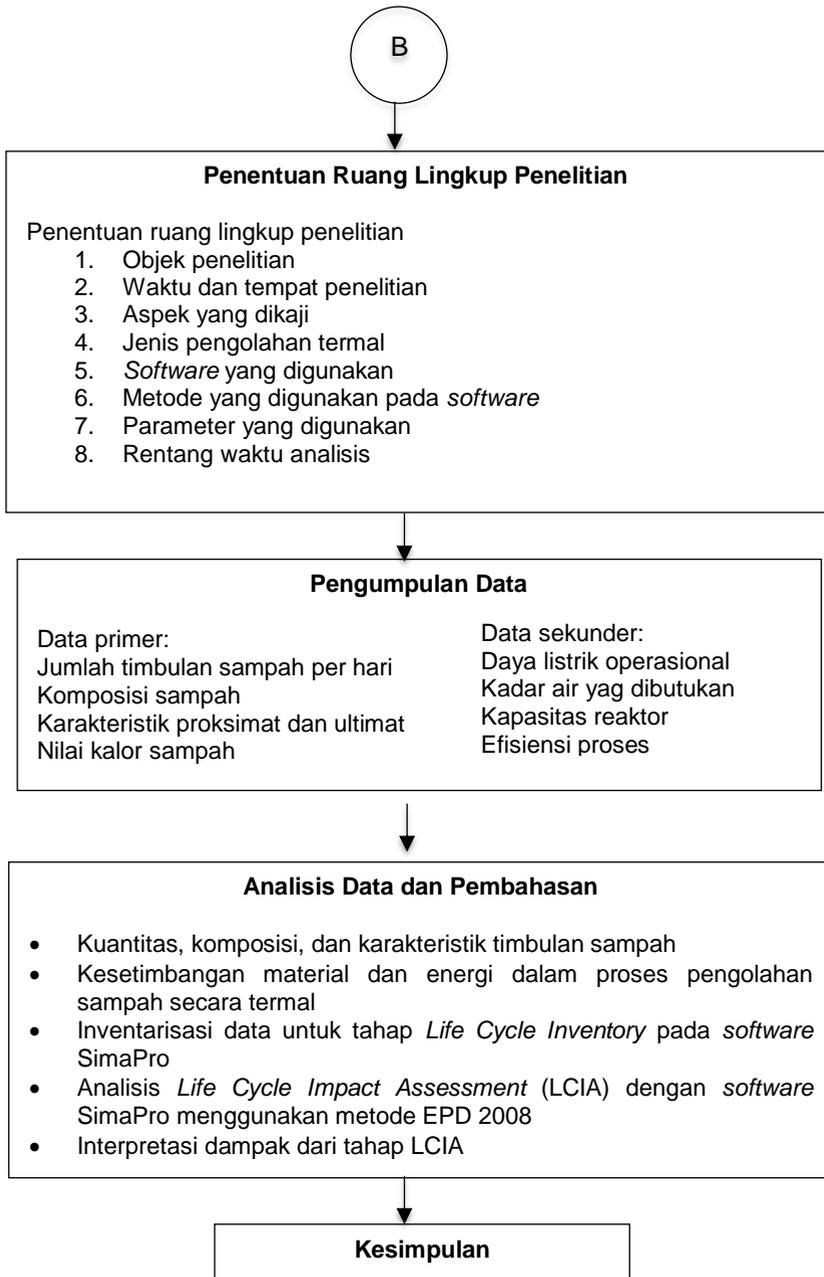
Ide Penelitian

Menganalisis aspek teknis dan dampak lingkungan dari pengolahan termal sampah berdasarkan komposisi dan karakteristik sampah dengan metode *Life Cycle Assessment*

Studi Literatur

- Komposisi sampah
- Karakteristik sampah
- Pengolahan sampah secara fisik, kimia, dan biologis
- Jenis – jenis pengolahan termal sampah
- Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)

B



Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan sumber yang berasal dari buku teks, jurnal internasional, jurnal nasional, serta hasil penelitian yang telah dilakukan. Hasil penelitian yang telah dilakukan dapat berupa laporan tugas akhir, thesis, atau jurnal - jurnal terkait. Hal ini perlu dipelajari untuk mengevaluasi penelitian terdahulu sehingga dapat ditemukan celah sebagai evaluasi yang digunakan sebagai acuan penelitian ini. Literatur yang digunakan harus bersifat *valid* agar memberikan informasi yang akurat.

3.3 Pengumpulan Data

Untuk menunjang penelitian ini, dikumpulkan data yang relevan untuk dianalisis sehingga dapat mencapai tujuan penelitian. Data terdiri dari data primer yang dianalisis langsung di lapangan dan di laboratorium mau pun data sekunder yang bersumber dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Adapun data yang diperlukan pada penelitian ini disusun dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data yang Dibutuhkan untuk Penelitian

Data Primer	Data Sekunder
Kuantitas timbulan sampah	Luas lahan untuk reaktor
Komposisi sampah	Kapasitas reaktor
Karakteristik proksimat (kadar air, zat volatil, kadar abu, dan <i>fixed carbon</i>)	Jumlah penduduk
Karakteristik ultimat (C, H, O, dan N)	
Nilai kalor	

3.3.1 Pengumpulan Data Primer

Data primer merupakan data-data yang langsung dikumpulkan oleh pelaksana penelitian. Data primer dapat diperoleh baik di lapangan melalui observasi mau pun di laboratorium melalui analisis.

3.3.1.1 Penelitian Lapangan

Data kuantitas dan komposisi diambil dengan menganalisis sampel timbunan sampah yang berpedoman pada SNI 19-3964-1994 tentang Metoda Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbunan Sampah Perkotaan. Pengambilan sampel, pemilahan, dan penimbangan sampah dilakukan di TPA Benowo.

Kuantitas sampah dihitung melalui pencatatan berat sampah yang masuk melalui jembatan timbang selama delapan hari sesuai dengan SNI 19-3964-1994 tentang Metoda Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbunan dan Komposisi Sampah Perkotaan. Untuk analisis data, dibutuhkan data kuantitas sampah selama sepuluh tahun ke depan (2018-2027). Maka dari itu, untuk mendapatkan data tersebut, digunakan proyeksi timbunan sampah melalui proyeksi jumlah penduduk.

Komposisi sampah dianalisis selama 5 – 7 hari sesuai dengan ASTM D5231-92. Timbunan yang akan dipilah untuk diketahui komposisi sampahnya adalah sebesar 91 – 136 kg sampah. Teknik pengambilan sampel yang digunakan yaitu *cluster sampling*, yaitu melakukan pengambilan sampel berdasarkan wilayahnya. Dalam penelitian ini, wilayah Kota Surabaya dibagi menjadi lima, yaitu Surabaya Timur, Surabaya Pusat, Surabaya Utara, Surabaya Selatan, dan Surabaya Barat. Setiap harinya dilakukan tiga kali pengambilan sampel, artinya, terdapat 10 jumlah sampel dari penelitian ini. Sampel yang diambil dalam satu hari harus berasal dari wilayah yang berbeda, dan baru bisa diulang setelah semua wilayah diambil sampelnya dengan jumlah yang sama. Contoh jadwal pengambilan sampel adalah sebagai berikut seperti dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Contoh Jadwal Pengambilan Sampel

No	Hari	Wilayah Asal Sampel
1.	Pertama	Surabaya Timur Surabaya Barat
2.	Kedua	Surabaya Utara Surabaya Selatan

3.	Ketiga	Surabaya Pusat Surabaya Timur
4.	Keempat	Surabaya Utara Surabaya Barat
5.	Kelima	Surabaya Pusat Surabaya Selatan

3.3.1.2 Penelitian Laboratorium

Penelitian laboratorium dilakukan untuk menghasilkan data yang akan dimasukkan ke dalam software SimaPro untuk analisis. Penelitian laboratorium terdiri dari *proximate analysis*, *ultimate analysis*, dan bom kalorimeter. Dari delapan hari kegiatan *sampling*, analisis laboratorium dilakukan pada hari pertama, keempat, dan kedelapan kegiatan *sampling*. Sampel yang diuji merupakan sampel sampah organik tercampur serta sampah organik *non biowaste*.

3.3.2 Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder didapatkan melalui penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang berasal dari penelitian sebelumnya pada jurnal mau pun sesuai dengan kondisi produk reaktor di pasaran yang tertera pada brosur. Data yang dibutuhkan yaitu energi listrik operasional, jumlah air yang dibutuhkan, kapasitas reaktor, serta efisiensi proses.

3.4 Analisis dan Pembahasan

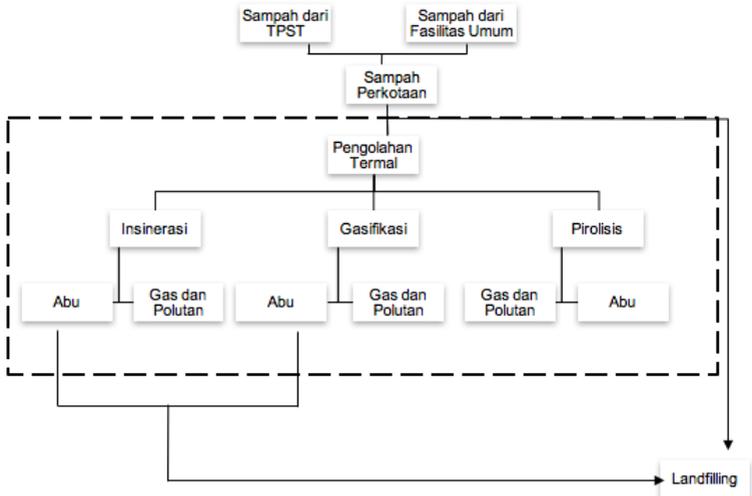
Analisis pada penelitian ini dilakukan melalui dua metode, yaitu menggunakan metode LCA dan perhitungan manual. Analisis dampak lingkungan dikuantifikasi menggunakan *software* SimaPro sedangkan analisis aspek teknis dilakukan melalui perhitungan manual. Tahap analisis masing-masing aspek dijelaskan pada sub bab berikut.

3.4.1 Analisis Dampak Lingkungan menggunakan Metode LCA

Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan dari masing-masing pengolahan termal. Untuk melakukan analisis LCA, dibutuhkan data material dan energi yang masuk ke dalam proses untuk

dikuantifikasi menjadi dampak lingkungan. Analisis ini menggunakan *software* SimaPro v.8.3.

Langkah pertama pada analisis ini yaitu penentuan tujuan dan ruang lingkup dari penelitian yang akan dilaksanakan. Tujuan analisis LCA ini adalah untuk memberikan alternatif pengolahan termal sampah yang terbaik dinilai dari aspek teknis dan aspek lingkungan. Batasan penggunaan LCA dalam penelitian ini adalah unit fungsi yang digunakan dalam *Life Cycle Inventory* (LCI) adalah timbulan, komposisi, dan karakteristik sampah yang masuk ke fasilitas daur ulang. Batasan yang dibuat pada tiap scenario menggunakan unit fungsi yang sama, yakni tonase/tahun (Finnveden *et al.*, 2005). Batasan satuan yang digunakan dalam perhitungan adalah 1 kg/sekali pengolahan sampah (Martinez-Blanco *et al.*, 2010). Dampak lingkungan yang dianalisis disesuaikan dengan inventaris data dampak. Dampak lingkungan akibat transportasi pengangkutan sampah baik dari TPS mau pun fasilitas umum serta dari proses *landfilling* diabaikan dalam analisis ini. Skema batasan analisis LCA dapat dilihat pada Gambar 3.2 Batasan Analisis LCA.



Keterangan: - - - Batasan analisis

Gambar 3.2 Batasan Analisis LCA

Tahap kedua yaitu inventarisasi siklus hidup yang merupakan proses inventarisasi data yang dibutuhkan yaitu bahan dan energi yang digunakan pada saat proses. Data yang diinventarisasikan dalam penelitian ini adalah bahan baku yang diitung berdasarkan timbulan dan komposisi sampah serta emisi yang dihasilkan.

Inventarisasi siklus hidup diawali dengan penentuan functional unit, yaitu 1 ton/hari. Terdapat Sembilan sistem pengolahan termal yang dinilai dampaknya, yaitu insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis yang masing-masing terbagi lagi menjadi tiga kategori input sampah, yaitu sampah A (tercampur), sampah B (organik dengan biowaste), dan sampah C (organik tanpa biowaste). Input masing-masing siklus hidup ditentukan sebanyak 1 ton. Perhitungan produk dan emisi gas yang dihasilkan dihitung berdasarkan Tabel 2.5 dan Tabel 2.6.

Setelah mendapatkan semua data yang dibutuhkan, langkah selanjutnya adalah mengolah data primer dan sekunder yang telah didapatkan menggunakan *software* SimaPro v.8.3. Metode yang digunakan pada analisis ini yaitu *Environmental Product Declaration* (EPD) tahun 2007. Parameter yang dianalisis meliputi Gas Rumah Kaca (GRK), senyawa penyebab asidifikasi, senyawa penyebab eutrofikasi, deplesi gas ozon, dan *photochemical ozone creation*. Tahap ini disebut tahap prakiraan dampak.

Tahap terakhir yaitu tahap interpretasi. Pada tahap ini, aspek lingkungan dari masing-masing pengolahan termal dibandingkan sehingga mendapatkan rekomendasi pengolahan termal yang menghasilkan emisi paling sedikit.

3.4.2 Analisis Aspek Teknis

Dari data primer dan sekunder yang diperoleh, aspek teknis pengolahan termal dapat dianalisis untuk menghasilkan kesimpulan pengolahan termal yang paling menguntungkan. Korelasi aspek yang dianalisis dan data penunjang analisis disajikan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Korelasi Aspek Teknis yang Dianalisis dan Data Penunjangnya

Aspek yang Dianalisis	Data Penunjang
Fasilitas penunjang sebelum pengolahan termal	Komposisi sampah Nilai kalor sampah
Jumlah reaktor yang dibutuhkan	Kuantitas sampah Kapasitas reaktor pengolahan termal
Luas lahan yang dibutuhkan	Kuantitas sampah Kapasitas reaktor pengolahan termal
Tenaga kerja yang dibutuhkan	Kuantitas sampah Jumlah reaktor yang dibutuhkan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Kuantitas dan Komposisi Sampah

Analisis kuantitas dan komposisi sampah dilakukan di TPA Benowo dengan melakukan pemilahan serta penimbangan sampel sampah, baik secara keseluruhan maupun per komponen.

Data kuantitas sampah yang masuk ke TPA Benowo didapatkan dari perkalian jumlah penduduk dengan timbulan sampah yang dihasilkan. Timbulan sampah dihitung dengan analisis jumlah sampah yang masuk ke TPA. Jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo selama masa pengamatan terdapat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Jumlah Sampah yang Masuk ke TPA Benowo

Hari ke-	Jumlah Sampah (ton)
1	1.663,91
2	1.676,44
3	1.493,89
4	1.710,11
5	1.668,85
6	1.698,80
7	1.768,19
8	1.636,13
Rata-rata	1.664,54

Langkah selanjutnya adalah membagi jumlah sampah dengan jumlah penduduk untuk mendapatkan timbulan sampah. Jumlah tersebut adalah jumlah sampah yang masuk pada tahun 2017 ini. Oleh karena belum tersedianya data jumlah penduduk Kota Surabaya tahun 2017, maka jumlah penduduk tahun 2017 didapatkan dari proyeksi penduduk.

Perhitungan proyeksi penduduk diawali dengan perhitungan pertumbuhan penduduk beberapa tahun ke belakang yang terdapat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Jumlah Penduduk Kota Surabaya Tahun 2005-2016

No.	Tahun	Jumlah Penduduk	Pertumbuhan Penduduk (Jiwa)	Persentase Pertumbuhan Penduduk (%)
1	2005	2.740.490	0	0
2	2006	2.784.196	43.706	1,5948
3	2007	2.829.552	45.356	1,6291
4	2008	2.902.507	72.955	2,5783
5	2009	2.938.225	35.718	1,2306
6	2010	2.929.528	-8.697	-0,2960
7	2011	3.024.321	94.793	3,2358
8	2012	3.125.576	101.255	3,3480
9	2013	3.200.454	74.878	2,3957
10	2014	2.853.661	-346.793	-10,8357
11	2015	2.943.528	89.867	3,1492
12	2016	3.016.653	73.125	2,4843
Jumlah			276.163	10,5140
Rata-rata pertumbuhan			25.105,73	0,96
R			0,0096	

Sumber: Badan Pusat Statistik, (2017)

Langkah selanjutnya adalah menghitung koefisien untuk menentukan metode proyeksi penduduk yang nilainya paling mendekati 1. Perhitungan koefisien masing-masing metode terdapat pada Lampiran A sedangkan hasil perhitungan koefisien terdapat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Nilai Korelasi Masing-masing Metode

No.	Metode	Koefisien
1	Aritmatik	-0.0992
2	Geometrik	0.6424
3	<i>Least square</i>	0.6356

Hasil perhitungan koefisien menunjukkan bahwa metode geometrik merupakan metode yang paling tepat untuk menghitung proyeksi penduduk. Perhitungan proyeksi penduduk dilakukan untuk tahun 2017 hingga tahun 2027, sesuai dengan jangka waktu perencanaan pengolahan termal yaitu 10 tahun terhitung mulai tahun 2018. Perhitungan proyeksi penduduk terdapat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Proyeksi Penduduk Kota Surabaya Tahun 2017-2027

No.	Tahun	Jumlah Penduduk
	2017	3.145.375
1	2018	3.279.590
2	2019	3.419.531
3	2020	3.565.445
4	2021	3.717.584
5	2022	3.876.215
6	2023	4.041.615
7	2024	4.214.073
8	2025	4.393.889
9	2026	4.581.379
10	2027	4.776.868

Setelah mendapatkan proyeksi jumlah penduduk tahun 2017, timbulan sampah Kota Surabaya tahun 2017 dapat dihitung dengan cara:

$$\begin{aligned}
 \text{Timbulan sampah (kg/orang.hari)} &= \frac{\text{Jumlah sampah (kg/hari)}}{\text{jumlah penduduk}} \\
 &= \frac{1.664,54 \text{ (ton/hari)}}{3.145.375 \text{ orang}} \\
 &= 0,5290 \text{ kg/orang.hari} \\
 &\approx 0,53 \text{ kg/orang.hari}
 \end{aligned}$$

Perhitungan selanjutnya adalah mengalikan jumlah penduduk dengan timbulan yang sudah didapatkan. Jumlah sampah yang masuk ke TPA per tahun dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Proyeksi Sampah yang Masuk ke TPA Tahun 2018-2027

No.	Tahun	Jumlah Penduduk	Jumlah Sampah (ton/hari)	Jumlah Sampah (ton/tahun)
1	2018	3.279.590	1.736	633.482
2	2019	3.419.531	1.810	660.513
3	2020	3.565.445	1.887	688.697
4	2021	3.717.584	1.967	718.084
5	2022	3.876.215	2.051	748.725
6	2023	4.041.615	2.139	780.674
7	2024	4.214.073	2.230	813.986
8	2025	4.393.889	2.325	848.719
9	2026	4.581.379	2.424	884.934
10	2027	4.776.868	2.528	922.695

Selanjutnya untuk analisis aspek lingkungan, digunakan jumlah sampah yang masuk per tahun pada tahun akhir perencanaan, yaitu tahun 2027 sebanyak 922.695 ton.

Analisis komposisi sampah dilakukan dengan pengambilan sampel sampah dilakukan dengan mengambil sampah langsung dari zona *dumping* dari truk yang baru saja

unloading pada hari yang sama. Hal ini dilakukan agar hasil analisis komposisi yang didapatkan merupakan komposisi sampah terbaru. Sampah yang dipilah dikelompokkan ke dalam komponen sampah makanan, sampah kebun, plastic, kertas, karton, kain, kulit, karet, kayu, organik lain, kaca, kaleng, aluminium, logam lain, *diapers*, B3, serta lain-lain (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Tidak hanya itu, kategori plastik pun dibagi lagi menjadi LDPE, HDPE, PET, PP, PS, dan plastik lain-lain (PVC, dll). Sampah tersebut dibagi dalam tiga kategori, yaitu organik *biowaste*, organik *non biowaste*, dan anorganik. Penjelasan komponen sampah merupakan sebagai berikut:

1. Sampah makanan (organik *biowaste*)

Sampah makanan meliputi sampah sisa makanan makanan, batok kelapa, tongkol jagung, dan sejenisnya. Sampah ini merupakan sampah yang paling banyak dihasilkan, terutama sampah dari TPS yang bersumber dari rumah tangga, pasar, dan pusat perbelanjaan.

2. Sampah kebun (organik *biowaste*)

Sampah kebun meliputi sampah taman dan sampah sapuan jalan dalam bentuk daun, ranting, rumput, semak-semak, atau batang kayu.

3. Plastik (organik *non biowaste*)

a. Plastik *Low Density Polyethylene* (LDPE)

Plastik LDPE adalah kantong kresek, bungkus plastik bening, serta plastik kemasan sablon tipis tanpa aluminium seperti kemasan mie, deterjen, dan sebagainya

b. Plastik *High Density Polyethylene* (HDPE)

Plastik HDPE adalah plastik kemasan yang mengandung aluminium seperti kemasan makanan ringan dan minuman serta plastik sablon tebal seperti kemasan sabun cuci piring dan sejenisnya. Selain itu, botol produk pembersih, sampo, deterjen, dan sebagainya juga termasuk ke dalam plastik HDPE.

c. Plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET)

Plastik PET merupakan plasti yang mudah hancur bentuknya, seperti plastik botol dan geas air mineral serta kotak plastik pembungkus makanan.

- d. Plastik *Plypropylene* (PP)
Contoh plastik PP yaitu plastik karung beras.
 - e. Plastik *Polystyrene* (PS)
Plastik PS berupa bermacam-macam bahan styrofoam untuk berbagai keperluan, seperti kotak pembungkus makanan, pengganjal di dalam kardus elektronik, dan sebagainya.
 - f. Plastik lain-lain
Plastik yang tidak termasuk kategori di atas termasuk dalam plastik lain-lain, contohnya tali raffia, tali kardus, sedotan, dan lain-lain.
4. Kertas (organik *non biowaste*)
Sampah kertas meliputi kertas HVS, kertas pembungkus nasi, kertas tisu, kertas koran, dan sejenisnya.
 5. Karton (organik *non biowaste*)
Sampah karton meliputi kemasan tetrapak, kardus, karton pembungkus makanan, bungkus rokok, dan sejenisnya.
 6. Kain/tekstil (organik *non biowaste*)
Sampah kain merupakan baju bekas, sprei, dan sejenisnya.
 7. Kulit (organik *non biowaste*)
Sampah kulit meliputi sepatu, aksesoris kulit (tas, ikat pinggang, dan lain-lain), dan benda-benda sejenis.
 8. Karet (organik *non biowaste*)
Sampah karet meliputi sandal, ban bekas, tali karet, dan karet gelang.
 9. Kayu (organik *non biowaste*)
Sampah kayu merupakan bahan kayu yang sudah diproses, seperti tusuk sate, besek ikan pindang, kaso, furniture, dan sebagainya.
 10. Diapers (organik *non biowaste*)
Sampah diapers meliputi sampah popok pembalut wanita.
 11. Kaca (anorganik)
Sampah kaca meliputi botol kaca dan pecahan kaca lainnya.
 12. Kaleng (anorganik)
Sampah kaleng merupakan sampah kaleng makanan siap saji dan kaleng rokok.
 13. Aluminium (anorganik)

Sampah aluminium merupakan sampah kaleng minuman.

14. Logam lain (anorganik)

Sampah logam lain merupakan semua sampah logam yang belum termasuk sampah kaleng dan aluminium, seperti sendok/garpu bekas, kawat, dan sebagainya.

15. B3 (anorganik)

Sampah B3 meliputi sisa obat, komponen elektronik, masker, sarung tangan karet, lampu bekas, dan kemasan infus.

16. Lain-lain (anorganik)

Meliputi sampah keramik, *gypsum*, dan material lain yang tidak masuk di kategori sebelum-sebelumnya.

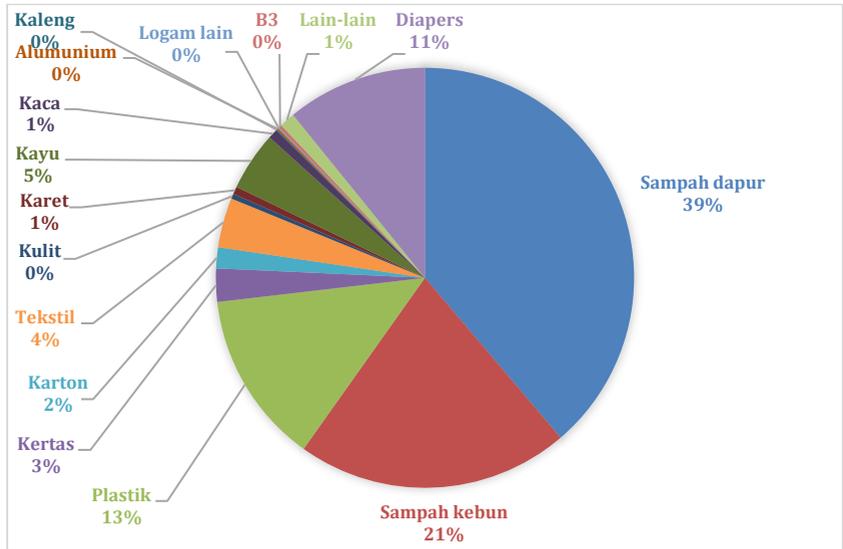
Halaman ini sengaja dikosongkan

Tabel 4.6 Hasil Analisis Komposisi Sampah TPA Benowo

No.	Komponen Sampah	Persentase (%)										Rata-rata
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Sampah dapur	31.37	35.60	36.25	45.26	58.92	34.64	29.17	39.22	36.83	40.44	38.77
2	Sampah kebun	32.20	11.45	28.00	15.23	1.14	36.74	20.86	27.82	14.19	23.17	21.08
3	Plastik	16.37	14.25	16.19	14.56	15.99	6.73	10.27	8.53	17.84	12.38	13.31
	LDPE	9.98	7.33	11.91	10.06	12.72	3.61	7.40	3.47	14.40	8.91	8.98
	HDPE	2.14	4.12	2.24	0.43	1.24	2.01	0.94	1.03	0.91	0.74	1.58
	PET	0.87	0.97	1.02	2.01	0.62	0.80	0.57	0.41	0.94	0.56	0.88
	PS	2.38	0.46	0.41	0.33	1.11	0.20	0.42	0.28	0.45	0.72	0.67
	PP	0.12	0.46	0.20	0.00	0.31	0.00	0.13	3.07	0.63	0.12	0.50
	Lain - lain	0.89	0.92	0.41	1.72	0.00	0.10	0.81	0.27	0.52	1.33	0.70
4	Kertas	1.43	1.17	4.18	1.29	2.48	3.01	4.17	0.77	2.92	4.15	2.56
5	Karton	3.15	0.34	1.22	0.22	2.58	1.10	1.41	0.33	3.76	2.05	1.62
6	Tekstil	3.45	0.00	2.44	2.73	4.65	6.63	4.48	0.84	9.29	3.79	3.83
7	Kulit	0.15	0.34	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	1.75	0.00	1.23	0.39

No.	Komponen Sampah	Persentase (%)										Rata-rata
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
8	Karet	0.16	1.12	0.51	0.93	0.41	0.60	0.52	0.11	0.42	1.02	0.58
9	Kayu	9.03	19.34	0.10	0.50	0.83	1.31	2.29	8.65	2.40	0.82	4.53
10	Diapers	2.26	11.22	10.18	8.48	12.20	6.33	25.73	11.50	11.06	9.73	10.87
11	Kaca	0.00	4.81	0.20	0.16	0.62	0.00	0.83	0.05	0.31	0.61	0.76
12	Kaleng	0.18	0.06	0.10	0.15	0.00	0.01	0.00	0.16	0.00	0.10	0.08
13	Alumunium	0.08	0.15	0.00	0.86	0.00	0.00	0.07	0.05	0.00	0.00	0.12
14	Logam lain	0.08	0.06	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.21	0.31	0.08
15	B3	0.12	0.10	0.51	0.29	0.17	0.20	0.21	0.11	0.52	0.20	0.24
16	Lain-lain	0.00	0.00	0.00	9.34	0.00	2.31	0.00	0.02	0.26	0.00	1.19
	TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Dari data tersebut, dapat diketahui komposisi sampah yang masuk ke TPA Benowo dengan cara merata-rata hasil dari pemilahan sampel. Komposisi sampah TPA Benowo dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram Hasil Perhitungan Rata-rata Komposisi Sampah di TPA Benowo Kota Surabaya

Pada perhitungan selanjutnya, komponen sampah diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu:

1. Sampah A (sampah tercampur): merupakan seluruh komponen sampah (100% massa sampah)
2. Sampah B (sampah organik dengan *biowaste*): merupakan seluruh sampah organik dengan sampah basah, yaitu sampah makanan dan kebun (97,52% massa sampah)
3. Sampah C (sampah organik tanpa *biowaste*): merupakan seluruh sampah organik tanpa sampah basah, yaitu sampah makanan dan kebun (37,67% massa sampah)

4.2 Analisis Karakteristik Sampah

Analisis karakteristik sampah yang pertama merupakan analisis densitas sampah yang dilakukan sebanyak sepuluh kali, bersamaan dengan analisis komposisi sampah. Perhitungan densitas sampah terdapat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Analisis Densitas Sampah

No.	Massa (kg)	Tinggi (m)	Volume (m ³)	Densitas (kg/m ³)
1	96	0,5	0,5	192,0
2	93,2	0,5	0,5	186,4
3	92,4	0,4	0,4	231,0
4	99,5	0,35	0,35	284,3
5	99,6	0,34	0,34	292,9
6	94,6	0,44	0,44	215,0
7	98,8	0,4	0,4	247,0
8	102,3	0,5	0,5	204,6
9	93,2	0,4	0,4	233,0
10	96	0,5	0,5	192,0
Rata-rata				227,82

Dari analisis tersebut, dapat diketahui bahwa rata-rata densitas sampah di TPA Benowo adalah sebesar 227,82 kg/m³. Angka ini memiliki selisih yang tidak jauh dengan densitas TPA Cipayung yaitu sebesar 220,44 kg/m³ (Annisa, 2015). Angka ini juga masih berada dalam rentang densitas sampah menurut Tchobanoglous et al., (1993) yaitu sebesar 178-415 kg/m³.

Analisis karakteristik sampah dilanjutkan dengan analisis karakteristik fisik yaitu analisis proksimat berupa kadar air, *volatile solid*, kadar abu, dan *fixed carbon* serta analisis nilai kalor. Sampel yang dianalisis merupakan sampel sampah tercampur, sampah organik dengan *biowaste*, dan sampah organik tanpa *biowaste*. Masing-masing sampel dianalisis

secara duplo. Pada Tabel 4.8 dapat dilihat hasil *proximate analysis* dari sampah di TPA Benowo.

Tabel 4.8 Hasil Analisis Proksimat Sampah TPA Benowo

No.	Nama Sampel	Kadar air	Kadar VS	Kadar Abu	<i>Fixed carbon</i>
1	Sampah tercampur	54.76%	30.14%	6.91%	8.19%
2	Sampah organik dengan <i>biowaste</i>	44.64%	8.70%	25.82%	20.84%
3	Sampah organik <i>tanpa biowaste</i>	11.77%	76.71%	10.17%	1.36%

Kadar air paling tinggi dimiliki sampah tercampur karena komponen sampah makanan, sampah kebun, dan diapers. Hal ini dikarenakan persentase kadar air yang tinggi dari sampah makanan dan sampah kebun, yaitu 70% dan 60% (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Sampah organik dengan *biowaste* memiliki kadar air yang relative lebih rendah dari sampah tercampur karena tidak terdapat komponen *diapers* yang persentasenya cukup tinggi, yaitu 10,87% dan mengandung kadar air yang tinggi. Sedangkan sampah organik tanpa *biowaste* memiliki kadar air paling rendah karena terdapat hanya berbagai jenis plastik, karton, serta tekstil, karet, dan kulit yang memiliki kadar air berkisar 0,2 – 10,2 (Tabel 2.2). Kategori sampah ini memiliki kadar air lebih tinggi dari kadar air tipikal per komponen karena pengambilan sampel dilakukan saat musim hujan, sehingga nilai kadar air lebih tinggi dari yang seharusnya. Semakin tinggi kadar air di dalam sampah, semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air saat proses pembakaran. Hal ini menyebabkan nilai kalor yang semakin rendah (Novita dan Damanhuri, 2010) karena proses yang pertama kali terjadi pada pembakaran adalah penguapan air (Damanhuri, 2006).

Jika dibandingkan dengan kadar air sampah di Kota Bogor yang sebesar 63,73% (Novita dan Damanhuri, 2010)

dan sampah di TPA Bagendung (Kota Cilegon) sebesar 40% (Sudrajad et al., 2014), nilai kadar air sampah tercampur di TPA Benowo yang sebesar 54,76% terbilang normal.

Kadar *volatile solid* tertinggi dimiliki oleh sampah kategori C dengan komponen dominan berupa plastik. Hal ini sesuai dengan kadar *volatile solid* plastik secara teoritis yaitu 95,8 – 98,7% yang tertera pada Tabel 2.2. Proses pembakaran *volatile solid* bersifat eksotermis atau menghasilkan panas yang akan terukur menjadi nilai kalor sampah. Selain kadar air, kadar *volatile solid* juga menentukan nilai kalor sampah (Novita dan Damanhuri, 2010).

Kadar abu tertinggi dimiliki oleh sampah kategori B dengan komposisi dominan yaitu sampah makanan, tekstil karet, dan kulit yang memiliki kadar abu yang tinggi, yaitu 5; 6,5; 9,9; dan 9% secara berurutan. Komponen anorganik sebenarnya memiliki kadar abu paling tinggi, yaitu berkisar antara 94-99%, namun karena persentasenya yang sangat kecil yaitu 0,08-0,12% (

Halaman ini sengaja dikosongkan

Tabel 4.6), maka persentasenya tidak signifikan. Kadar abu ini berbanding terbalik dengan *volatile solid*. Keduanya berpengaruh terhadap nilai kalor. Zat anorganik pengotor, pengisi, atau penguat yang terkandung pada komponen sampah tidak berkontribusi pada panas pembakaran sehingga dapat menurunkan nilai kalor. Zat-zat ini nantinya tersisa menjadi abu (Novita dan Damanhuri, 2010).

Setelah melakukan analisis proksimat, analisis ultimat dilakukan dengan menghitung persentase unsur C, H, O, N, dan S dari masing-masing sampel. Perhitungan ini diawali dengan mengasumsikan sampel sebanyak 1 kilogram (1.000 gram) dan mengalikan asumsi berat sampel, persentase komponen, dan kadar air sehingga didapatkan berat kering komponen. Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:

Berat kering komponen:

$$\text{Persentase komponen (\%)} \times 1.000 \text{ gram} \times (100 - \text{kadar air})\%$$

Contoh perhitungan berat kering sampah sisa makanan:

$$38,77\% \times 1.000 \text{ gram} \times (100 - 86,1)\% = 54,04 \text{ gram}$$

Perhitungan berat kering komponen lainnya terdapat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Berat Kering Komponen Sampah

Komponen	Persentase (%)	Kadar Air per Komponen* (%)	Berat Kering (gram)
	a	b	$a \times (100 - b) \times 1.000 \text{ gram}$
Sampah sisa makanan	38,77	86,1	54,04
Sampah kebun	21,08	66,1	71,56
LDPE	8,98	21,2	70,71
HDPE	1,58	1,3	15,59
PET	0,88	1,1	8,68
PS	0,67	3,5	6,51
PP	0,50	1,6	4,96

Lain - lain	0,70	1,0	6,91
Kertas	2,56	6,5	23,90
Karton	1,62	22,2	12,57
Tekstil	3,83	0,8	37,97
Kulit	0,39	0,9	3,84
Karet	0,58	0,5	5,78
Kayu	4,53	12,3	39,72
Diapers	10,87	66,9	35,97
Kaca	0,76	2,0	7,45
Kaleng	0,08	5,0	0,73
Alumunium	0,12	2,0	1,18
Logam lain	0,08	2,0	0,81
B3	0,24	2,0	2,39
Lain-lain	1,19	3,2	11,54
Total	100,00		411,28

Sumber: *Analisis Laboratorium Teknologi Air, (2017)

Langkah selanjutnya adalah mengalikan berat kering dengan persentase senyawa C, H, O, N, atau S pada masing-masing komponen yang terapat pada Tabel 2.3 dengan rumus:

Berat kering unsur:

Berat kering komponen (gram) x persentase unsur (%)

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:

Berat kering unsur C pada sampah sisa makanan:

54,04 gram x 48% = 25,94 gram

Berat kering unsur H pada sampah sisa makanan:

54,04 gram x 6,4% = 3,46 gram

Berat kering unsur O pada sampah sisa makanan:

54,04 gram x 37,6% = 20,32 gram

Berat kering unsur N pada sampah sisa makanan:
 $54,04 \text{ gram} \times 2,6\% = 1,41 \text{ gram}$

Berat kering unsur S pada sampah sisa makanan:
 $54,04 \text{ gram} \times 0,4\% = 0,22 \text{ gram}$

Seluruh perhitungan berat unsur pada komponen sampah terdapat pada Tabel 4.10

Tabel 4.10 Perhitungan Berat Unsur Komponen Sampah

Komponen	Berat Kering (g)	Komposisi per Unsur (gram)				
		C	H	O	N	S
Sampah sisa makanan	54,04	25,94	3,46	20,32	1,41	0,22
Sampah kebun	71,56	32,92	4,29	27,19	2,43	0,21
LDPE	70,71	60,25	10,04	0,00	0,07	0,07
HDPE	15,59	13,28	2,21	0,00	0,02	0,02
PET	8,68	7,39	1,23	0,00	0,01	0,01
Komponen	Berat Kering (g)	Komposisi per Unsur (g)				
		C	H	O	N	S
PS	6,51	5,67	0,55	0,26	0,01	0,00
PP	4,96	2,97	0,36	1,13	0,00	0,00
Lain - lain	6,91	4,15	0,50	1,58	0,00	0,00
Kertas	23,90	10,37	1,39	10,59	0,07	0,05
Karton	12,57	7,44	1,17	3,78	0,01	0,01
Tekstil	37,97	18,23	2,43	15,19	0,84	0,08
Kulit	3,84	2,68	0,33	0,00	0,00	0,06
Karet	5,78	4,03	0,50	0,00	0,00	0,09
Kayu	39,72	19,66	2,38	16,96	0,08	0,04
Diapers	35,97	15,61	2,09	15,94	0,11	0,07
Kaca	7,45	0,04	0,01	0,03	0,01	0,00

Kaleng	0,73	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00
Alumunium	1,18	0,05	0,01	0,05	0,00	0,00
Logam lain	0,81	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00
B3	2,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lain-lain	11,54	3,04	0,35	0,23	0,06	0,02
Total Sampah A		233,79	33,30	113,31	5,12	0,95
Total Sampah B		230,59	32,93	112,94	5,05	0,93
Total Sampah C		171,73	25,18	65,43	1,22	0,50

Tabel 4.10 menunjukkan perhitungan total berat masing-masing unsur C, H, O, N, dan S pada masing-masing komponen sampah untuk sampah A (tercampur), sampah B (organik dengan *biowaste*), dan sampah C (organik tanpa *biowaste*). Dari perhitungan tersebut, dapat diketahui koefisien masing-masing unsur dengan cara:

$$\text{Koefisien unsur (mol)} = \frac{\text{berat unsur (gram)}}{\text{massa atom (gram/mol)}}$$

Berikut adalah contoh perhitungan mol unsur sampah tercampur yang dilakukan dengan perhitungan tersebut:

$$\text{Mol C (mol)} = \frac{233,79 \text{ gram}}{12 \text{ (gram/mol)}} = 19,48 \text{ mol}$$

$$\text{Mol H (mol)} = \frac{33,30 \text{ gram}}{1 \text{ (gram/mol)}} = 33,30 \text{ mol}$$

$$\text{Mol O (mol)} = \frac{113,31 \text{ gram}}{16 \text{ (gram/mol)}} = 7,08 \text{ mol}$$

$$\text{Mol N (mol)} = \frac{5,12 \text{ gram}}{14 \text{ (gram/mol)}} = 0,37 \text{ mol}$$

$$\text{Mol S (mol)} = \frac{0,95 \text{ gram}}{32 \text{ (gram/mol)}} = 0,03 \text{ mol}$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung koefisien unsur dengan cara membagi mol unsur dengan mol unsur terkecil,

dalam hal ini adalah unsur S pada perhitungan senyawa kimia dengan unsur S dan unsur N pada perhitungan senyawa kimia tanpa unsur S. Pada perhitungan ini, dapat ditentukan senyawa kimia sampah dengan maupun tanpa unsur S. Contoh perhitungan senyawa kimia sampah tercampur dengan unsur S:

$$\begin{aligned} \text{Koefisien C} &= \frac{\text{mol unsur C (mol)}}{\text{mol unsur S (mol)}} = \frac{19,48 \text{ mol}}{0,03 \text{ mol}} = 656 \\ \text{Koefisien H} &= \frac{\text{mol unsur H (mol)}}{\text{mol unsur S (mol)}} = \frac{33,30 \text{ mol}}{0,03 \text{ mol}} = 1.121 \\ \text{Koefisien O} &= \frac{\text{mol unsur O (mol)}}{\text{mol unsur S (mol)}} = \frac{7,08 \text{ mol}}{0,03 \text{ mol}} = 238 \\ \text{Koefisien N} &= \frac{\text{mol unsur N (mol)}}{\text{mol unsur S (mol)}} = \frac{0,37 \text{ mol}}{0,03 \text{ mol}} = 12 \\ \text{Koefisien S} &= \frac{\text{mol unsur S (mol)}}{\text{mol unsur S (mol)}} = \frac{0,03 \text{ mol}}{0,03 \text{ mol}} = 1 \end{aligned}$$

Perhitungan tersebut menunjukkan hasil senyawa kimia untuk sampah tercampur dengan unsur S adalah $C_{656}H_{1.121}O_{238}N_{12}S$. Perhitungan senyawa kimia tanpa unsur S juga dilakukan dengan cara yang sama, namun pembagi mol unsur merupakan mol N. Perhitungan koefisien senyawa sampah tercampur tanpa unsur S adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Koefisien C} &= \frac{\text{mol unsur C (mol)}}{\text{mol unsur N (mol)}} = \frac{19,48 \text{ mol}}{0,37 \text{ mol}} = 53 \\ \text{Koefisien H} &= \frac{\text{mol unsur H (mol)}}{\text{mol unsur N (mol)}} = \frac{33,30 \text{ mol}}{0,37 \text{ mol}} = 91 \\ \text{Koefisien O} &= \frac{\text{mol unsur O (mol)}}{\text{mol unsur N (mol)}} = \frac{7,08 \text{ mol}}{0,37 \text{ mol}} = 19 \\ \text{Koefisien N} &= \frac{\text{mol unsur N (mol)}}{\text{mol unsur N (mol)}} = \frac{0,37 \text{ mol}}{0,37 \text{ mol}} = 1 \end{aligned}$$

Perhitungan tersebut menunjukkan hasil senyawa kimia untuk sampah tercampur tanpa unsur S adalah $C_{53}H_{91}O_{19}N$.

Selanjutnya, dilakukan juga perhitungan koefisien senyawa sampah dengan maupun tanpa unsur S, baik untuk sampah organik dengan biowaste. Hasil perhitungan terdapat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perhitungan Koefisien Senyawa Sampah Organik dengan *Biowaste*

Keterangan	Komposisi				
	C	H	O	N	S
Berat atom (g/mol)	12	1	16	14	32
Mol	19,22	32,93	7,06	0,36	0,03
Rumus Kimia Sampah	53	91	20	1	0
Rumus Kimia Sampah (dengan S)	663	1136	243	12	1

Tabel 4.11 menunjukkan bahwa senyawa kimia untuk sampah organik dengan biowaste tanpa unsur S adalah $C_{53}H_{91}O_{20}N$ dan senyawa kimia dengan unsur S adalah $C_{663}H_{1.136}O_{243}N_{12}S$. Perhitungan selanjutnya adalah senyawa kimia untuk sampah organik tanpa biowaste dengan maupun tanpa unsur S yang terdapat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Perhitungan Koefisien Senyawa Sampah Organik Tanpa Biowaste

Keterangan	Komposisi				
	C	H	O	N	S
Berat atom (g/mol)	12	1	16	14	32
Mol	14,31	25,18	4,09	0,09	0,02
Rumus Kimia Sampah	40	70	11	0	0
Rumus Kimia Sampah (dengan S)	922	1622	263	6	1

Tabel 4.12 menunjukkan bahwa senyawa kimia untuk sampah organik tanpa biowaste tanpa unsur S adalah $C_{40}H_{70}O_{11}N$ dan senyawa kimia dengan unsur S adalah $C_{922}H_{1.622}O_{263}N_6S$.

Karakteristik sampah lainnya yang perlu dianalisis adalah nilai kalor yang dilakukan dengan perhitungan secara

manual. Perhitungan nilai kalor sampah basah adalah sebagai berikut. Perhitungan ini diawali dengan mengasumsikan sampel sebanyak 1 kilogram dan mengalikan asumsi berat sampel, persentase komponen, dan nilai kalor per komponen. Nilai kalor per komponen yang terdapat pada Tabel 2.4 diketahui dalam satuan Btu/lb, sedangkan perhitungan ini menggunakan satuan kJ/kg sehingga nilai kalor perlu dikonversi terlebih dahulu dengan rumus:

Nilai kalor (kJ/kg):

$$\text{persentase (\%)} \times 1 \text{ kg} \times \text{nilai kalor (Btu/lb)} \times \frac{1 \text{ kJ}}{0,95 \text{ btu}} \times \frac{1 \text{ lb}}{0,45 \text{ kg}}$$

Contoh perhitungan untuk nilai kalor sampah sisa makan adalah sebagai berikut:

Nilai kalor sampah sisa makanan (kJ):

$$38,77\% \times 1 \text{ kg} \times 1.500 \text{ Btu/lb} \times \frac{1 \text{ kJ}}{0,95 \text{ btu}} \times \frac{1 \text{ lb}}{0,45 \text{ kg}} = 1.353 \text{ kJ}$$

Tabel 4.13 Nilai Kalor per Komponen Sampah

No.	Komponen Sampah	Berat Sampah (kg)	Nilai Kalor (kJ)	
			Basah	Kering
1	Sampah makanan	0,3877	1.353	1.804
2	Sampah kebun	0,2108	490	1.373
3	Plastik			
	LDPE	0,0898	2.506	2.924
	HDPE	0,0158	441	514
	PET	0,0088	245	286
	PS	0,0067	188	220
	PP	0,0050	141	164
	Lain - lain	0,0070	195	227
4	Kertas	0,0256	297	428
5	Karton	0,0162	225	263
6	Tekstil	0,0383	579	668
7	Kulit	0,0039	59	68
8	Karet	0,0058	122	14

9	Kayu	0,0453	790	842
10	Diapers	0,1087	1.264	1.820
11	Kaca	0,0076	1	1
12	Kaleng	0,0008	0	1
13	Alumunium	0,0012	-	-
14	Logam lain	0,0008	0	1
15	B3	0,0024	28	41
16	Lain-lain	0,119	28	83
Sampah tercampur		100	8.951	11.740
Sampah organik dengan <i>biowaste</i>		97,52	8.894	11.614
Sampah organik tanpa <i>biowaste</i>		37,67	7.051	8.437

Dari Tabel 4.13, dapat diketahui nilai kalor sampah per persentase komponen sampah dari keseluruhan total sampah. Maka dari itu, perlu dihitung nilai kalor sampah yang sebenarnya (per seluruh total sampah atau per kg) dengan perhitungan sebagai berikut:

Nilai kalor sampah organik dengan *biowaste* (basah)

$$\text{Nilai kalor (kJ/kg)} = \frac{8.894 \text{ kJ}}{0,9752 \text{ kg}} = 9.122 \text{ kJ/kg}$$

Nilai kalor sampah organik tanpa *biowaste* (kering)

$$\text{Nilai kalor (kJ/kg)} = \frac{11.614 \text{ kJ}}{0,9752 \text{ kg}} = 11.909 \text{ kJ/kg}$$

Nilai kalor sampah organik tanpa *biowaste* (basah)

$$\text{Nilai kalor (kJ/kg)} = \frac{7.051 \text{ kJ}}{0,3767 \text{ kg}} = 18.717 \text{ kJ/kg}$$

Nilai kalor sampah organik tanpa *biowaste* (kering)

$$\text{Nilai kalor (kJ/kg)} = \frac{8.437 \text{ kJ}}{0,3767 \text{ kg}} = 22.397 \text{ kJ/kg}$$

Tabel 4.14. Perhitungan Nilai Kalor Sampah TPA Benowo

Jenis Sampah	Nilai kalor (kJ/kg)	
	Basah	Kering

Sampah tercampur	8.951	11.740
Sampah organik dengan <i>biowaste</i>	9.122	11.909
Sampah organik tanpa <i>biowaste</i>	18.717	22.397

Selain melalui perhitungan, nilai kalor juga bisa diketahui dengan analisis bom kalorimetri, Nilai kalor total didapatkan dari hasil analisis sampel sampah kering yang telah melalui pengeringan di oven pada suhu 105° selama 24 jam. Nilai kalor dianalisis di laboratorium dengan metode bom kalorimetri. Hasil analisis terdapat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Hasil Analisis Nilai Kalor Sampah TPA Benowo

No.	Nama Sampel	Nilai Kalor
		kJ/kg
1.	Sampah tercampur	11.739
2.	Sampah organik dengan <i>biowaste</i>	12.494
3.	Sampah organik tanpa <i>biowaste</i>	10.942

Sumber: Laboratorium Balai Penelitian dan Konsultasi Industri, (2017)

Nilai kalor tertinggi dimiliki oleh sampah organik dengan *biowaste* yang memiliki persentase sampah makanan, sampah kebun, dan plastik yang dominan. Seperti nilai kalor teoritis yang terdapat pada Tabel 2.4, sampah makanan dan sampah kebun memiliki nilai kalor yang tinggi dalam keadaan kering, yaitu 3.326 dan 3.615 kkal/kg.

Nilai kalor dari hasil analisis laboratorium yang diketahui merupakan nilai kalor sampah dalam keadaan kering. Nilai kalor basah juga perlu diketahui apakah sampah dapat langsung diolah secara termal atau harus melalui *pre-treatment* berupa pengeringan. Maka dari itu, dilakukan perhitungan dengan mengalikan nilai kalor dengan kadar air. Menurut Tchobanoglous et al., (1993) perhitungan nilai kalor adalah sebagai berikut:

$$\text{Nilai kalor kering} = \text{Nilai kalor basah} \times \frac{100\%}{(100\% - \text{kadar air})}$$

Contoh perhitungan dilakukan untuk sampel tercampur dengan data kadar air dari Tabel 4.8 adalah sebagai berikut:

$$\text{Nilai kalor basah} = \text{Nilai kalor kering} \times \frac{(100\% - \text{kadar air})}{100\%}$$

$$\begin{aligned}\text{Nilai kalor basah} &= 2.806 \text{ kcal/kg} \times \frac{(100\% - 54,76\%)}{100\%} \\ &= 1.269 \text{ kcal/kg}\end{aligned}$$

Perhitungan tersebut dilakukan pada ketiga sampel sehingga didapatkan hasil yang tertera pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Nilai Kalor Basah Sampah TPA Benowo

No.	Nama Sampel	Nilai Kalor
		kJ/kg
1.	Sampah tercampur	5.311
2.	Sampah organik dengan <i>biowaste</i>	6.917
3.	Sampah organik tanpa <i>biowaste</i>	9.655

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa nilai kalor sampah tercampur dan organik dengan *biowaste* turun secara drastis apabila dihitung dalam keadaan basah. Nilai kalor paling tinggi dimiliki oleh sampah organik tanpa *biowaste* karena memiliki kadar air paling sedikit. Berdasarkan Damanhuri, (2006), sampah yang dapat diolah secara termal harus memiliki nilai kalor kering minimal 6.276 kJ/kg. Sedangkan di China, sampah yang dapat diolah dengan metode gasifikasi adalah sampah dengan nilai kalor 7.000-9.000 kJ/kg (Xiao, *et al.*, 2006). Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa apabila dilakukan *pre-treatment* berupa pengeringan pada sampah, seluruh kategori sampah dapat diolah secara termal karena memiliki nilai kalor yang cukup. Namun apabila pada sampah tidak dilakukan pengeringan, maka hanya sampah organik dengan dan tanpa *biowaste* yang dapat diolah secara termal, sedangkan sampah tercampur yang dalam keadaan basah belum bisa diolah. Untuk mengolah sampah organik dengan mau pun tanpa *biowaste*, perlu dilakukan pemilahan sampah untuk menghilangkan residu yaitu sampah-sampah anorganik.

4.3 Analisis Aspek Teknis Pengolahan Sampah Secara Termal

Pada analisis aspek teknis, kriteria yang akan dihitung adalah luas area per ton massa sampah, kuantitas alat, jumlah pekerja, dan teknis operasional. Keempat kriteria ini dihitung untuk tiga jenis pengolahan termal (insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis) dengan tiga jenis *input*, yaitu sampah tercampur, sampah organik dengan *biowaste*, dan sampah organik tanpa *biowaste*. Maka dari itu, akan terdapat total sembilan perbandingan aspek teknis pengolahan termal dengan *input*

yang berbeda. Adanya kategori sampah organik dengan *biowaste* dan tanpa *biowaste* menyebabkan perlunya *pre-treatment* berupa separasi secara fisik.

Seluruh perencanaan ini diharapkan dapat menampung sampah hingga akhir masa perencanaan, yaitu tahun 2027. Berdasarkan hasil proyeksi jumlah sampah yang masuk pada Tabel 4.5, diperkirakan jumlah sampah yang masuk pada tahun 2027 adalah sebesar 922.695 ton/tahun atau 2.528 ton/hari.

Lahan pengolahan termal diawali dengan fasilitas *ramp* yang digunakan untuk *unloading* truk sampah menuju bunker material mentah. Keseluruhan perencanaan menggunakan desain *ramp* dan bunker material mentah yang tipikal. Perhitungan dimensi *ramp* dan bunker material mentah adalah sebagai berikut:

Ramp

Dimensi lahan : $15 \times 20 \text{ m} = 300 \text{ m}^2$

Kebutuhan tenaga kerja : 2 orang

Bunker material mentah

Dimensi lahan : $15 \times 5 \text{ m} = 225 \text{ m}^2$

Kebutuhan tenaga kerja : tidak ada

Sampah yang masuk ke dalam bunker kemudian diangkat menggunakan *crane* menuju mesin *pre treatment* secara vertikal. *Pre treatment* yang direncanakan untuk pengolahan terdiri dari pencacahan dan pengeringan. Pemilahan bersifat opsional untuk pengolahan sampah organik dengan maupun tanpa *biowaste*. Kedua jenis sampah ini pun menggunakan alat pemilah yang berbeda. Sampah organik dengan *biowaste* menggunakan alat pemilah berupa *magnetic separator* untuk memisahkan logam yang bersifat anorganik karena berupa komponen *non-combustible*. Sedangkan sampah organik tanpa *biowaste* menggunakan *magnetic separator* dan *trommel* untuk memisahkan komponen *biowaste*.

Untuk masuk ke mesin pencacah, sampah diangkat menggunakan *crane*. Pengoperasian *crane* tidak

membutuhkan lahan karena dipasang secara vertikal. Adapun spesifikasi *crane* adalah sebagai berikut:

Jenis	: <i>waste handling cranes</i>
Kapasitas	: 580 ton/hari
Kapasitas angkut maksimum	: 5,4 ton
Rentang alat	: 21 m
Tinggi angkut maksimum	: 35,8 m
Kecepatan angkat	: 42 m/min
Kebutuhan tenaga kerja	: 1 orang operator

Crane yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Unit *crane*

Mesin selanjutnya adalah pencacahan sebagai *pre-treatment* untuk mereduksi ukuran. Hal ini dikarenakan mesin pengolahan termal memiliki ukuran keping maksimum agar pengolahan berjalan lebih efektif. Pada perencanaan ini, *gasifier* yang akan digunakan memiliki kriteria maksimal keping sebesar 10 cm. Spesifikasi mesin pencacah yang digunakan adalah sebagai berikut:

Jenis	: <i>Municipal solid waste shredding machine</i>
Kapasitas	: 10-25 ton/jam
Dimensi (p x l x t)	: 8 x 2,5 x 2,4 m
Ukuran output	: 3 – 10 cm
Daya mesin utama	: 180 kw

Daya konveyor : 3-4 kw
Kebutuhan pekerja : 3 orang

Dari spesifikasi tersebut, dapat dihitung kebutuhan mesin pencacah sebagai berikut:

Kapasitas rata-rata : 20 ton/jam = 480 ton/hari
Kebutuhan mesin : 2.528 ton/hari/480 ton/hari
= 5,2 \approx 6 mesin
Kebutuhan pekerja : 6 x 1 orang = 6 orang

Selanjutnya, dihitung luasan lahan yang diperlukan untuk mesin pencacah dengan perhitungan sebagai berikut:

Dimensi mesin : 8 x 2,5 m
Jarak antar mesin: 2 m
Jumlah alat : 6
Luas lahan : 6 x ((8 + 2 + 2) m x (2,5 + 2 + 2) m) = 468 m²

Mesin pencacah yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Unit mesin pencacah

Setelah pencacahan, dilakukan pemilahan komponen anorganik pada sampah untuk pengolahan sampah organik dengan *biowaste*. Pemilahan dilakukan dengan menggunakan

magnetic separator yang dapat memisahkan komponen anorganik yang mayoritas berupa logam yang menggantung di atas belt conveyor. Spesifikasi *magnetic separator* adalah sebagai berikut:

Tipe : *ferrous metal recover*
Dimensi : 1,5 x 5,4 m
Jumlah : 6 (mengikuti jumlah mesin pencacah)
Tenaga kerja : 6 x 1 orang = 6 orang

Sedangkan spesifikasi conveyor adalah sebagai berikut:

Tipe : *belt conveyor* karet
Ukuran : 1,2 x 10 m
Daya : 7,5 kW
Jumlah : 6 (mengikuti jumlah mesin pencacah)
Tenaga kerja : 6 x 1 orang = 6 orang

Selanjutnya, dihitung luasan lahan yang diperlukan untuk mesin pencacah dengan perhitungan sebagai berikut:

Dimensi : 1,2 x 10 m
Jarak antar alat : 2 m
Jumlah : 6
Luas lahan : 6 ((1,2 + 2 + 2) m x (10 + 2 + 2) m) = 436,8 m²



Gambar 4.4 Unit *magnetic separator*

Pada perencanaan pengolahan sampah tanpa biowaste, dilakukan pemilahan ulang untuk komponen biowaste dengan menggunakan *trommel*. Spesifikasi mesin *trommel* adalah sebagai berikut:

Jenis	: <i>trommel screens</i>
Kapasitas	: 200-500 ton/hari
Dimensi (p x l x t)	: 20 x 6 m
Daya	: 50-200 kw
Jumlah pekerja	: 1

Selanjutnya, dihitung luasan lahan yang diperlukan untuk mesin pencacah dengan perhitungan sebagai berikut:

Dimensi	: 20 x 6 m
Jarak antar alat	: 2 m
Jumlah	: 6 (mengikuti jumlah konveyor)
Jumlah pekerja	: 6 x 1 orang = 6 orang
Luas lahan	: 6 ((6 + 2 + 2) m x (20 + 2 + 2) m) = 1.440 m ²

Mesin *trommel* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Unit *trommel*

Sampah yang telah dicacah dan dipilah dibawa oleh konveyor yang sudah terdapat pada mesin pencacah atau pemilah menuju mesin pengering untuk melalui proses pengeringan. Spesifikasi mesin pengering adalah sebagai berikut:

Jenis : *Solid waste roller dryer machinery*
Kapasitas : 200-500 ton/hari
Dimensi (p x l x t) : 3 x 10 m
Daya : 50-200 kw

Dari spesifikasi tersebut, dapat dihitung kebutuhan mesin pencacah sebagai berikut:

Kebutuhan mesin : 2.528 ton/hari/500 ton/hari
= 5,056 \approx 6 mesin
Tenaga kerja : 6 x 2 orang = 12 orang

Dimensi : 3 x 10 m
Jarak antar alat : 2 m
Luas lahan : 6 (3 + 2 + 2) m x (10 + 2 + 2) m = 588 m²

Mesin pengering yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Unit mesin pengering

4.3.1 Gasifikasi

Secara umum pada perencanaan gasifikasi, dibutuhkan *pre-treatment* berupa *shredding* untuk mereduksi ukuran sampah yang akan masuk ke dalam reaktor. Selain itu, proses pengeringan atau *drying* juga dibutuhkan untuk mendapatkan nilai kalor yang lebih tinggi dari sampah yang sudah kering.

Tahap selanjutnya yaitu menentukan mesin dan peralatan yang dibutuhkan untuk pengolahan termal. Pada perencanaan ini, mesin yang dibutuhkan berupa *crane*, mesin pencacah, mesin pengering, dan seperangkat *gasifier* yang dilengkapi oleh *belt konveyor*, *furnace*, *boiler*, *hydraulic ash discharge*, *cyclone* untuk air dan tar, dan *air fan*, serta *generator*. Spesifikasi peralatan dan mesin pre treatment telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Spesifikasi gasifikasi adalah sebagai berikut:

Jenis	: <i>Municipal solid waste gasifier system</i>
Kapasitas	: 1.200 m ³ /jam
Tipe <i>gasifier</i>	: <i>down draft fixed bed gasifier</i>
Kadar air maksimum	: 20% berat basah
Ukuran material	: 10-100 mm
Dimensi	: 6 x 12 x 9 m
Jumlah pekerja	: 3

Dari spesifikasi tersebut, dihitung kapasitas reaktor gasifikasi dalam satuan ton dengan cara

$$\begin{aligned}\text{Kapasitas (ton)} &: \text{densitas sampah (kg/m}^3\text{)} \times \text{volume (m}^3\text{)} \\ &: 227,82 \text{ kg/m}^3 \times 1.200 \text{ m}^3 = 273,384 \text{ kg} \\ &= 273 \text{ ton}\end{aligned}$$

$$\text{Jumlah reaktor} : 2.528 \text{ ton}/273\text{ton} = 9,26 \approx 10 \text{ reaktor}$$

$$\text{Tenaga kerja} : 10 \times 3 \text{ orang} = 30 \text{ orang}$$

$$\text{Dimensi} : 6 \times 12 \text{ m}$$

$$\text{Jarak antar alat} : 5 \text{ m}$$

$$\text{Luas lahan} : 10 (6 + 5 + 5) \text{ m} \times (12 + 5 + 5) \text{ m} = 3.520 \text{ m}^2$$

Gasifier yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Unit *gasifier*

a. Gasifikasi sampah tercampur

Perencanaan gasifikasi sampah tercampur menggunakan serangkaian mesin pada perencanaan gasifikasi secara umum di sub bab sebelumnya. Data kebutuhan alat yang telah diuraikan dirangkum dalam tabel untuk menghitung total kebutuhan lahan. Perhitungan kebutuhan lahan untuk *plant* gasifikasi sampah tercampur terdapat pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Kebutuhan Lahan *Plant* Gasifikasi Sampah Tercampur

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bungker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	Mesin pengering	588	12
6.	<i>Gasifier</i>	3.520	30
	Total	5.101	51

b. Gasifikasi sampah organik dengan *biowaste*

Selain *pre treatment* pencacahan dan pengeringan, perencanaan ini juga membutuhkan *magnetic separator* untuk memisahkan komponen anorganik. Keseluruhan mesin yang dibutuhkan untuk *plant* gasifikasi sampah organik dengan *biowaste* terdapat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Kebutuhan Lahan *Plant* Gasifikasi Sampah Organik dengan *Biowaste*

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bungker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	<i>Conveyor</i>	1.440	6
6.	Mesin pengering	588	12
7.	<i>Gasifier</i>	3.520	30
	Total	6.541	57

c. Gasifikasi sampah organik tanpa *biowaste*

Selain *pre treatment* pencacahan dan pengeringan, perencanaan ini juga membutuhkan *magnetic separator* untuk memisahkan komponen anorganik dan trommel untuk pemisahan komponen *biowaste*. Keseluruhan mesin yang dibutuhkan untuk *plant* gasifikasi sampah organik dengan *biowaste* terdapat pada Tabel 4.19

Tabel 4.19 Kebutuhan Lahan *Plant* Gasifikasi Sampah Organik tanpa *Biowaste*

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bungker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	<i>Conveyor</i>	1.440	6
6.	<i>Trommel</i>	436,8	6

7.	Mesin pengering	588	12
8.	Gasifier	3.520	30
	Total	6.977	63

4.3.2 Insinerasi

Pre treatment untuk metode insinerasi disamakan dengan metode gasifikasi. Perbedaan terletak di reaktor utama yaitu insinerator. Spesifikasi insinerator adalah sebagai berikut:

Tipe : *moving grate incinerator*
 Kapasitas : 65 ton/jam = 1.560 ton/hari
 Dimensi : 15 x 4 m
 Jumlah pekerja : 3

Dari spesifikasi tersebut, dilakukan perhitungan luas lahan sebagai berikut:

Jumlah alat : $2.528 \text{ ton} / 1.560 \text{ ton} = 1,6 = 2$
 Jumlah pekerja : $2 \times 3 \text{ orang} = 6 \text{ orang}$
 Dimensi : 15,4 x 14 m
 Jarak antar alat : 5 m
 Luas lahan : $2 (15 + 5 + 5) \text{ m} \times (4 + 5 + 5) \text{ m} = 700 \text{ m}^2$

Insinerator yang digunakan pada pengolahan ini terdapat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Unit insinerator

a. Insinerasi sampah tercampur

Perencanaan insinerasi sampah tercampur menggunakan serangkaian mesin pada perencanaan insinerasi secara umum di sub bab sebelumnya. Data kebutuhan alat yang telah diuraikan dirangkum dalam tabel untuk menghitung total kebutuhan lahan. Perhitungan kebutuhan lahan untuk *plant* insinerasi sampah tercampur terdapat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Kebutuhan Lahan *Plant* Insinerasi Sampah Tercampur

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bungker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	Mesin pengering	588	12
6.	Insinerator	700	6
	Total	2.281	27

b. Insinerasi sampah organik dengan *biowaste*

Selain *pre treatment* pencacahan dan pengeringan, perencanaan ini juga membutuhkan *magnetic separator* untuk memisahkan komponen anorganik. Keseluruhan mesin yang dibutuhkan untuk *plant* insinerasi sampah organik dengan *biowaste* terdapat pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Kebutuhan Lahan *Plant* Insinerasi Sampah Organik dengan *Biowaste*

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bungker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	Conveyor	1.440	6
6.	Mesin pengering	588	12

7.	<i>Incinerator</i>	700	6
	Total	3.721	33

c. Insinerasi sampah organik tanpa *biowaste*

Selain *pre treatment* pencacahan dan pengeringan, perencanaan ini juga membutuhkan *magnetic separator* untuk memisahkan komponen anorganik dan trommel untuk pemisahan komponen *biowaste*. Keseluruhan mesin yang dibutuhkan untuk *plant* insinerasi sampah organik dengan *biowaste* terdapat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Kebutuhan Lahan *Plant* Insinerasi Sampah Organik tanpa *Biowaste*

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bunker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	<i>Conveyor</i>	1.440	6
6.	<i>Trommel</i>	437	6
7.	Mesin pengering	588	12
8.	<i>Incinerator</i>	350	6
	Total	4.158	39

4.3.3 Pirolisis

Pre treatment untuk metode pirolisis disamakan dengan metode gasifikasi dan insinerasi. Perbedaan terletak di reaktor utama yaitu reaktor pirolisis. Reaktor ini dilengkapi dengan sistem pemanas, sistem pendingin untuk mengkonversi gas dalam fasa minyak ke fasa cair, penjernihan gas buangan, penjernihan asap, dan sistem pembuangan karbon. Spesifikasi reaktor pirolisis adalah sebagai berikut:

Dimensi : 30 x 10 m
 Kapasitas : 30 ton
 Jumlah teknisi : 2 orang
 Daya : 25 kW

Dari spesifikasi tersebut, dilakukan perhitungan jumlah reaktor sebagai berikut:

Jumlah reaktor : jumlah sampah/kapasitas reaktor
: 2.528 ton/30 ton = 84,27 = 85 reaktor
Tenaga kerja : 85 x 2 orang = 170

Perhitungan luas lahan sebagai berikut:

Dimensi : 30 x 10 m
Jarak antar alat : 2 m
Luas lahan : 85 (30 +2 +2) x (10 x 2 x 2) m = 40.460 m²

Reaktor pirolisis yang digunakan adalah terdapat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Reaktor Pirolisis

a. Pirolisis sampah tercampur

Perencanaan pirolisis sampah tercampur menggunakan serangkaian mesin pada perencanaan pirolisis secara umum di sub bab sebelumnya. Data kebutuhan alat yang telah diuraikan dirangkum dalam tabel untuk menghitung total kebutuhan lahan. Perhitungan kebutuhan lahan untuk *plant* insinerasi sampah tercampur terdapat pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Kebutuhan Lahan *Plant* Pirolisis Sampah Tercampur

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bunker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	Mesin pengering	588	12
6.	Reaktor pirolisis	40.460	170
	Total	42.041	191

b. Pirolisis sampah organik dengan *biowaste*

Selain *pre treatment* pencacahan dan pengeringan, perencanaan ini juga membutuhkan *magnetic separator* untuk memisahkan komponen anorganik. Keseluruhan mesin yang dibutuhkan untuk *plant* pirolisis sampah organik dengan *biowaste* terdapat pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Kebutuhan Lahan *Plant* Pirolisis Sampah Organik dengan *Biowaste*

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bunker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
5.	Mesin pencacah	468	6
6.	<i>Conveyor</i>	1.440	6
7.	Mesin pengering	588	12
8.	<i>Incinerator</i>	40.461	170
	Total	43.481	197

c. Pirolisis sampah organik tanpa *biowaste*

Selain *pre treatment* pencacahan dan pengeringan, perencanaan ini juga membutuhkan *magnetic separator* untuk memisahkan komponen anorganik dan trommel untuk pemisahan komponen *biowaste*. Keseluruhan mesin yang

dibutuhkan untuk *plant* insinerasi sampah organik dengan biowaste terdapat pada Tabel 4.25.

Tabel 4.25 Kebutuhan Lahan *Plant* Pirolisis Sampah Organik Tanpa *Biowaste*

No.	Alat	Luas Lahan Alat (m ²)	Tenaga Kerja
1.	<i>Ramp</i>	300	2
2.	Bungker material mentah	225	0
3.	<i>Crane</i>	-	1
4.	Mesin pencacah	468	6
5.	Konveyor	1.440	6
6.	Trommel	437	6
7.	Mesin pengering	588	12
8.	<i>Incinerator</i>	350	170
	Total	43.918	203

4.3.4 Teknis Operasional

Sistem operasional insinerator harus dijaga dalam suhu operasi kritis. Apabila suhu lebih rendah, *volatile organik carbon* (VOC) tidak terurai sempurna, serta emisi gas pembangkit akan melanggar aturan standar keamanan nasional.

Bahkan, bagi insinerator yang berjalan dengan baik, gas buang insinerator masih membutuhkan perawatan dengan sistem pendinginan gas dan *scrubber* untuk menghilangkan dioksin karsinogenik berbahaya. Namun, sudah banyak incinerator di pasaran yang melengkapi tungku insinerasi dengan *scrubber* dan *exhaust gas cleaning*, seperti yang digunakan pada perencanaan ini.

Pada metode gasifikasi, proses pembakaran menggunakan udara yang lebih umum (jauh lebih murah daripada menggunakan oksigen), maka proses konversi menghasilkan energi gas sintesis yang lebih rendah daripada yang dihasilkan menggunakan gasifikasi oksigen

Pengolahan termal gasifikasi dan pirolisis, produk yang diolah menjadi listrik merupakan gas sintetik (*syngas*) Penggunaan *syngas* memiliki beberapa kendala yaitu perlunya

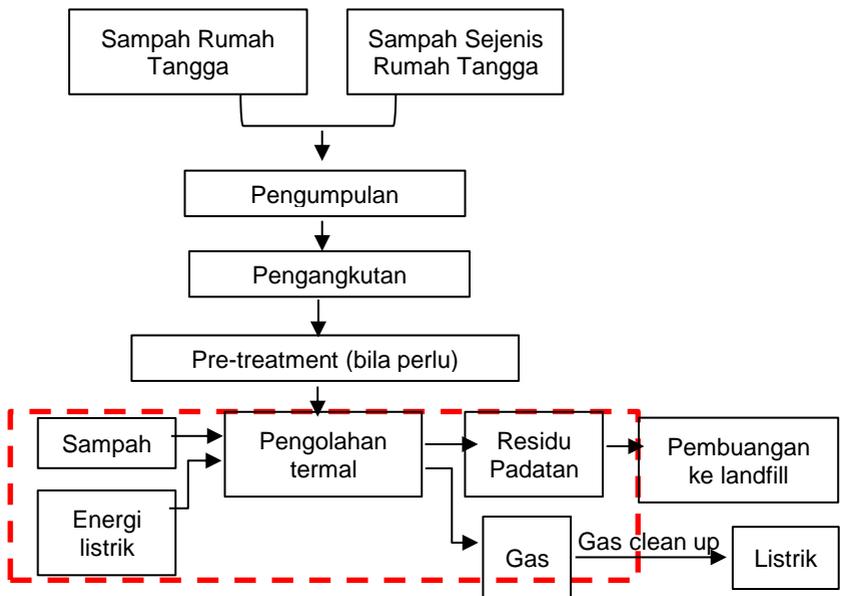
pengolahan sebelum dapat digunakan secara luas tanpa merusak peralatan produksi sehingga menimbulkan resiko tinggi (Kementrian ESDM, 2015).

Operasional pirolisis cenderung berada pada skala percontohan, dan hanya efektif diaplikasikan pada komponen sampah tertentu, seperti karet dan plastik yang harus diawali *pre-treatment* berupa pengeringan. Secara global, pirolisis diaplikasikan dengan kapasitas sampah 45-220 ton/hari (Chen et al., 2014). Maka dari itu, teknologi pirolisis kurang cocok untuk diaplikasikan di TPA Benowo yang pada tahun 2027 diperkirakan menerima timbulan sampah sebanyak 2.528 ton/hari.

4.4 Analisis Aspek Lingkungan dengan Metode LCA

4.4.1 Tujuan dan Batasan Penelitian

Tahap analisis dengan metode LCA adalah *goal and scope definition*, yaitu menentukan tujuan dan ruang lingkup. Penentuan *scope* (ruang lingkup) penelitian dijelaskan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Batasan Analisis dengan Metode LCA

4.4.2 Inventarisasi Siklus Hidup

Tahap ini merupakan inventarisasi data berupa Diagram Alir proses pengolahan termal. Data yang dibutuhkan berupa data primer dan data sekunder yang didapatkan melalui penelitian lapangan, penelitian laboratorium, mau pun studi literatur. Pada sub bab berikut ini, akan dijelaskan hasil analisis penelitian yang telah dilakukan.

Input dari pengolahan termal diisikan pada kolom "*known input from technosphere*". Pada pengolahan termal ini merupakan sampah yang dimasukkan pada kolom *material/fuels* dan energi listrik yang digunakan untuk *start up* pada kolom *electricity/heat*. Berdasarkan *input*, masing-masing pengolahan termal terbagi menjadi tiga, yaitu sampah tercampur, sampah organik dengan *biowaste*, serta sampah organik tanpa *biowaste*. Persentase komponen sampah sesuai pada

Halaman ini sengaja dikosongkan

Tabel 4.6 sedangkan jumlah sampah yang masuk didapatkan dari Tabel 4.5. Input sampah ditentukan dengan cara:

Berat sampah masuk:

Persentase per komponen x timbulan sampah tahun 2027

Contoh perhitungan:

Berat sampah sisa makanan

$38,77\% \times 922.695 \text{ ton} = 357.723 \text{ ton}$

Tabel 4.26 Hasil Perhitungan *Input* Proses

No.	Komponen	Persentase (%)	Sampah Tercampur (ton)	Sampah Organik dengan Biowaste (ton)	Sampah Organik Tanpa Biowaste (ton)
1.	Sampah dapur	38,77	357.724	357.724	-
2.	Sampah kebun	21,08	194.504	194.504	-
3.	Plastik				
	LDPE	8,98	82.841	82.841	82.841
	HDPE	1,58	14.570	14.570	14.570
	PET	0,88	8.096	8.096	8.096
	PS	0,67	6.224	6.224	6.224
	PP	0,50	4.647	4.647	4.647
	Lain - lain	0,70	6.438	6.438	6.438
4.	Kertas	2,56	23.580	23.580	23.580
5.	Karton	1,62	14.908	14.908	14.908
6.	Tekstil	3,83	35.334	35.334	35.334
7.	Kulit	0,39	3.575	3.575	3.575
8.	Karet	0,58	5.358	5.358	5.358
9.	Kayu	4,53	41.775	41.775	41.775
10.	Diapers	10,87	100.275	100.275	100.275
11.	Kaca	0,76	7.017	-	-
12.	Kaleng	0,08	706	-	-
13.	Aluminium	0,12	1.112	-	-
14.	Logam lain	0,08	760	-	-

15.	B3	0,24	2.246	-	-
16.	Lain-lain	1,19	11.004	-	-
	TOTAL	100,00	922.695	899.850	347.622

Selain material, dilakukan juga input data pada kolom *heat/electricity*. Pada kolom ini, dipilih gas alam/LNG sebagai sumber listrik. Jumlah kebutuhan listrik dihitung dengan cara mengalikan kebutuhan listrik masing-masing pengolahan termal pada Tabel 2.5 dan jumlah sampah yang masuk pada tahun 2027 (Tabel 4.5). Perhitungan adalah sebagai berikut:

Kebutuhan listrik

= kebutuhan listrik/ton x jumlah sampah tahun 2027

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:

Kebutuhan listrik insinerasi sampah tercampur

= 77,8 kWh/ton x 922.695 ton

= 71.785.671 kWh

= 72 GWh

Setelah itu, dilakukan perhitungan output yang dihasilkan dari pengolahan termal yaitu berupa emisi gas, residu padatan, listrik, serta minyak dan *char* (khusus untuk pirolisis). Seluruh *output* dijumlahkan dan menghasilkan jumlah yang lebih kecil daripada jumlah *input*. Hal ini dikarenakan terdapatnya *loses* yang tidak terukur. *Loses* didapatkan dari pengurangan total *output* dari total *input*. Perhitungan *output* pengolahan termal dilakukan dengan mengalikan emisi gas, residu, listrik, *char*, atau minyak yang dihasilkan per ton sampah pada Tabel 2.5 dan Tabel 2.6 dengan jumlah sampah yang dihasilkan pada tahun 2027 yang terdapat pada Tabel 4.5.

Emisi gas

= emisi gas/ton x jumlah sampah tahun 2027

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:

Emisi gas NO_x insinerasi sampah tercampur

= 1.050 gram/ton x 922.695 ton

= 968.829.750 gram
= 969 ton

Residu padatan
= residu padatan/ton x jumlah sampah tahun 2027

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:
Residu padatan insinerasi sampah tercampur
= 180.000 gram/ton x 922.695 ton
= 166.085.100.000 gram
= 166.085 ton

Listrik
= listrik/ton x jumlah sampah tahun 2027

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:
Listrik insinerasi sampah tercampur
= 544 kWh/ton x 922.695 ton
= 501.946.080 kWh
= 502 GWh

Char
= *char*/ton x jumlah sampah tahun 2027

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:
*Char*pirolisis sampah tercampur
= 150.000 gram/ton x 922.695 ton
= 138.404.250.000 gram
= 138.404 ton

Minyak
= minyak/ton x jumlah sampah tahun 2027

Contoh perhitungan adalah sebagai berikut:
Minyak pirolisis sampah tercampur
= 51.000 gram/ton x 922.695 ton
= 47.057.445.000 gram

= 47.057 ton

Seluruh massa *output* dijumlahkan, baik emisi gas, residu, serta *char* dan minyak lalu dibandingkan dengan *input* material. Apabila *input* lebih besar daripada *output*, maka *output* yang tidak terdeteksi dihitung sebagai *loses* dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Input} = \text{output} + \text{loses}$$

$$\text{Loses} = \text{input} - \text{output}$$

Contoh perhitungan:

Loses insinerasi sampah tercampur

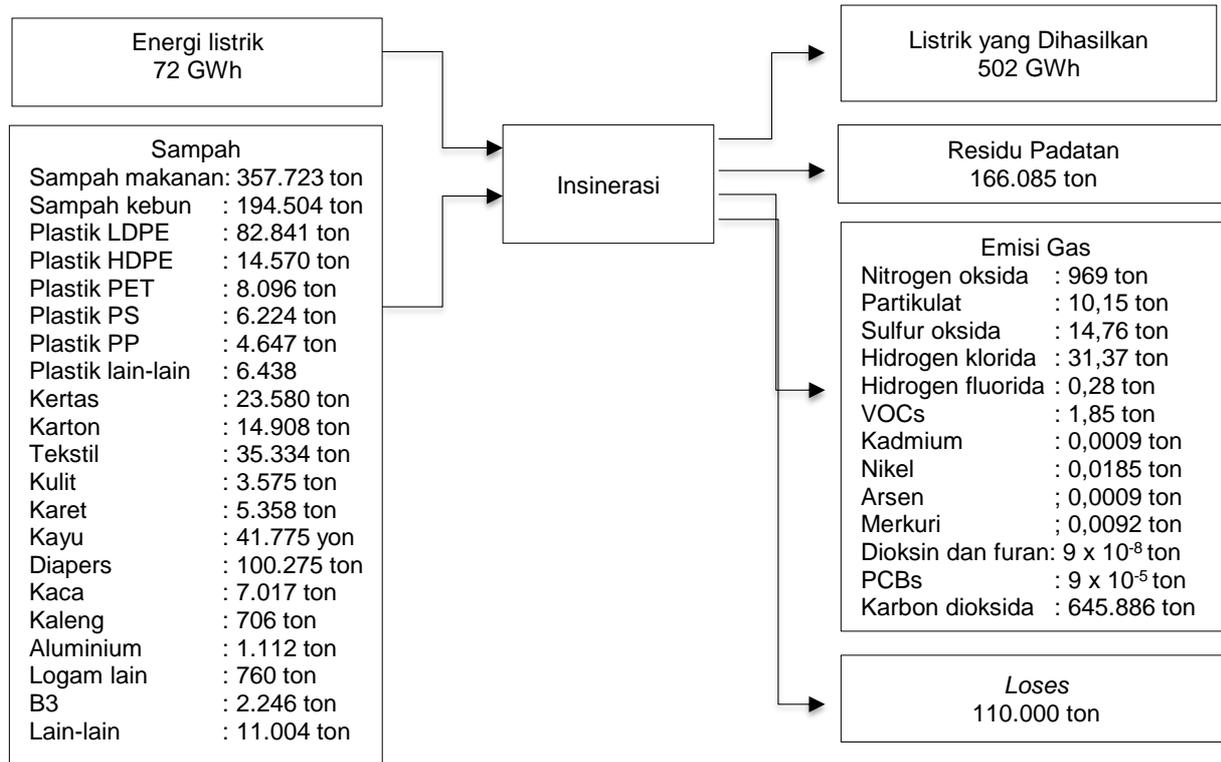
= 922.695 ton – 812.998 ton

= 110.000 ton

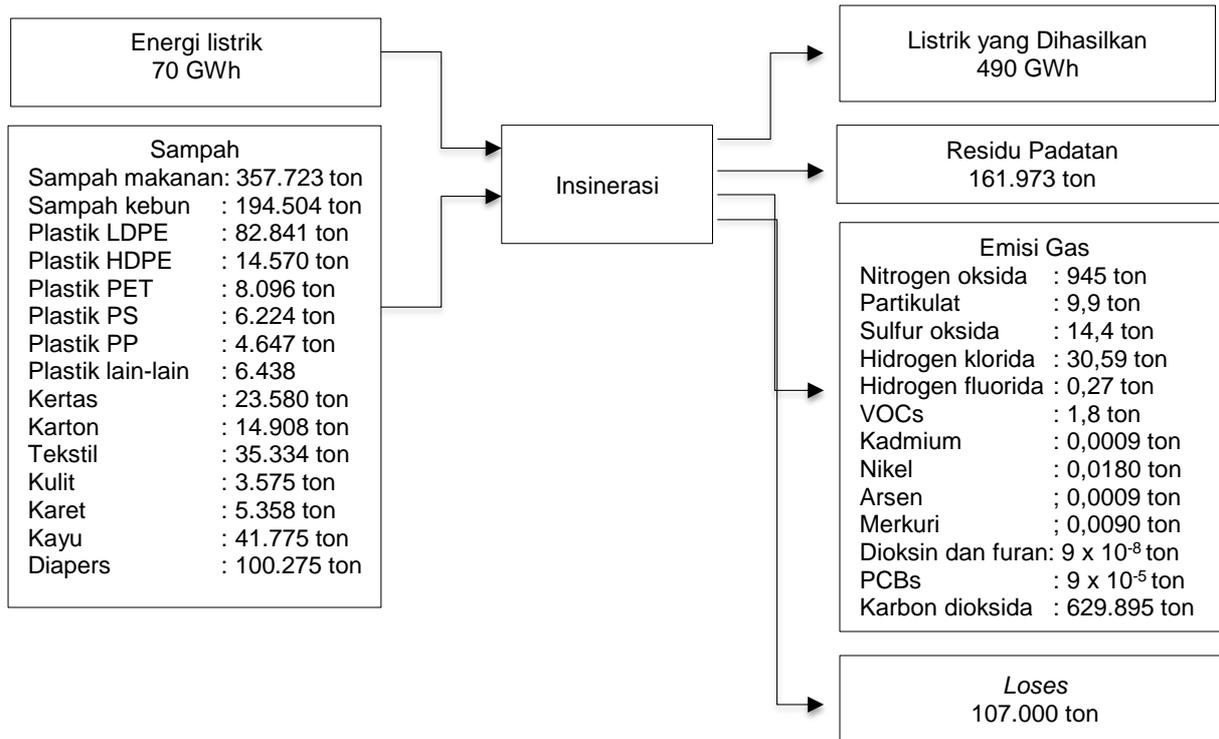
Loses ini dihitung agar neraca massa dapat seimbang, namun pada penggunaan metode LCA, *loses* tidak dimasukkan sebagai data ke dalam *software*. Hasil perhitungan output pengolahan termal dapat dilihat pada Tabel 4.29 sedangkan inventarisasi data ditampilkan dalam bentuk diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 4.11 sampai dengan Gambar 4.19

Tabel 4. 27 Hasil Perhitungan *Output* Proses

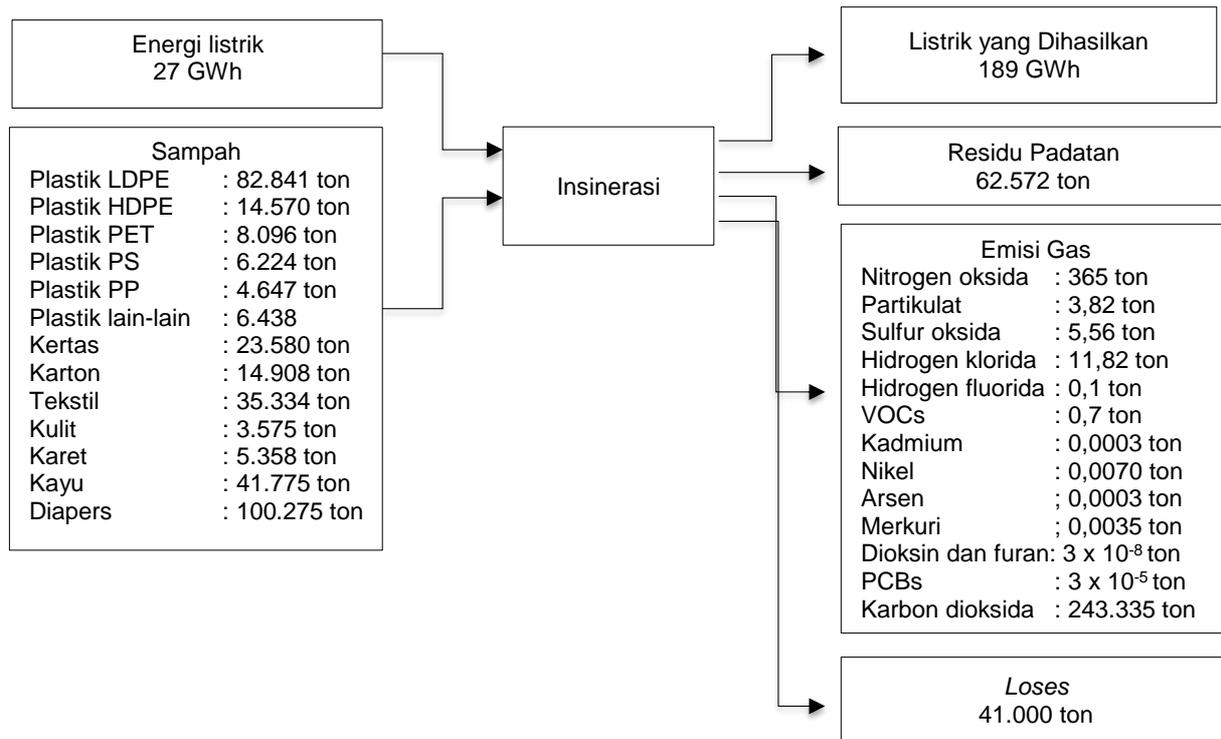
Senyawa	Gasifikasi (ton)			Insinerasi (ton)			Pirolisis (ton)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Nitrogen oksida	360	351	136	969	945	365	360	351	136
Partikulat	5,54	5,40	2,09	10,15	9,90	3,82	5,54	5,40	2,09
Sulfur dioksida	8,30	8,10	3,13	14,76	14,40	5,56	8,30	8,10	3,13
Hidrogen klorida	14,76	14,40	5,56	31,37	30,59	11,82	14,76	14,40	5,56
Hidrogen florida	0,10	0,10	0,04	0,28	0,27	0,10	0,10	0,10	0,04
VOC	2,77	2,70	1,04	1,85	1,80	0,70	2,77	2,70	1,04
Kadmium	0,0016	0,0015	0,0006	0,0009	0,0009	0,0003	0,0016	0,0015	0,0006
Nikel	0,0185	0,0180	0,0070	0,0185	0,0180	0,0070	0,0185	0,0180	0,0070
Arsen	0,0507	0,0495	0,0191	0,0009	0,0009	0,0003	0,0507	0,0495	0,0191
Merkuri	0,0157	0,0153	0,0059	0,0092	0,0090	0,0035	0,0157	0,0153	0,0059
Dioksin dan furan	4,E-09	4,E-09	1,E-09	9,E-08	9,E-08	3,E-08	4,E-09	4,E-09	1,E-09
<i>Polychlorinated biphenyls (PCBS)</i>	-	-	-	9,E-05	9,E-05	3,E-05	-	-	-
Karbon dioksida	645.886	629.895	243.335	645.886	629.895	243.335	645.886	629.895	243.335
Karbon monoksida	18	18	7	-	-	-	18	18	7
Residu padatan	110.723	107.982	41.715	166.085	161.973	62.572	-	-	-
<i>Char</i>	-	-	-	-	-	-	138.404	134.978	52.143
Minyak pirolisis	-	-	-	-	-	-	47.057	45.892	17.729
Total	757.019	738.277	285.204	812.998	792.870	306.294	831.758	811.165	313.362
<i>Loses</i>	166.000	162.000	62.000	110.000	107.000	41.000	91.000	89.000	34.000



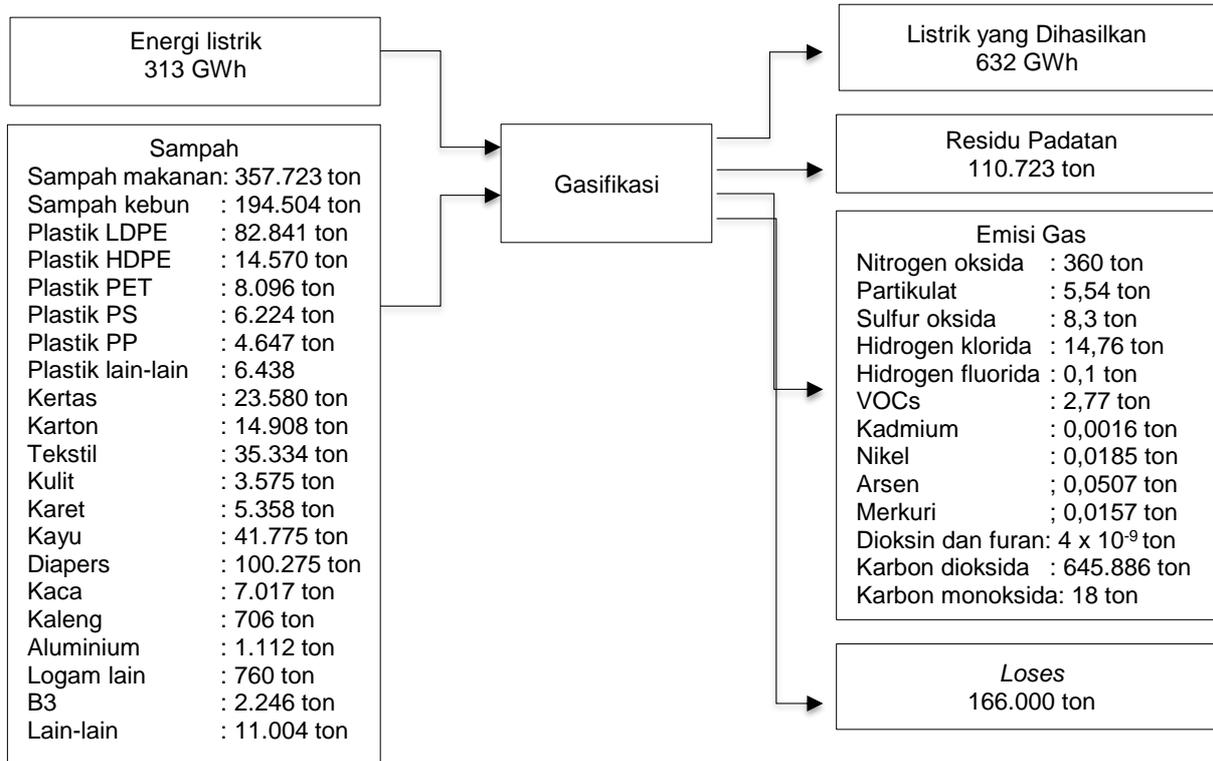
Gambar 4.11 Diagram Alir Insinerasi Sampah Tercampur Tahun 2027



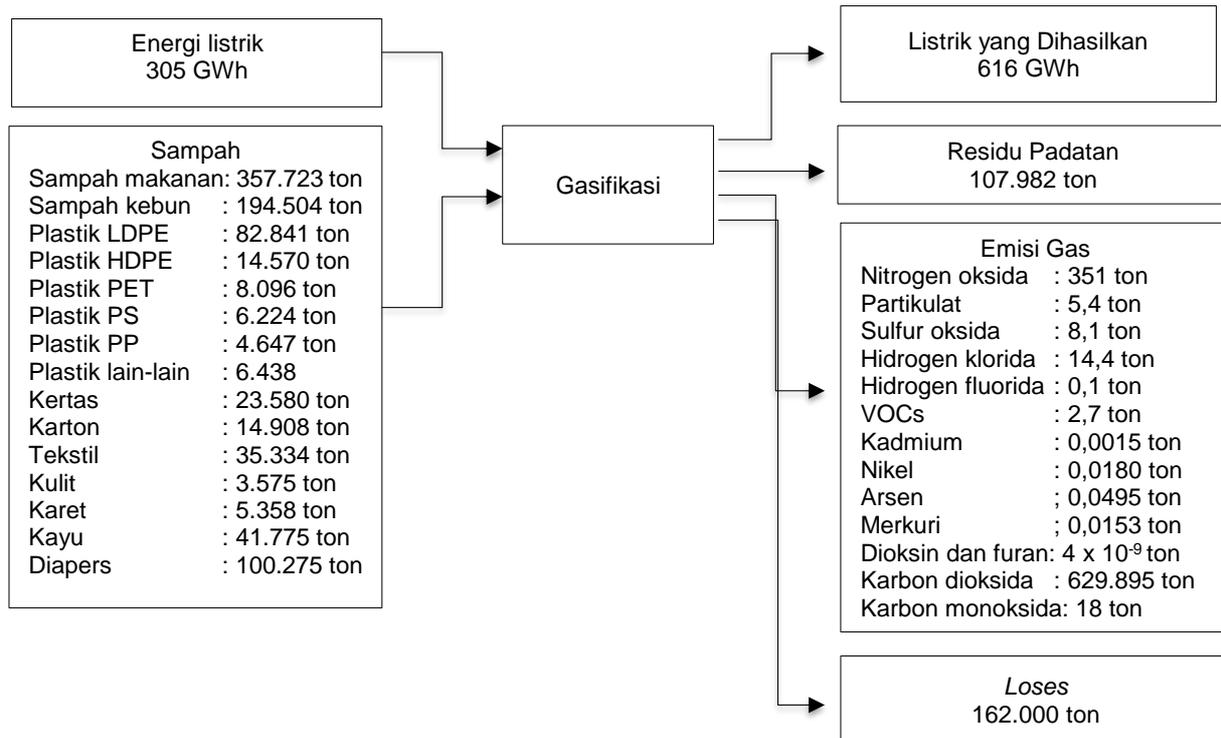
Gambar 4.12 Diagram Alir Insinerasi Sampah Organik dengan *Biowaste* Tahun 2027



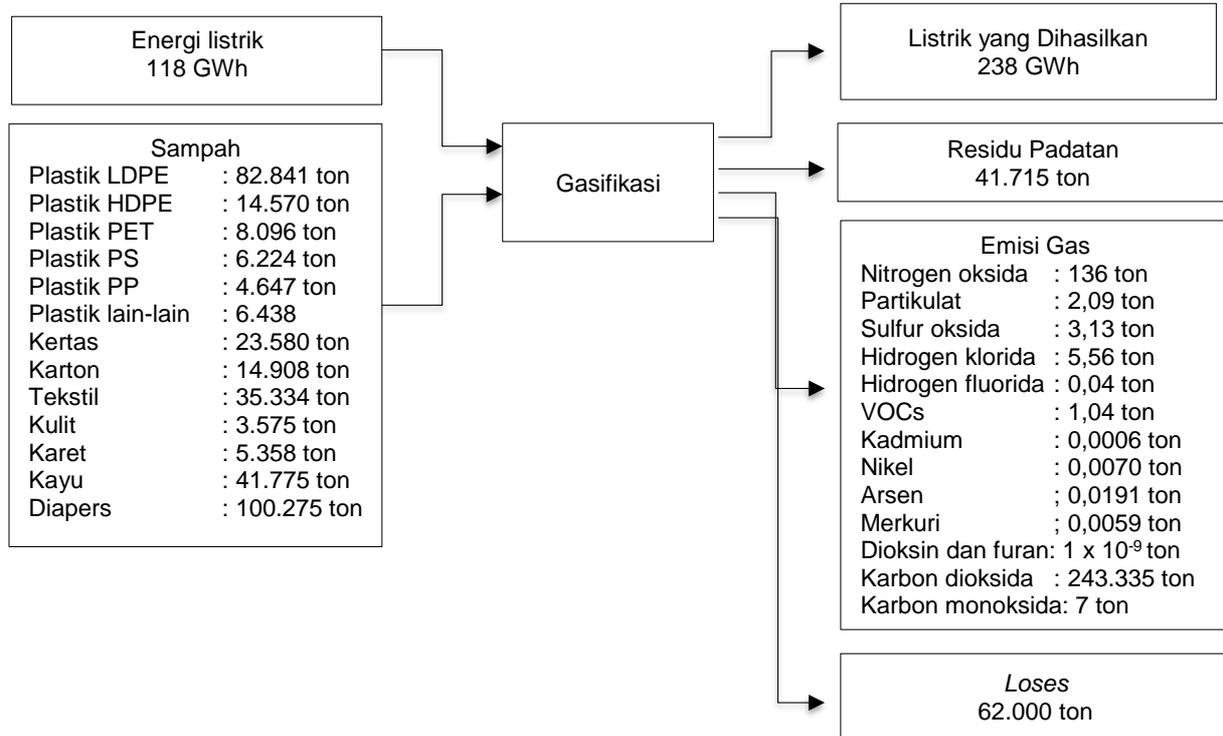
Gambar 4.13 Diagram Alir Insinerasi Sampah Organik Tanpa *Biowaste* Tahun 2027 2



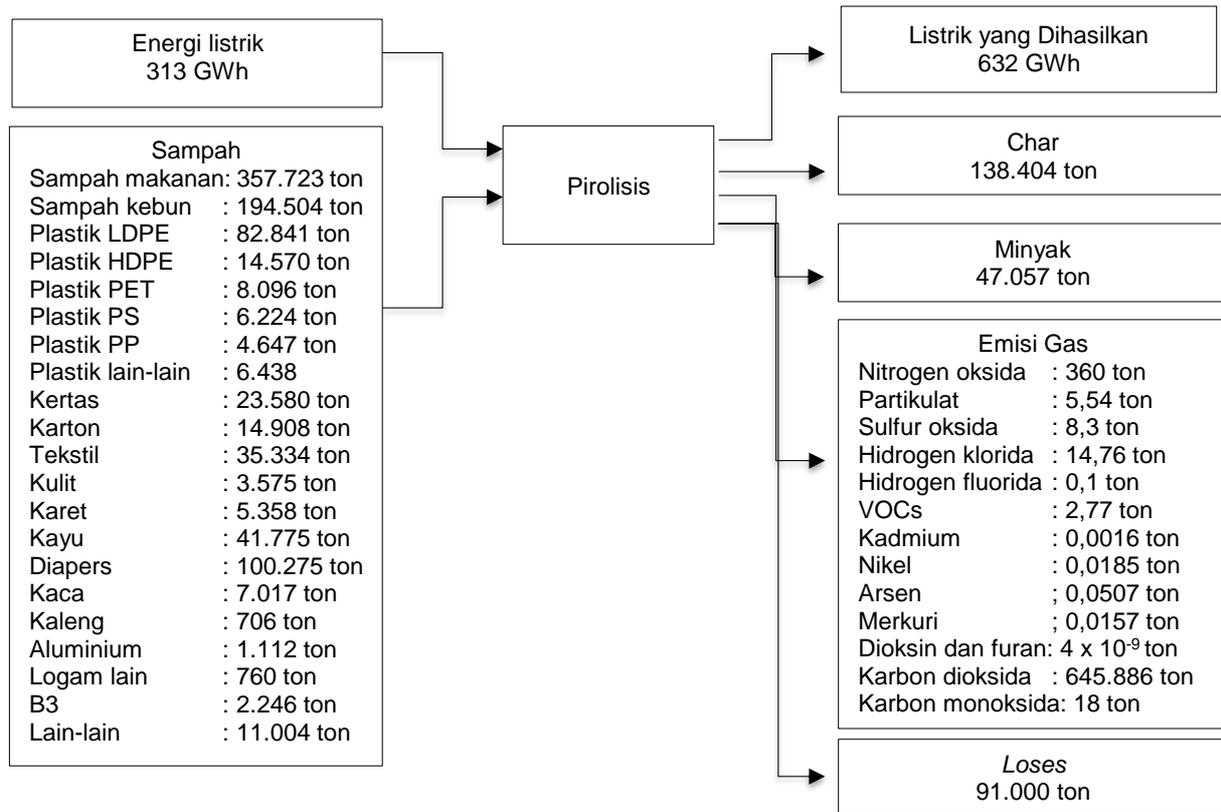
Gambar 4.14 Diagram Alir Gasifikasi Sampah Tercampur Tahun 2022



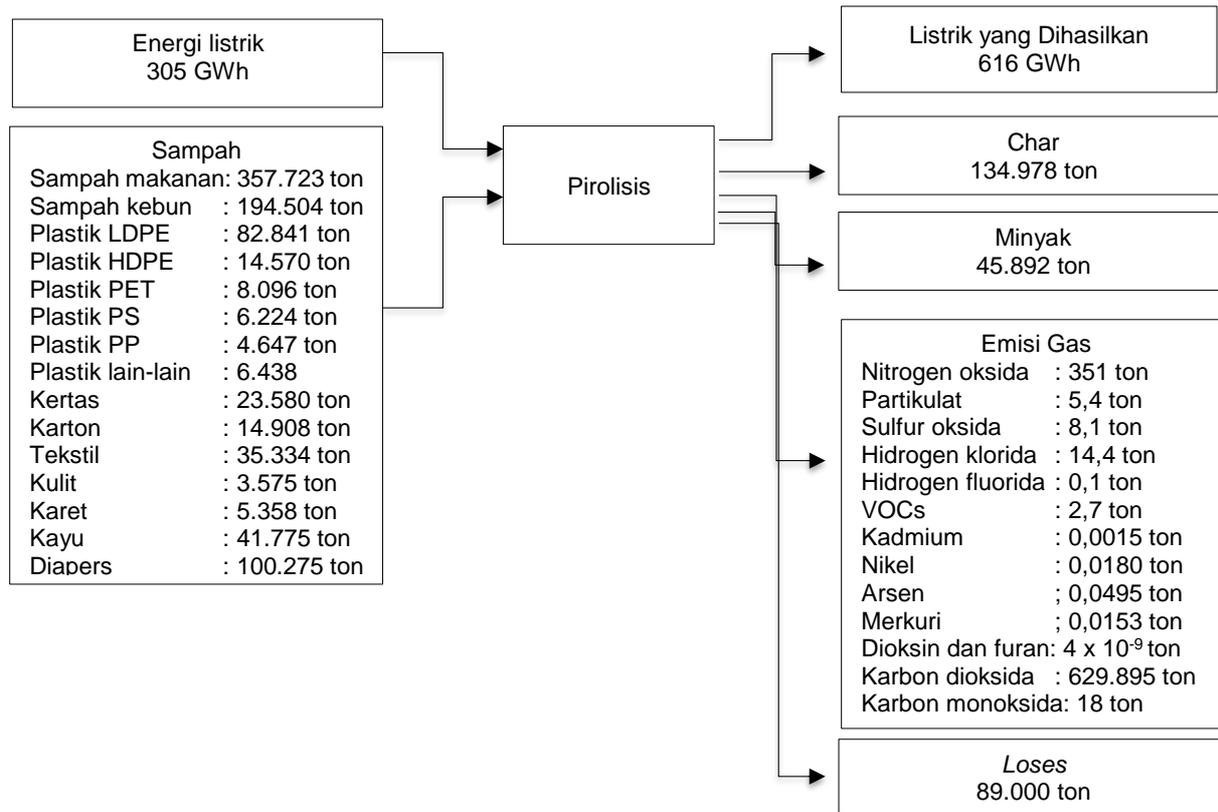
Gambar 4.15 Diagram Alir Gasifikasi Sampah Organik dengan *Biowaste* Tahun 2027



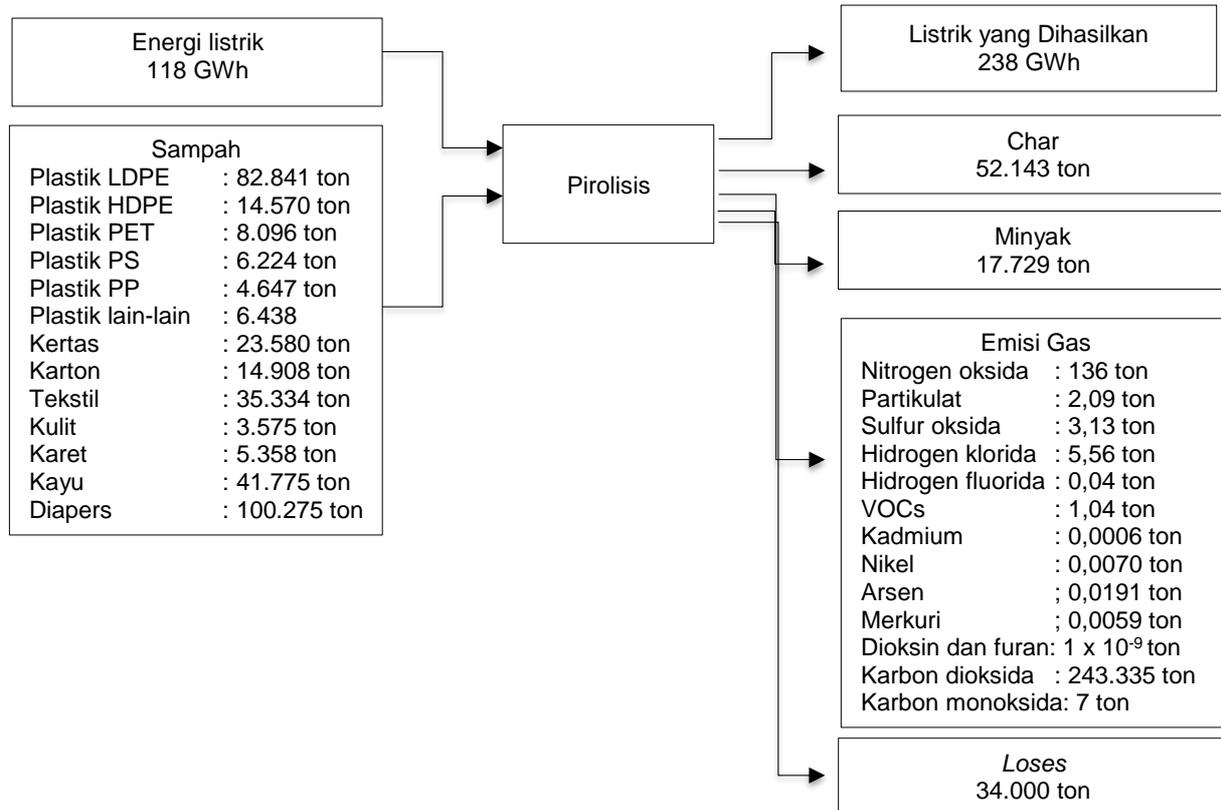
Gambar 4.16 Diagram Alir Gasifikasi Sampah Organik Tanpa *Biowaste* Tahun 2027



Gambar 4.17 Diagram Alir Pirolisis Sampah Tercampur Tahun 2027



Gambar 4.18 Diagram Alir Pirolisis Sampah Organik dengan *Biowaste* Tahun 2027



Gambar 4.19 Diagram Alir Pirolisis Sampah Organik Tanpa *Biowaste* Tahun 2027

4.4.3 Perkiraan Dampak dari Siklus Hidup

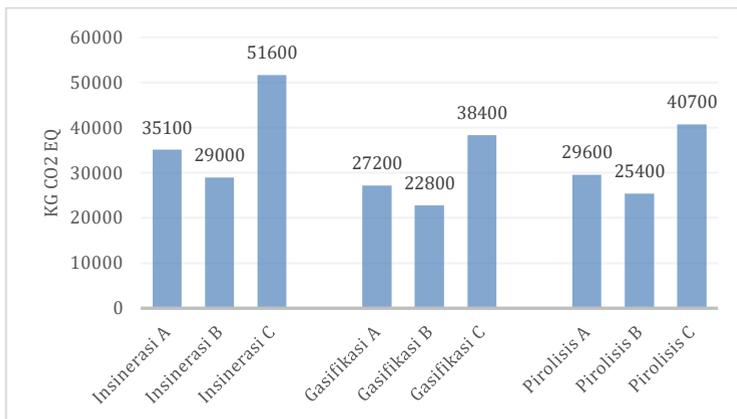
Dampak lingkungan pengolahan termal sampah dianalisis melalui software SimaPro v.8.3 Analisis terbagi berdasarkan jenis pengolahan termal (insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis) serta jenis sampah yang masuk (tercampur, organik dengan *biowaste*, dan organik tanpa *biowaste*). Terdapat lima parameter yang dihasilkan oleh metode *Environmental Product Declaration 2007* yang sudah terdapat pada *database* SimaPro.

Dampak paling besar yang dihasilkan oleh pengolahan termal adalah *global warming*. *Global warming* disebabkan oleh senyawa CO (Stafford *et al.*, 2005) dan terutama CO₂ yang merupakan emisi utama penyebab *global warming* yang paling besar (Johnke, 2000). Hasil analisis dampak *global warming* dari pengolahan termal dapat dilihat pada Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Hasil Analisis Dampak *Global Warming* Pengolahan Termal Sampah

	Insinerasi (kg CO ₂ eq)	Gasifikasi (kg CO ₂ eq)	Pirolisis (kg CO ₂ eq)
Sampah A	35.100	27.200	29.600
Sampah B	29.000	22.800	25.400
Sampah C	51.600	38.400	40.700

Dari Tabel 4.28, dapat diketahui bahwa sampah C (organik tanpa *biowaste*) menghasilkan dampak *global warming* paling tinggi. Hal ini dikarenakan oleh kandungan karbon yang lebih tinggi pada sampah organik *non biowaste* daripada *biowaste* (Tabel 4.10). Sedangkan secara keseluruhan, metode termal yang paling sedikit menghasilkan dampak *global warming* adalah gasifikasi menggunakan sampah organik dengan *biowaste*. Pada Gambar 4.20, terdapat grafik perbandingan dampak *global warming* dari pengolahan termal sampah.



Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Dampak *Global Warming* Pengolahan Termal Sampah

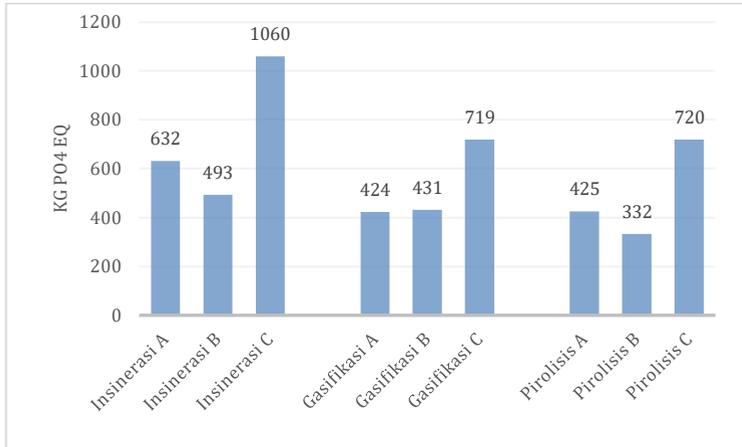
Parameter lain yang dianalisis yaitu senyawa penyebab eutrofikasi. Senyawa yang berpengaruh pada dampak eutrofikasi adalah NO_x. Hasil analisis dampak eutrofikasi disajikan dalam Tabel 4.29.

Tabel 4.29 Hasil Analisis Dampak Senyawa Penyebab Eutrofikasi dari Pengolahan Termal Sampah

	Insinerasi (kg PO ₄ eq)	Gasifikasi (kg PO ₄ eq)	Pirolisis (kg PO ₄ eq)
Sampah A	632	424	425
Sampah B	493	431	332
Sampah C	1060	719	720

Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode pirolisis dengan sampah B menghasilkan senyawa penyebab eutrofikasi paling kecil. Hal ini disebabkan karena gasifikasi dan pirolisis menghasilkan emisi gas NO_x relatif lebih kecil daripada insinerasi. Sampah B menghasilkan emisi paling sedikit karena memiliki kandungan *biowaste* dengan unsur N lebih rendah

daripada sampah plastik (Tabel 4.10). Apabila disajikan dalam grafik, data tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Dampak Senyawa Penyebab Eutrofikasi Pengolahan Termal Sampah

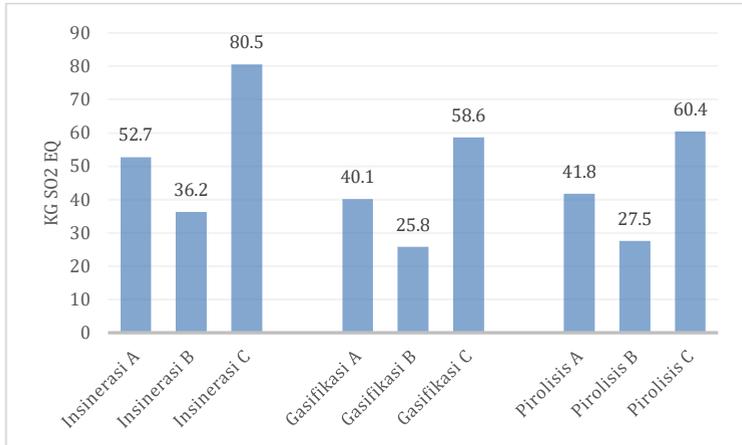
Dampak lain yang dianalisis adalah senyawa penyebab asidifikasi. Asidifikasi disebabkan oleh SO_2 , HCl , dan HF yang terdapat pada emisi gas pengolahan termal. Hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 4.30.

Tabel 4.30 Hasil Analisis Dampak Senyawa Penyebab Asidifikasi

	Insinerasi (kg SO_2 eq)	Gasifikasi (kg SO_2 eq)	Pirolisis (kg SO_2 eq)
Sampah A	52.7	40.1	41.8
Sampah B	36.2	25.8	27.5
Sampah C	80.5	58.6	60.4

Tabel 4.30 menunjukkan bahwa penghasil senyawa penyebab asidifikasi paling kecil adalah gasifikasi sampah B. Hal ini disebabkan karena emisi NO_x , SO_x , HCl , dan HF dari

gasifikasi relatif lebih kecil dari insinerasi. Data dari Tabel 4.30 kemudian disajikan dalam grafik seperti pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Dampak Senyawa Penyebab Asidifikasi Pengolahan Termal Sampah

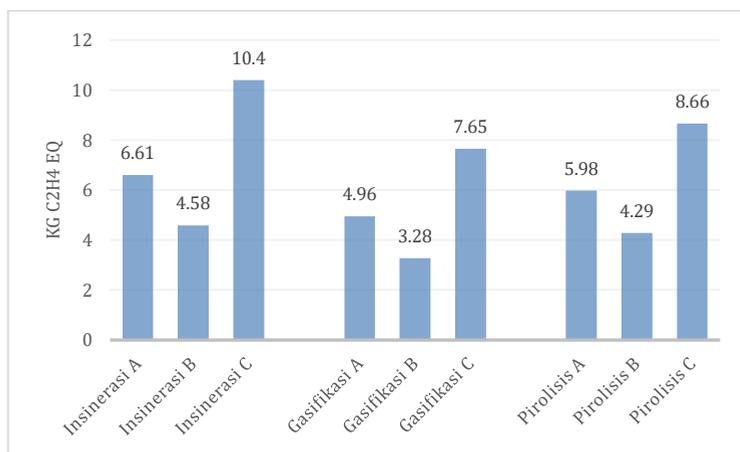
Dampak lain yang dianalisis adalah *photochemical oxidation* atau *photochemical ozone formation*. Ozon terbentuk di troposfer akibat adanya oksida nitrogen dan pengaruh sinar matahari. VOC juga dapat menjadi penyebab terbentuknya ozon karena memicu pembentukan senyawa peroksi yang radikal (NO, NO₂, NO₃, CO, CH₄, O₃, VOC, dan peroksida). Senyawa ini sangat reaktif dan beracun, dan dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi ozon melalui reaksi yang kompleks (Stranddorf *et al.*, 2005). Hasil analisis tersebut terdapat dalam Tabel 4.31.

Tabel 4.31 Hasil Analisis Dampak *Photochemical Oxidation* Pengolahan Termal Sampah

	Insinerasi (kg C ₂ H ₄ eq)	Gasifikasi (kg C ₂ H ₄ eq)	Pirolisis (kg C ₂ H ₄ eq)
Sampah A	6.61	4.96	5.98

Sampah B	4.58	3.28	4.29
Sampah C	10.4	7.65	8.66

Hasil perkiraan dampak tersebut menunjukkan bahwa gasifikasi dengan sampah B menghasilkan dampak *photochemical oxidation* yang paling kecil. Penyebab utama *photochemical oxidation* adalah NO_x, VOC, dan CO. Dari Tabel 2.6, dapat diketahui bahwa gasifikasi dan pirolisis memiliki emisi NO_x dan VOC yang lebih besar daripada insinerasi, walau pun gasifikasi dan pirolisis menghasilkan CO sedangkan insinerasi tidak, sehingga, hasil analisis dampak *photochemical oxidation* dari insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis tidak jauh berbeda. Data tersebut disajikan dengan grafik pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Dampak *Photochemical Oxidation* Pengolahan Termal Sampah

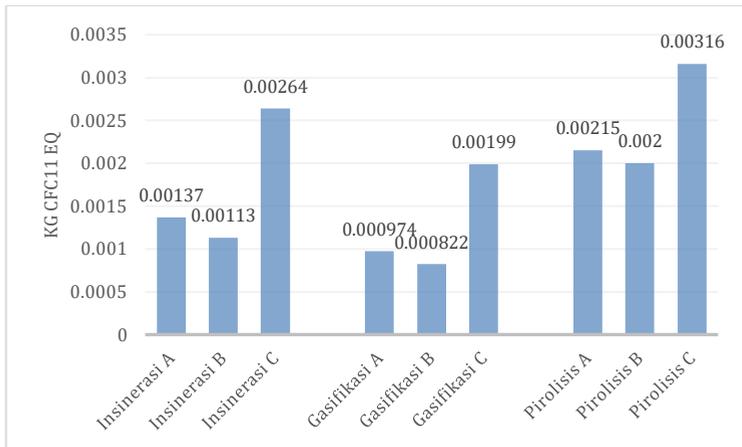
Dampak lain yang dianalisis yaitu *ozone layer depletion* (ODP). Senyawa penyebab ODP beberapa di antaranya terdapat secara alami di stratosfer, seperti klorin dan bromin, metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), serta uap air (H₂O).

Hasil analisis dampak *ozone layer depletion* disajikan pada Tabel 4.32

Tabel 4.32 Hasil Analisis Dampak *Ozone Layer Depletion* Pengolahan Termal Sampah

	Insinerasi (kg CFC 11 eq)	Gasifikasi (kg CFC 11 eq)	Pirolisis (kg CFC 11 eq)
Sampah A	0.00137	0.000974	0.00215
Sampah B	0.00113	0.000822	0.002
Sampah C	0.00264	0.00199	0.00316

Dari tabel tersebut, dapat diketahui bahwa gasifikasi dengan sampah B menghasilkan dampak *ozone layer depletion* paling kecil. Apabila data tersebut disajikan dalam grafik, hasilnya adalah pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Grafik Perbandingan Dampak *Ozone Layer Depletion* pada Pengolahan Termal Sampah

Hasil analisis LCA menunjukkan bahwa gasifikasi dengan sampah B menghasilkan emisi paling sedikit dibandingkan dengan metode termal mau pun jenis sampah

yang lain. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa metode gasifikasi dengan jenis sampah B merupakan metode yang paling baik berdasarkan dampak lingkungan yang dihasilkan

4.4.4 Interpretasi Data

Interpretasi bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi analisis dampak lingkungan dari pengolahan termal di TPA Benowo. Interpretasi dilakukan berdasarkan hasil analisis *software* SimaPro.

Dari ketiga jenis pengolahan termal, dapat disimpulkan bahwa gasifikasi merupakan metode terbaik dengan emisi yang paling kecil di segala parameter. Jenis sampah yang menghasilkan emisi paling kecil merupakan sampah organik dengan *biowaste*. Karena terdapat beberapa komponen sampah yang harus disisihkan (sampah anorganik), maka sebaiknya pengolahan termal sampah didukung oleh fasilitas penunjang seperti *belt konveyor* untuk pemilahan.

Dampak lingkungan dari gasifikasi sampah organik dengan *biowaste* adalah 22.840 kg CO₂ eq GRK, $8,22 \times 10^{-4}$ kg CFC-11 eq *Ozone Layer Depletion*, 3,28 kg C₂H₄ eq *photochemical oxidation*, 25,8 kg SO₂ eq zat penyebab asidifikasi, serta 331 kg PO₄ eq zat penyebab eutrofikasi. Selain itu, emisi udara yang dihasilkan oleh proses gasifikasi lebih kecil daripada emisi dari proses insinerasi, walau pun kebutuhan listrik reaktor gasifikasi lebih besar daripada insinerasi. Gasifikasi juga tidak memproduksi *char* dan minyak seperti pirolisis, yang merupakan limbah yang memerlukan pengolahan selanjutnya limbah B3.

4.5 Rekomendasi Proses Pengolahan Secara Termal

Dari aspek teknis, dapat dilihat pada sub bab 4.4, bahwa jika dibandingkan, reaktor gasifikasi terutama pirolisis memiliki ukuran yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan reaktor insinerasi. Ukuran reaktor yang lebih kecil membuat jumlah reaktor menjadi semakin banyak untuk mengolah sampah dengan kapasitas yang sama. Sehingga, jumlah pekerja dan luas lahan yang diperlukan juga menjadi lebih besar. Selain itu, berdasarkan perbedaan input sampah yang masuk, sampah

tercampur memiliki luas lahan dan jumlah pekerja yang lebih sedikit daripada jenis sampah lainnya sehingga lebih menguntungkan dari segi teknis. Maka dari itu, direkomendasikan pengolahan termal metode insinerasi dengan input sampah tercampur. Perbandingan pengolahan termal dari segi teknis terdapat pada Tabel 4.33.

Tabel 4.33 Perbandingan Pengolahan Termal dari Segi Teknis

Pengolahan	Lahan (m ²)	Jumlah Reaktor	Jumlah Pekerja (orang)	Teknis Operasional
Insinerasi A	2.281	2	37	Risiko kerusakan komponen lebih rendah karena tidak memproduksi <i>syngas</i> Perlu adanya pengelolaan emisi udara
Insinerasi B	3.721	2	33	
Insinerasi C	4.158	2	39	
Gasifikasi A	5.101	10	51	Risiko kegagalan kerusakan komponen lebih tinggi akibat <i>syngas</i> <i>Syngas</i> perlu diolah
Gasifikasi B	6.541	10	57	
Gasifikasi C	6.977	10	63	
Pirolisis A	42.041	85	191	Risiko kegagalan kerusakan komponen lebih tinggi akibat <i>syngas</i> <i>Syngas</i> perlu diolah
Pirolisis B	43.481	85	197	
Pirolisis C	43.918	85	203	

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan sementara dari penelitian ini adalah:

- a. Berdasarkan aspek teknis insinerasi sampah tercampur merupakan metode yang paling menguntungkan karena hanya membutuhkan dua reaktor, 37 pekerja, dan 2.281 m² lahan. Secara operasional, metode insinerasi juga lebih minim resiko terhadap kerusakan alat dibandingkan dengan gasifikasi dan pirolisis yang memproduksi *syngas*.
- b. Hasil dari LCA, menunjukkan bahwa gasifikasi metode terbaik dengan emisi yang paling kecil. Selain itu, jenis sampah yang menghasilkan emisi paling kecil merupakan sampah organik dengan *biowaste*. Dampak lingkungan dari gasifikasi sampah organik dengan *biowaste* adalah 22.840 kg CO₂ eq GRK, 8,22 x 10⁻⁴ kg CFC-11 eq *Ozone Layer Depletion*, 3,28 kg C₂H₄ eq *photochemical oxidation*, 25,8 kg SO₂ eq zat penyebab asidifikasi, serta 331 kg PO₄ eq zat penyebab eutrofikasi.

5.2 Saran

Saran-saran yang dapat diberikan dari penelitian ini untuk penelitian yang selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Dilakukannya kajian mengenai fasilitas penunjang dari pengolahan termal yaitu *pre treatment*
2. Dilakukannya kajian mengenai fasilitas lanjutan berupa sarana *waste to energy* dengan perhitungan listrik yang dihasilkan.

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Arena, U. 2012. "Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification: A Review". *Waste Management*, 61-88.
- Badan Lingkungan Hidup Kota Surabaya. 2012. "Laporan Status Lingkungan Hidup Kota Surabaya 2012". Surabaya
- Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. 2016. "Kota Surabaya Dalam Angka tahun 2016".
- Badan Standar Nasional. 1994. "SNI 19-3964-1994 Metoda Pengambilan dan Pengukuran Contoh Timbulan Sampah Perkotaan".
- Banar, M., Z. Cokaygil, dan A. Ozkan. 2009. "Life Cycle Assessment of Solid Waste Management Options for Eskisehir, Turkey". **Waste Management** 29, 54-62.
- Bartley, D.A., Vigil, S.A, dan Tchobanoglous, G. 1980. "Use of Source Separated Waste Paper as a Refuse Derived Fuel". **Biotechnology and Bioengineering Symposium**. 10:67-79.
- Begum, Sharmina, Rasul, Muhammad G., Akbar, D., dan Ramzan, N., 2013. "Performance Analysis of an Intergrated Fixed Bed Gasifier Model for Different Biomass Feedstocks". **Energies** 6:6508-6524.
- Black, J.W., K. G. Bircher, dan K. A. Chisholm. 1980. "Fluidized-Bed Gasification of Solid Waste and Biomass: The CIL Program". Dalam J.L Jones dan S.B Radding, ed. *Thermal Conversion of Solid Waste and Biomass (ACS Symposium Series 130)*. Washington DC: American Chemical Society.
- Chen, Dexhen, Yin, L., Wang, H., dan He, P., 2014. Pyrolysis Technologies for Municipal Solid Waste: A Review. **Waste Management** 34 (2014) 2466–2486
- Cherubini, Franscesco, Bargigli, S, dan Ulgiati, S. 2009. "Life Cycle Assessment (LCA) of Waste Management Strategies: Landfilling, Sorting Plant, and Incineration". *Energy*, 34:2116-2123.
- Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Surabaya. 2016.

- Enviros Consulting Ltd, U University of Birmingham with Risk and Policy Analysts Ltd, Open University and Maggie Thurgood. 2004. Review of Environmental and Health Effects of Waste Management: Municipal Solid Waste and Similar Wastes. Department for Environment, Food and Rural Affairs
- DEFRA. 2013. "Incineration of Municipal Solid Waste". <URL: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/221036/pb13889-incineration-municipal-waste.pdf>
- Eriksson, O., Reich, M.C., Frostell, B., Bjorklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J.O., Granath, J., Baky, A., dan Thyseius, L. 2005. "Municipal Solid Waste Management from A Systems Perspective". **Journal of Cleaner Production**, 13:241-252.
- Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., dan Moberg, A. 2000. "Life Cycle Assessments of Energy from Solid Waste". **Stockholms University**, Sweden.
- Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., dan Moberg, A. 2000. "Life Cycle Assessments of Energy from Solid Waste-Part 1: General Methodology and Results". **Journal of Cleaner Production** 13(3), 213-229
- Gidaracos, E., Havas, G., dan Ntzamilis, P. 2005. "Municipal Solid Waste Composition Determination Supporting the Integrated Solid Waste Management System in The Island of Crete". *Waste Management*, 668-79.
- Gunamantha, M., C. Fandeli, S.D. Tandjung, dan Sarto. 2010. "Life Cycle Assessment Pilihan Pengelolaan Sampah: Studi Kasus Wilayah Kartamantul Provinsi D.I Yogyakarta". **Manusia dan Lingkungan** 17, 78-88.
- Gunamantha, I Made. 2011. Memprediksi Higher Heating Value Komponen Biogenik Sampah dari Data Analisis Ultimatnya. **Jurnal Penelitian dan Pengembangan Sains & Humaniora** 5(3), 158-172.
- Grzesik, Katarzyna dan K., Guca. 2011. "Screening Study of Life Cycle Assessment (LCA) of The Electric Kettle with SimaPro Software". **Geomatics and Environmental Engineering Journal** 5, 3:57-68.

- Inès, H.H. dan B.A., Faouzi. 2015. "AHP Multicriteria Decision Making for Ranking Life Cycle Assessment Software". **6th International Renewable Energy Congress (IREC)**.
- ISO, 2006. "Environmental management – life cycle assessment: principles and framework (ISO 14040:2006)". Brussels: European Committee for Standardisation.
- Kalinci, Y., Hepbasli, A., dan Dincer, I. 2012. "Life Cycle Assessment of Hydrogen Production from Biomass Gasification Systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, 14026-14039.
- Kementrian ESDM. 2015. Buku Panduan: Sampah Menjadi Energi
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2005. Pendidikan Lingkungan Bagi Pendidik Usia Dini: Pengelolaan Sampah. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Khasreen, M.M., Banfill, P.F.G., dan Menzies, G.F. 2009. "Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review". **Sustainability**, 1:674-701.
- Kopeliovich, Dmitri. 2013. "Combustion, Pyrolysis, and Gasification of Scrap Tires". <URL: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=combustion_pyrolysis_and_gasification_of_scrap_tires>.
- Kulczyka, Joanna, Lelek, L., Lewandowska, A., dan Zarebska, J. 2015. "Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management – Comparison of Results Using Different LCA Models". **Pol. J. Environ. Stud** 24, 1:125-140.
- Majumder, A.K, Jain, R, Banerjee, P., dan Barnwal, J.P. 2008. "Development of A New Proximate Analysis Based Correlation to Predict Calorific Value of Coal". **Fuel**. 87:3077-3081.
- Martinez-Blanco, J., Colon, J. Gabarrell, X., Font, X., Sanchez, A., Artola, A., dan Rieradevall, J. 2010. "The Use of Life Cycle Assessment for the Comparison of Biowaste Composting at Home and Full Scale". **Waste Management** 30(6), 983

- Moustakas, Konstantinos dan Loizidou, Maria. 2010. "Solid Waste Management through the Application of Thermal Methods". Diedit oleh Er Sunil Kumar. Waste Management. Rijeka: InTech.
- Omari, Arthur Mngoma. 2015. "Characterization of Municipal Solid Waste for Energy Recovery: A Case Study of Arusha, Tanzania". **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technolog (JMEST)** 2, 1:230-237.
- Omari, A.M., John, G.R., Njau, K.N, dan Mtui, P.L. 2015. "Operating Conditions of a Locally Made Fixed-Bed Incinerator, a Case Study of Bagamoyo, Tanzania". **International Journal of Environmental Monitoring and Analysis** 3, 2:80-90.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Rumah Tangga.
- Psomopoulos, C.S., Bourka, A., dan Themelis, N.J. 2009. "Waste-to-energy: A Review of the Status and Benefits in USA". **International Journal of Integrated Waste Management, Science, and Technology** 29, 5:1718-1724.
- Rebitzer, G, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.P Schmidt, S. Suh, B.P Weidema, dan D.W Pennington. 2004. "Life Cycle Assessment Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications". **Environmental International** 30, 5:701-720.
- Ruijg, Jens M. 2012. "Promising Pyrolysis: Waste Back to Oil". <URL: <http://designforgood.eu/2012/02/01/promising-pyrolysis-from-waste-back-to-oil/>>.
- Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelmar, O., Mostbauer, P., Lechner, P. (2003). "Management of Municipal Solid Waste Incineration Residues". **Waste Management**.
- Badan Lingkungan Hidup Kota Surabaya. 2012. Laporan Status Lingkungan Hidup Kota Surabaya. Surabaya: BLH Kota Surabaya.

- Tchobanoglous, G., Theisen, H., dan Vigil, S. 1993. "*Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*". New York: McGraw-Hill Inc.
- Trulli, Ettore, Toretta, Vincenzo, Raboni, Massimo, dan Masi, Salvatore. 2013. "Incineration of Pre-Treated Municipal Solid Waste (MSW) for Energy Co-Generation in a Non-Densely Populated Area", **Sustainability**. 5:5333-5346.
- Undang-undang No. 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah.
- UNEP. 2002. "Technical Guidelines on Specially Engineered Landfill (D5)". **Basel Convention**. Geneva.
- Van Haaren, R., N. Themelis, dan Barlaz. 2010. "LCA Comparison of Windrow Composting of Yard Waste with Use as Alternative Daily Cover (ADC)". **Waste Management** 20, 2649-2656.
- World Bank. 1999. "World Bank Technical Guidance Report; Municipal Solid Waste Incineration". Washington D.C.
- Zaman, A.U. 2010. "Comparative Study of Municipal Solid Waste Treatment Technologies Using Life Cycle Assessment Method". **International Journal Environmental Science Technology** 7, 2:225-234.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS KOMPOSISI DAN DENSITAS SAMPAH

Prosedur analisis komposisi dan densitas sampah:

1. Kumpulkan dan timbang sampah segar yang baru saja dikeluarkan dari truk yang baru saja *unloading* sebanyak 91-136 kg
2. Masukkan sampah ke dalam kotak densitas 500 liter
3. Hentakkan kotak densitas sebanyak tiga kali
4. Hitung dan catat tinggi sampah di dalam kotak
5. Pilah sampah berdasarkan kategori komponen yang telah ditetapkan
6. Timbang dan catat masing-masing komponen sampah.
7. Masukkan satu komponen sampah ke dalam kotak densitas 40 liter dan hentakan tiga kali setinggi 20 cm
8. Ukur tinggi sampah pada kotak densitas
9. Lakukan penimbangan dan pengukuran densitas secara bergantian

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B PROSEDUR ANALISIS PROKSIMAT SAMPAH

- Kadar air
Prosedur
 1. Masukkan cawan kosong ke dalam oven pada suhu 105° C selama 1 jam
 2. Dinginkan cawan dalam desikator selama 15 menit
 3. Timbang cawan yang sudah dingin
 4. Masukkan sejumlah sampel secukupnya
 5. Timbang cawan dan sampah
 6. Panaskan cawan dan sampah ke dalam oven dengan suhu 105° C selama 24 jam
 7. Keluarkan cawan dan sampah dari oven lalu dinginkan di desikator selama 15 menit.
 8. Timbang cawan dan sampah yang sudah dingin

Perhitungan

$$\text{Berat kering (\%)} = \frac{c - a}{b - a} \times 100\%$$
$$\text{Kadar air (\%)} = 100\% - \text{berat kering}$$

Dimana :

a= berat cawan kosong (g)

b= berat cawan dan sampel sampah sebelum dikeringkan (g)

c= berat cawan dan sampel sampah setelah dikeringkan (g)

- *Volatile solid* dan kadar abu
Prosedur
 1. Masukkan cawan dan sampel hasil analisis kadar air ke dalam *furnace* pada suhu 550° C selama 1 jam
 2. Masukkan cawan ke dalam oven pada suhu 105° C selama 1 jam
 3. Dinginkan cawan dalam desikator selama 15 menit
 4. Timbang cawan yang sudah dingin

Perhitungan

$$\text{Volatile solid (\%)} = \frac{(b - a) - (c - a)}{\frac{b - a}{c - a}} \times 100\%$$
$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{c - a}{b - a} \times 100\%$$

Dimana :

a= berat cawan kosong (g)

b= berat cawan dan sampel sampah sebelum diabukan (g)

c= berat cawan dan sampel sampah setelah diabukan (g)

- *Fixed carbon*

Perhitungan

$$\text{Fixed carbon (\%)} = 100\% - (\text{kadar air} + \text{VS} + \text{abu})$$

LAMPIRAN C HASIL PERHITUNGAN NILAI KORELASI

Nilai korelasi

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{n(\sum Y^2) - (\sum XY)^2} \sqrt{N(\sum X^2) - (\sum X)^2}}$$

Metode Aritmatik

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa)	X	Y	X.Y	X ²	Y ²
2005	2.740.490	1	-	-	1	-
2006	2.784.196	2	43.706	87.412	4	1.910.214.436
2007	2.829.552	3	45.356	136.068	9	2.057.166.736
2008	2.902.507	4	72.955	291.820	16	5.322.432.025
2009	2.938.225	5	35.718	178.590	25	1.275.775.524
2010	2.929.528	6	-8.697	-52.182	36	75.637.809
2011	3.024.321	7	94.793	663.551	49	8.985.712.849
2012	3.125.576	8	101.255	810.040	64	10.252.575.025
2013	3.200.454	9	74.878	673.902	81	5.606.714.884
2014	2.853.661	10	-346.793	-3.467.930	100	120.265.384.849
2015	2.943.528	11	89.867	988.537	121	8.076.077.689
2016	3.016.653	12	73.125	877.500	144	5.347.265.625
Jumlah		78	276163	1187308	650	169174957451

$$r = \frac{(12 \times 1.187.308) - (78 \times 276.163)}{\sqrt{(12 \times 169.174.957.451) - (276.163^2) \times (12 \times 650) - (78^2)}} = -0,126$$

Metode Geometrik

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)	X	Y	X.Y	X ²	Y ²
2005	2.740.490	1	14,824	14,82	1	219,74
2006	2.784.196	2	14,839	29,68	4	220,21
2007	2.829.552	3	14,856	44,57	9	220,69

2008	2.902.507	4	14,881	59,52	16	221,45
2009	2.938.225	5	14,893	74,47	25	221,81
2010	2.929.528	6	14,890	89,34	36	221,72
2011	3.024.321	7	14,922	104,46	49	222,67
2012	3.125.576	8	14,955	119,64	64	223,66
2013	3.200.454	9	14,979	134,81	81	224,36
2014	2.853.661	10	14,864	148,64	100	220,94
2015	2.943.528	11	14,895	163,85	121	221,86
2016	3.016.653	12	14,920	179,04	144	222,60
Jumlah		78	178,719	1162,83	650	2661,72

$$r = \frac{(12 \times 1.162,83) - (78 \times 178,719)}{\sqrt{(12 \times 2.661,72) - (1.162,83^2) \times (12 \times 650) - (78^2)}}$$

$$r = 0,642$$

Metode Least Square

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa)	X	Y	X.Y	X ²	Y ²
2005	2.740.490	1	2.740.490	2.740.490	1	7.510.285.440.100
2006	2.784.196	2	2.784.196	5.568.392	4	7.751.747.366.416
2007	2.829.552	3	2.829.552	8.488.656	9	8.006.364.520.704
2008	2.902.507	4	2.902.507	11.610.028	16	8.424.546.885.049
2009	2.938.225	5	2.938.225	14.691.125	25	8.633.166.150.625
2010	2.929.528	6	2.929.528	17.577.168	36	8.582.134.302.784
2011	3.024.321	7	3.024.321	21.170.247	49	9.146.517.511.041
2012	3.125.576	8	3.125.576	25.004.608	64	9.769.225.331.776
2013	3.200.454	9	3.200.454	28.804.086	81	10.242.905.806.116
2014	2.853.661	10	2.853.661	28.536.610	100	8.143.381.102.921
2015	2.943.528	11	2.943.528	32.378.808	121	8.664.357.086.784
2016	3.016.653	12	3.016.653	36.199.836	144	9.100.195.322.409
Jumlah		78	35.288.691	232.770.054	650	103.974.826.826.725

$$r = \frac{(12 \times 232.770.054) - (78 \times 35.288.691)}{\sqrt{(12 \times 103.974.826.826.725) - (232.770.054^2) \times (12 \times 650) - (78^2)}}$$

$$= 0,636$$

LAMPIRAN E DOKUMENTASI KEGIATAN ANALISIS



Pengumpulan sampah
untuk pemilahan



Kegiatan pemilahan



Pengukuran densitas



Zona *dumping* truk



Analisis kadar air



Analisis kadar abu dan
volatile solid



Analisis kadar abu dan
volatile solid



Analisis kadar abu dan
volatile solid

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Bandung pada tanggal 3 Juli 1995 dan dibesarkan di Kota Bogor. Penulis mengenyam pendidikan di SD Negeri Polisi 4, SMP Negeri 1, dan SMA Negeri 1 Bogor.

Penulis diterima di Departemen Teknik Lingkungan ITS pada tahun 2013 melewati jalur SBMPTN. Selama masa perkuliahan, penulis aktif di berbagai kegiatan akademis dan non akademis. Penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Mata Kuliah Kimia

Lingkungan 1 dan Mikrobiologi Lingkungan. Penulis melaksanakan kerja praktek di Process Department PT. Newmont Nusa Tenggara dengan judul Studi Pengelolaan Limbah Tailing PT. NNT.

Disamping kegiatan sebagai mahasiswa, penulis juga mendalami profesi sebagai *Public Relations* (PR) dan *public speaker* melalui perannya di berbagai *event*. Beberapa diantaranya adalah sebagai moderator *Press Conference* Environmentation 2017 bersama Prof. Ir. Rachmat Witoelar, juri dan pemateri *public speaking* Young Chemist 2016, dan MC Seminar Nasional Cerdas Bersama Statistika 2015. Penulis juga pernah menjadi pemateri di berbagai pelatihan seperti LKMM TD HMTL, HMSI, HIMAGE, HIMASISKAL, dll, *Public Relations Training*, serta kontributor halaman DIGIMAGZ pada Harian Surya. Penulis dapat dikontak melalui e-mail tamara.rachim@gmail.com