TUGAS AKHIR – TI 184833

PENGEMBANGAN MODEL PENGELOLAAN SAMPAH PERKOTAAN YANG BERKELANJUTAN DENGAN METODOLOGI SISTEM DINAMIK DAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (STUDI KASUS: KOTA SURABAYA)

DANIS MANDASARI

NRP 024 1164 0000126

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng

NIP. 195503081979031001

Dosen Ko-Pembimbing

Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E

NIP. 197011201997032001

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM DAN INDUSTRI

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – TI 184833

PENGEMBANGAN MODEL PENGELOLAAN SAMPAH PERKOTAAN YANG BERKELANJUTAN DENGAN METODOLOGI SISTEM DINAMIK DAN LIFE CYCLE ASSESSMENT (STUDI KASUS: KOTA SURABAYA)

DANIS MANDASARI

NRP 024 1164 0000126

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng

NIP. 195503081979031001

Dosen Ko-Pembimbing

Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E

NIP. 197011201997032001

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM DAN INDUSTRI

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2020

FINAL PROJECT – TI 184833

DEVELOPING A SUSTAINABLE MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT SYSTEM MODEL WITH DYNAMIC SYSTEM AND LIFE CYCLE ASSESSMENT APPROACH (CASE STUDY: SURABAYA CITY)

DANIS MANDASARI
NRP 024 1164 0000126

Supervisor
Prof. Dr. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng
NIP. 195503081979031001

Co- Supervisor
Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E
NIP. 197011201997032001

INDUSTRIAL AND SYSTEMS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

LEMBAR PENGESAHAN

PENGEMBANGAN MODEL PENGELOLAAN SAMPAH PERKOTAAN YANG BERKELANJUTAN DENGAN METODOLOGI SISTEM DINAMIK DAN LIFE CYCLE ASSESSMENT (STUDI KASUS: KOTA SURABAYA)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjanan Teknik pada
Program Studi Sarjana Departemen Teknik Sistem dan Industri
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh:

DANIS MANDASARI

NRP 0241 16 40000 126

Disetujui oleh,

Dosen Pembimbing Tugas Akhir	Dosen Ko-Pembimbing Tugas Akhir
Prof. Dr. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng	**Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E**
NIP. 195503081979031001	NIP. 197011201997032001

Surabaya, Agustus 2020

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

PENGEMBANGAN MODEL PENGELOLAAN SAMPAH PERKOTAAN YANG BERKELANJUTAN DENGAN METODOLOGI SISTEM DINAMIK DAN LIFE CYCLE ASSESSMENT (STUDI KASUS: KOTA SURABAYA)

Nama	: Danis Mandasari
NRP	: 02411640000126
Dosen Pembimbing	: Prof. Dr. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng
Dosen Ko-Pembimbing	: Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E

ABSTRAK

Kota Surabaya merupakan kota dengan pengelolaan sampah perkotaan terbaik di Indonesia. Meskipun begitu, jumlah sampah Surabaya terus meningkat setiap tahunnya dan lebih dari 65% dari total sampah yang dihasilkan berakhir di TPA Benowo. Pengembangan kebijakan pengelolaan sampah diperlukan dalam rangka mengurangi jumlah produksi sampah dan penumpukan sampah di fasilitas pembuangan akhir sampah Surabaya. Selain itu, kebijakan pengelolaan sampah diharapkan dapat meningkatkan jumlah pendapatan dari pengelolaan sampah, mengurangi kebutuhan biaya, dan meningkatkan penyerapan pekerja pengelolaan sampah sehingga berkelanjutan di masa depan.

Pada penelitian ini, integrasi metodologi Sistem Dinamik dan *Life Cycle Assessment* (LCA) digunakan untuk memodelkan kondisi pengelolaan sampah perkotaan Surabaya dan merumuskan kebijakan pengelolaan sampah yang dapat mencapai target pengelolaan sampah yaitu meningkatkan jumlah sampah terolah dan mengurangi jumlah produksi sampah, serta dapat berkelanjutan di masa depan. Perumusan kebijakan dilakukan dengan memperhatikan detail keterkaitan antar variabel sistem pengelolaan sampah. Terdapat sembilan skenario yang diusulkan yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario pengembangan fasilitas pengolahan sampah di lokasi sumber sampah (pengembangan fasilitas bank sampah) dan pengembangan fasilitas pengolahan akhir sampah (pengoperasian fasilitas pembangkit listrik tenaga sampah dan pemilahan sampah) memberikan dampak paling signifikan dibandingkan dengan kondisi eksisting, yang ditinjau dalam hal jumlah timbunan sampah, jumlah sampah menjadi bahan baku dan sumber energi, pengurangan biaya pengelolaan sampah dan emisi pengolahan sampah, serta peningkatan penyerapan pekerja.

Kata Kunci: *Keberlanjutan, LCA, Pengelolaan Sampah Padat Perkotaan, Sistem Dinamik, Surabaya*

Halaman ini sengaja Dikosongkan

DEVELOPING A SUSTAINABLE MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT SYSTEM MODEL WITH DYNAMIC SYSTEM AND LIFE CYCLE ASSESSMENT APPROACH (CASE STUDY: SURABAYA CITY)

Nama	: Danis Mandasari
NRP	: 02411640000126
Dosen Pembimbing	: Prof. Dr. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng
Dosen Ko-Pembimbing	: Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E

ABSTRACT

Surabaya is a role model for municipal waste management in Indonesia. However, the amount of waste in Surabaya continues to increase every year and over 65% of the total waste generated ends up at Benowo landfill. The development of a waste management policy is needed in order to reduce the amount of waste production and waste accumulation in the Surabaya waste disposal facilities. In addition, the waste management policy is expected to increase the amount of revenue from waste management, reduce the costs needed, and increase the absorption of waste management workers in accordance with the sustainable waste management framework.

In this research, the integration of the Dynamic System and Life Cycle Assessment (LCA) methodology is used to describe the conditions of municipal waste management in Surabaya and formulate waste management policies that can achieve waste management targets, such as increasing the amount of processed waste, reducing the amount of waste generated, and sustainable in the future. Policy formulation is carried out by paying attention to the details of the relationship between the waste management system variables. There are nine proposed scenarios used in this study. The results showed that the scenario of developing waste processing facilities at waste source locations (developing waste bank facilities) and developing waste final treatment facilities (operating waste power generation facilities and sorting waste) had the most significant impact among other scenarios, compared to the condition of the existing systems in terms of waste generated, waste to energy, waste to product, costs needed, emissions, and the absorption of workers.

Keywords*: Sustainability, LCA, Muncipal Solid Waste Management, System Dynamics, Surabaya*

Halaman ini sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT karena atas rahmat dan hidayah-Nya, serta shalawat dan salam bagi Nabi Muhammad SAW, penulis mampu menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Laporan Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi Strata-1 di Departemen Teknik Sistem dan Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini, penulis telah menerima banyak dukungan, bantuan, saran serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, dan keluarga, yang senantiasa memberikan kasih sayang, doa dan dukungan terbaik kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng. dan Ibu Dr. Maria Anityasari, S.T., M.E. selaku dosen pembimbing dan ko-pembimbing yang senantiasa memberikan arahan, motivasi, dan masukan untuk penulis hingga seluruh proses pengerjaan Tugas Akhir berjalan dengan baik dan lancer.
3. Bapak Yudha Andrian Saputra, S.T., MBA., Ibu Diesta Iva Mafthuhah, S.T., M.T., dan Ibu Putu Dana Karningsih, S.T., M.Eng.Sc.,Ph.D selaku dosen penguji seminar proposal tugas akhir serta Bapak Yudha Andrian Saputra, S.T., MBA dan Bapak Prof. Dr. Ir. Udisubakti Ciptomulyono M.Eng. Sc selaku doses penguji sidang tugas akhir.
4. Kepala Departemen, Sekretaris Departemen, serta segenap Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Industri ITS yang membantu penulis dalam bidang akademik maupun keperluan administrasi selama masa perkuliahan berlangsung.
5. Kepala Laboratorium, segenap Dosen Laboratorium, dan Asisten Laboratorium Quantitative Modeling and Industrial Policy Analysis yang selalu memberikan arahan, inspirasi, dan motivasi selama masa perkuliahan berlangsung.
6. Rekan-rekan TI-32, Adhigana sebagai keluarga baru bagi penulis semenjak memasuki dunia perkuliahan

7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini tidak luput dari kesalahan. Kritik dan saran sangat penulis butuhkan sebagai motivasi dalam rangka pengembangan diri menjadi lebih baik. Penulis berharap agar Laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua yang membutuhkan. Terima kasih.

Penulis,

Danis Mandasari

Penolakan Publikasi

Laporan Tugas Akhir dengan judul " PENGEMBANGAN MODEL PENGELOLAAN SAMPAH PERKOTAAN YANG BERKELANJUTAN DENGAN METODOLOGI SISTEM DINAMIK DAN LIFE CYCLE ASSESSMENT (STUDI KASUS: KOTA SURABAYA)" adalah dokumen penelitian yang belum diterbitkan. Segala jenis kegiatan referensi yang melibatkan penelitian ini tidak boleh dilakukan sebelum izin dari peneliti dan pembimbing penelitian terkait diberikan. Permohonan izin dapat dikirim melalui email danismanda@outlook.co.id.

Jika ada publikasi (seminar, jurnal nasional, atau internasional) yang mengambil referensi dari penelitian ini, referensi yang tepat harus dicantumkan dalam publikasi tersebut. Segala bentuk pelanggaran tercantum dalam peraturan hukum.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis,

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK ix
ABSTRACT xi
KATA PENGANTAR xiii
DAFTAR ISI xvii
DAFTAR GAMBAR xxiii
DAFTAR TABEL xxvii
BAB I 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 7
1.3 Tujuan Penelitian 7
1.4 Manfaat Penelitian 7
1.5 Ruang Lingkup Penelitian 8
1.6 Sistematika Laporan 9
BAB II 13
TINJAUAN PUSTAKA 13
2.1. Sampah 13
2.1.1 Sampah Padat (Solid Waste) 13
2.2 Sampah Padat Perkotaan (*Municipal Solid Waste* atau MSW) 13
2.3 Pengelolaan Sampah Padat Perkotaan (*Municipal Solid Waste Management*) 14
2.3.1 Waste to Energy 14
2.3.2 Waste to Product 19
2.4 Pengelolaan Sampah Padat di Surabaya 20
2.5 Peraturan Pengelolaan Sampah Padat Perkotaan 21
2.6 Konsep Keberlanjutan (*Sustainability*) 22

2.7 Sistem Pengelolaan Sampah Padat yang Berkelanjutan (*Sustainable Solid Waste Management*) 23
2.8 *Sustainable Development Goals (SDGs)* 25
2.9 Pengukuran Dampak Lingkungan dengan *Life Cycle Assesment* 27
2.9.1. Siklus Hidup Produk (Product Life Cycle) 28
2.9.2. Life Cycle Assesment Framework 28
2.10 Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah 29
2.10.1. Causal Loop Diagram (CLD) 30
2.10.2. Stock and Flow Diagram (SFD) 32
2.10.3. Pengujian Model dan Validasi 33
2.10.4. Base Run Model 34
2.10.5. Policy Scenarios Analysis 34
2.11 Penelitian Terdahulu 34
BAB III 37
METODOLOGI PENELITIAN 37
3.1. Hipotesis Dinamik 37
3.2. Prosedur Penelitian 37
3.3.1. Pengukuran Dampak Lingkungan dengan LCA 37
3.3.2. Pemodelan Sistem Dinamik dan Integrasi LCA dengan Sistem Dinamik 40
BAB IV 47
PEMODELAN SISTEM PENGELOLAAN SAMPAH SURABAYA 47
4.1. Deskripsi Sistem Amatan 48
4.1.1. Sampah dari Pemukiman Masyarakat Surabaya 48
4.1.2. Pembentukan Sampah Perkotaan di Surabaya 48
4.1.3. TPS Surabaya 48
4.1.4. Pengangkutan Sampah TPS ke TPA Benowo 49
4.1.5. Pengelolaan Sampah di TPA Benowo 50

4.1.6. Dampak Lingkungan Pengelolaan Sampah di Surabaya 53
4.1.7. Dampak Sosial dan Ekonomi Pengelolaan Sampah di Surabaya ... 54
4.2. Konseptualisasi Sistem 54
4.2.1. Identifikasi Variabel 54
4.2.2. Diagram Input dan Output 56
4.2.3. Causal Loop Diagram (CLD) 56
4.2.4. Validasi CLD 56
4.3. Model Simulasi Kondisi Eksisting 57
4.3.1. SFD Pembentukan Sampah Masyarakat 57
4.3.2. SFD Penumpukan Sampah di TPS 57
4.3.3. SFD Pengangkutan Sampah TPS ke TPA 58
4.3.4. SFD Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah 58
4.3.5. SFD Penimbunan Sampah dan Pengolahan Air Lindi di TPA Benowo 58
4.3.6. SFD LFG Power Plant di TPA Benowo 59
4.3.7. SFD Dampak Lingkungan Pengelolaan Sampah 60
4.3.7. SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Pengelolaan Sampah 69
4.4. Verifikasi dan Validasi SFD Model Simulasi Kondisi Eksisting..... 69
4.4.1. Verifikasi 69
4.4.2. Validasi 70
4.5. Analisis Simulasi Model Eksisting Pengelolaan Sampah Surabaya 82
4.5.1. Submodel Pembentukan Sampah Perkotaan Surabaya 83
4.5.2. Submodel Penumpukan Sampah di TPS 83
4.5.3. Submodel Pengangkutan Sampah TPS ke TPA Benowo 84
4.5.4. Submodel Dampak Lingkungan Penggunaan BBM Kendaraan Pengangkutan Sampah 86

4.5.5. Submodel Dampak Lingkungan Air Lindi Pengangkutan Sampah..... 86

4.5.6. Submodel Penimbunan Sampah di TPA Benowo 87

4.5.7. Submodel Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah 89

4.5.8. Submodel Produksi Air Lindi TPA 90

4.5.9. Submodel Dampak Lingkungan Air Lindi Penimbunan Sampah ... 90

4.5.10. Submodel LFG Power Plant 91

4.5.11. Submodel Dampak Lingkungan LFG Power Plant 92

4.5.12. Submodel Daya Dukung Lingkungan terhadap Pengelolaan Sampah 92

4.5.13. Submodel Paramater Dampak Lingkungan 93

4.5.14. Submodel Dampak Ekonomi dan Sosial Pengelolaan Sampah Surabaya Kondisi Eksisting 93

BAB V 95

PERANCANGAN SKENARIO PENGELOLAAN SAMPAH SURABAYA..... 95

5.1 Perancangan Skenario Perubahan Parameter 96

5.1.1 Skenario 1: Peningkatan Kapasitas LFG Power Plant – Peningkatan Hasil Penjualan Listrik – Peningkatan Luas RTH – Layoff Kendaraan Armroll – Peningkatan Upaya Pemadatan Sampah 97

5.2 Perancangan Skenario Perubahan Struktur 98

5.3.1 Skenario PLTSa TPA Benowo dengan Proses Gasifikasi 99

5.3.2 Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Komposting di TPA Benowo 101

5.3.3 Skenario Pengembangan Bank Sampah (Proses Komposting dan Penjualan Sampah ke Pengepul) 104

5.3.4 Skenario 2: Kombinasi Skenario PLTSa Gasifikasi dan Pengembangan Bank Sampah 107

5.3.5 Skenario 3: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah untuk Mendukung Pengoperasioan PLTSa pada Tahun 2021 108

5.3.6 Skenario 4: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah untuk Mendukung Pengoperasioan PLTSa pada Tahun 2022 109

5.3.7 Skenario 5: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah untuk Mendukung Pengoperasioan PLTSa pada Tahun 2023 110

5.3.8 Skenario 6: Pemilahan Sampah Terpusat, Pengembangan Bank Sampah, dan PLTSa Gasifikasi 112

5.3.9 Skenario 7: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah dan Pemilahan Sampah Terpusat pada Skenario 6 113

5.3.10 Skenario 8: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah dan Pemilahan Sampah Terpusat untuk Operasional PLTSa Mulai Tahun 2022 114

5.3.11 Skenario 9: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah dan Pemilahan Sampah Terpusat untuk Operasional PLTSa Mulai Tahun 2023 115

5.3 Pemilihan Skenario Perubahan Parameter, Struktur, dan Kombinasi .. 117

5.4 Analisis Sensitivitas pada Kondisi Tidak Pasti 124

5.4.1. Perubahan Nilai Parameter pada Kondisi 1 125

5.4.2. Perubahan Nilai Parameter pada Kondisi 2 129

5.5 Pemilihan Skenario berdasarkan Semua Kondisi 134

BAB VI 137

KESIMPULAN DAN SARAN 137

6.1. Kesimpulan 137

6.2. Saran 139

DAFTAR PUSTAKA 141

LAMPIRAN 152

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Target Pengurangan dan Penanganan Sampah Nasional berdasarkan Jakstranas 2
Gambar 1.2 Proyeksi Emisi Gas Rumah Kaca Indonesia 3
Gambar 1.3 Target Pengurangan dan Penanganan Sampah Nasional berdasarkan Jakstrada Kota Surabaya 4
Gambar 1.4 Jumlah Penduduk Surabaya 4
Gambar 1.5 Jumlah Produksi Sampah Surabaya 4
Gambar 1. 6 17 Tujuan dalam Sustainable Development Goals 26
Gambar 2. 1 Metode WTE 15
Gambar 2. 2 Proses Pembakaran Sampah 15
Gambar 2. 3 Proses Gasifikasi 16
Gambar 2. 4 Proses Pirolisis 17
Gambar 2. 5 Proses Pirolisis 18
Gambar 2. 6 Integrated Sustainable Solid Waste Management 24
Gambar 2. 7 LC Assesment Framework 28
Gambar 2. 8 Tahapan Pemodelan Sistem Dinamik 31
Gambar 2. 9 CLD Pengelolaan Sampah di Surabaya 31
Gambar 2. 10 SFD Pengelolaan Sampah di Surabaya 32
Gambar 3. 1 Prosedur Pengukuran Dampak Lingkungan dengan LCA 38
Gambar 3. 2 Life Cycle Inventory Framework 40
Gambar 3.3 Prosedur Pemodelan Sistem Dinamik 41
Gambar 3.4 Prosedur Kombinasi Pemodelan Sistem Dinamik dan LCA 45
Gambar 3. 5 Diagram Input dan Output 56
Gambar 3. 6 Causal Loop Diagram 56
Gambar 4. 1 Influence Diagram Kondisi Eksisting Pengelolaan Sampah Surabaya 47
Gambar 4. 2 Proses IPAL di TPA Benowo dengan Teknologi AOP-NF 52
Gambar 4. 3 Emisi GRK Pengelolaan Sampah 54
Gambar 4. 4 SFD Pembentukan Sampah Surabaya 57
Gambar 4. 5 SFD Penumpukan Sampah di TPS 57

Gambar 4. 6 SFD Pengangkutan Sampah Surabaya 58
Gambar 4. 7 SFD Produksi Air Lindi Pengankutan Sampah 58
Gambar 4. 8 SFD Proses Penimbunan Sampah dan Pengolahan Air Lindi di TPA Benowo 58
Gambar 4. 9 SFD Proses Pengolahan Gas Metan pada LFG Power Plant di TPA Benowo 59
Gambar 4. 10 Proses LCA Pengelolaan Sampah Surabaya 60
Gambar 4. 11 LCIA Dampak Lingkungan Penggunaan BBM pada Proses Pengangkutan Sampah 63
Gambar 4. 12 LCIA Dampak Lingkungan dari Produksi Air Lindi pada Proses Pengangkutan Sampah 64
Gambar 4. 13 Contoh LCIA Produksi Gas Metan dari Proses Penimbunan Sampah Jenis Nappies di TPA Benowo 66
Gambar 4. 14 Model Akumulasi Produksi Gas Metan dari Sampah Organik di TPA Benowo 66
Gambar 4. 15 Model LCIA Fasilitas IPAL di TPA Benowo 67
Gambar 4. 16 Model SFD Estimasi Produksi Gas CO2 dari LFG Power Plant 67
Gambar 4. 17 Model SFD Daya Dukung Lingkungan Surabaya (Daya Serap CO_2) terhadap Hasil Produksi Gas CO_2 Pengelolaan Sampah Surabaya 68
Gambar 4. 18 Model SFD Perhitungan Kategori Dampak kgCO2eq 69
Gambar 4. 19 Model SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Pengelolaan Sampah Surabaya Saat Ini 69
Gambar 4. 20 Verifikasi Model dengan Fitur Check Units 69
Gambar 4. 21 Verifikasi Formula Model Kondisi Eksisting 70
Gambar 4. 22 Uji Parameter Sub Model Pembentukan Sampah Surabaya 72
Gambar 4. 23 Uji Parameter Sub Model Penumpukan Sampah di TPS 72
Gambar 4. 24 Uji Parameter Sub Model Pengangkutan Sampah TPS ke TPA Benowo 73
Gambar 4. 25 Uji Parameter Sub Model Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah – Penggunaan BBM Kendaraan 73
Gambar 4. 26 Uji Parameter Sub Model Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah – Air Lindi 74

Gambar 4. 27 Uji Parameter Sub Model Penimbunan Sampah di TPA Benowo . 74
Gambar 4. 28 Uji Parameter Sub Model Dampak Gas Metan Timbunan Sampah75
Gambar 4. 29 Uji Parameter Sub Model Produksi Air Lindi di TPA Benowo..... 75
Gambar 4. 30 Uji Parameter Sub Model Dampak Lingkungan Air Lindi di TPA Benowo 76
Gambar 4. 31 Uji Parameter Sub Model Proses pada LFG Power Plant..... 76
Gambar 4. 32 Uji Parameter Sub Model Daya Dukung Lingkungan terhadap Penyerapan Emisi Gas Karbon Dioksida Hasil Pengelolaan Sampah Surabaya .. 77
Gambar 4. 33 Uji Parameter Sub Model Dampak Sosial Pengelolaan Sampah Surabaya..... 77
Gambar 4. 34 Uji Parameter Sub Model Dampak Ekonomi Pengelolaan Sampah Surabaya..... 78
Gambar 4. 35 Grafik Kondisi Ekstrim Jumlah Produksi Sampah per Penduduk (Ton/ Tahun) 79
Gambar 4. 36 Grafik Kondisi Ekstrim Proporsi Air Lindi Pengangkutan Sampah 79
Gambar 4. 37 Grafik Kondisi Kapasitas Produksi LFG Power Plant..... 80
Gambar 4. 38 Grafik Kondisi Luasan RTH Surabaya 80
Gambar 4. 39 Jumlah Penduduk dan Produksi Sampah Perkotaan Surabaya..... 83
Gambar 4. 40 Jumlah Sampah yang Terkumpul di TPS Surabaya..... 84
Gambar 4. 41 Hasil Running SFD Proses Pengangkutan Sampah Surabaya 85
Gambar 4. 42 Utilitas Kendaraan Pengangkutan Sampah 85
Gambar 4. 43 Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah dari Proses Penggunaan BBM..... 86
Gambar 4. 44 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan dari Produksi Air Lindi pada Proses Pengangkutan Sampah..... 87
Gambar 4. 45 Akumulasi Jumlah Timbunan Sampah di TPA Benowo 88
Gambar 4. 46 Ketinggian Timbunan Sampah di TPA Benowo..... 88
Gambar 4. 47 Produksi Gas Metan Penimbunan Sampah 89
Gambar 4. 48 Hasil Running Proses Produksi Air Lindi di TPA Benowo..... 90
Gambar 4. 49 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan dari Produksi Air Lindi TPA Benowo 91

Gambar 4. 50 Hasil Produksi Listrik pada LFG Power Plant TPA Benowo..... 91
Gambar 4. 51 Hasil Produksi Gas CO2 dari Penggunaan Listrik Operasional LFG Power Plant..... 92
Gambar 4. 52 Proyeksi Nilai Penyerapan CO_2 oleh Lingkungan dibandingkan dengan Nilai Pembentukan C_{O2} ke Lingkungan..... 93
Gambar 4. 53 Proyeksi Peningkatan Nilai CO_2eq..... 93
Gambar 4. 54 Nilai Ekonomi Operasional Pengelolaan Sampah..... 94
Gambar 5. 1 Model SFD Sampah untuk Proses PLTSa Gasifikasi..... 99
Gambar 5. 2 Model SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Skenario PLTSa Gasifikasi 99
Gambar 5. 3 Model SFD Dampak Lingkungan Skenario PLTSa Gasifikasi 100
Gambar 5. 4 SFD Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo..... 102
Gambar 5. 5 Dampak Sosial dan Ekonomi Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo..... 102
Gambar 5. 6 Dampak Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan Terhadap Pengurangan Jumlah Sampah yang Ditimbun di TPA Benowo..... 102
Gambar 5. 7 Dampak Lingkungan Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan TPA Benowo 104
Gambar 5. 8 SFD Skenario Pengembangan Bank Sampah..... 104
Gambar 5. 9 SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Skenario Pengembangan Bank Sampah 105
Gambar 5. 10 SFD Dampak Lingkungan Skenario Pengembangan Bank Sampah 106

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Teknologi WTE..... 17
Tabel 2. 2 Peluang dan Tantangan Penerapan WTE..... 19
Tabel 2.3 Kriteria Keberlanjutan..... 23
Tabel 2. 4 Korelasi Global Waste Management Goals dengan Sustainable Development Goals..... 26
Tabel 2.5 Validasi Model Sistem Dinamik..... 33
Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu 34
Tabel 3. 1 Data Pengukuran Dampak Lingkungan 39
Tabel 3. 2 Jenis dan Metodologi Pengumpulan Data..... 42
Tabel 4. 1 Komposisi Sampah di TPA Benowo 48
Tabel 4. 2 Jumlah Penduduk dan Produksi Sampah Penduduk Kota Surabaya.... 48
Tabel 4. 3 Perbandingan Jumlah Sampah TPS terhadap Jumlah Timbulan Sampah 2017 -2019 49
Tabel 4. 4 Spesifikasi Kendaraan Pengangkutan Sampah Milik DKRTH..... 49
Tabel 4. 5 Data Faktor Kompresi Kendaraan..... 49
Tabel 4. 6 IPPC 2006 *Guideline* 54
Tabel 4. 7 Variabel dalam Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah Surabaya 55
Tabel 4. 8 Tujuan dan Batasan Proses Pengelolaan Sampah..... 60
Tabel 4. 9 Identifikasi Proses Pengangkutan Sampah 61
Tabel 4. 10 Identifikasi Proses Penimbunan Sampah 61
Tabel 4. 11 Identifikasi Proses LFG *Power Plant* 61
Tabel 4. 12 Identifikasi Proses IPAL 62
Tabel 4. 13 Konsumsi Bahan Bakar Kendaraan Pengangkutan Sampah..... 63
Tabel 4. 14 Faktor Emisi Penggunaan Bahan Bakar Solar 63
Tabel 4. 15 Nilai Kalor Bahan Bakar Solar 63
Tabel 4. 16 Data Dampak Air Lindi..... 64
Tabel 4. 17 Data Pendukung Proses Penimbunan Sampah..... 66
Tabel 4. 18 Data Pendukung Proses IPAL..... 67
Tabel 4. 19 LC *Impact Assesment* Pengangkutan Sampah 68
Tabel 4. 20 Data Nilai Ekonomi 69

Tabel 4. 21 Perbandingan Jumlah Penduduk Surabaya Aktual dan Simulasi 81
Tabel 4. 22 Hasil Pengujian Jumlah Penduduk Hasil Simulasi dan Data Aktual dengan *Paired t-test* 81
Tabel 4. 23 Perbandingan Jumlah Produksi Sampah Surabaya Hasil Simulasi dan Aktual 81
Tabel 4. 24 Hasil Pengujian Produksi Sampah Hasil Simulasi dan Data Aktual dengan *Paired t-test* 81
Tabel 4. 25 Perbandingan Jumlah Sampah TPS Hasil Simulasi dan Aktual 82
Tabel 4. 26 Hasil Pengujian Jumlah Sampah TPS Hasil Simulasi dan Data Aktual dengan *Paired t-test* 82
Tabel 4. 27 Perbandingan Jumlah CH4 Timbunan Sampah (Ton) Hasil Simulasi dan Perhitungan Excel IPCC GL 2006 82
Tabel 4. 28 Jumlah Penduduk dan Produksi Sampah Surabaya Tahun 2017 - 2032 83
Tabel 4. 29 Jumlah Sampah di TPS Surabaya Tahun 2017 - 2032 84
Tabel 4. 30 Proyeksi Air Lindi TPA Benowo Tahun 2017 hingga 2032 90
Tabel 4. 31 Proyeksi Gas Metan TPA Benowo Tahun 2017 hingga 2032 (Ton).. 92

Tabel 5. 1 Skenario Perubahan Parameter 96
Tabel 5. 2 Variabel Kontrol 97
Tabel 5. 3 Variabel Respon 97
Tabel 5. 4 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 1 98
Tabel 5. 5 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses Gasifikasi 100
Tabel 5. 6 Identifikasi Proses Gasifikasi 100
Tabel 5. 7 Data Pendukung Proses Termokimia - Gasifikasi 100
Tabel 5. 8 LC Impact Assesment Proses Termokimia – Gasifikasi 100
Tabel 5. 9 Nilai *Recovery Rate* Sampah TPA Benowo 101
Tabel 5. 10 Tabel Harga Sampah Hasil Pemilahan dan Pengomposan (Rp/ Ton) 102
Tabel 5. 11 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses 103
Tabel 5. 12 Identifikasi Proses 103

Tabel 5. 13 Data Pendukung Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo 103
Tabel 5. 14 Data LCIA 104
Tabel 5. 15 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses 105
Tabel 5. 16 Identifikasi Proses 105
Tabel 5. 17 Data Pendukung Proses Koperasi Primer Bank Sampah (Proses Komposting dan Penjualan Sampah ke Pengepul) 105
Tabel 5. 18 Data LCIA 106
Tabel 5. 19 Skenario Perubahan Struktur 106
Tabel 5. 20 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 2 107
Tabel 5. 21 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 3 108
Tabel 5. 22 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 4 110
Tabel 5. 23 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 5 111
Tabel 5. 24 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 6 112
Tabel 5. 25 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 7 113
Tabel 5. 26 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 8 115
Tabel 5. 27 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 9 116
Tabel 5. 28 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Seluruh Skenario Perubahan Parameter dan Struktur 117
Tabel 5. 29 Perubahan Nilai Variabel Tidak Pasti 124
Tabel 5. 30 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dan Skenario pada Perubahan Nilai Parameter Kondisi 1 125
Tabel 5. 31 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dan Skenario pada Perubahan Nilai Parameter Kondisi 2 129

Tabel 5. 1 Skenario Perubahan Parameter 96
Tabel 5. 2 Variabel Kontrol 97
Tabel 5. 3 Variabel Respon 97
Tabel 5. 4 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 1 98
Tabel 5. 5 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses Gasifikasi 100
Tabel 5. 6 Identifikasi Proses Gasifikasi 100
Tabel 5. 7 Data Pendukung Proses Termokimia - Gasifikasi 100
Tabel 5. 8 LC Impact Assesment Proses Termokimia – Gasifikasi 100
Tabel 5. 9 Nilai *Recovery Rate* Sampah TPA Benowo 101
Tabel 5. 10 Tabel Harga Sampah Hasil Pemilahan dan Pengomposan (Rp/ Ton) 102
Tabel 5. 11 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses 103
Tabel 5. 12 Identifikasi Proses 103
Tabel 5. 13 Data Pendukung Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo 103
Tabel 5. 14 Data LCIA 104
Tabel 5. 15 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses 105
Tabel 5. 16 Identifikasi Proses 105
Tabel 5. 17 Data Pendukung Proses Koperasi Primer Bank Sampah (Proses Komposting dan Penjualan Sampah ke Pengepul) 105
Tabel 5. 18 Data LCIA 106
Tabel 5. 19 Skenario Perubahan Struktur 106
Tabel 5. 20 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 2 107
Tabel 5. 21 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 3 108
Tabel 5. 22 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 4 110
Tabel 5. 23 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 5 111

Tabel 5. 24 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 6 112
Tabel 5. 25 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 7 113
Tabel 5. 26 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 8 115
Tabel 5. 27 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 9 116
Tabel 5. 28 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Seluruh Skenario Perubahan Parameter dan Struktur..... 117
Tabel 5. 29 Perubahan Nilai Variabel Tidak Pasti 124
Tabel 5. 30 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dan Skenario pada Perubahan Nilai Parameter Kondisi 1 125
Tabel 5. 31 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dan Skenario pada Perubahan Nilai Parameter Kondisi 2 129

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

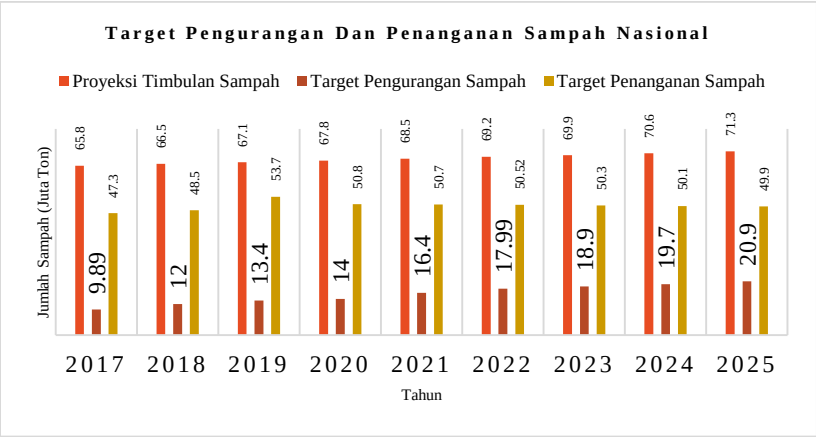
Pada Bab Pendahuluan akan dipaparkan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan yang digunakan dalam proposal penelitian.

1.1 Latar Belakang

Sampah merupakan permasalahan global yang erat kaitannya dengan pencemaran lingkungan, inklusi sosial, dan keberlanjutan ekonomi (Gupta, et al., 2015). Permasalahan sampah biasa terjadi pada negara berkembang karena tidak dimilikinya manajemen pengelolaan sampah yang berkelanjutan baik dari segi teknis, lingkungan, sosial dan budaya, ekonomi, pendanaan, institusi, serta politik (The World Bank, 2012). Proses pembentukan sampah yang tidak terkontrol dapat mengakibatkan terganggunya keseimbangan lingkungan seperti adanya pencemaran air, tanah, udara yang disebabkan oleh adanya emisi berbahaya yang terlepas ke lingkungan (Wiedinmyer, et al., 2014). Penanganan sampah yang tidak sesuai pun dapat berdampak, baik secara lokal, regional, ataupun global seperti pemanasan global (Ferronato & Torretta, 2019).

Pengelolaan sampah di Indonesia, khususnya sampah jenis rumah tangga dan sejenis sampah rumah tangga, diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 81 Tahun 2012. Dalam peraturan ini, pengelolaan sampah bertujuan untuk menjaga kelestarian lingkungan hidup dan kesehatan masyarakat serta mengupayakan sampah menjadi sumber daya. Selanjutnya, dalam rangka menstrukturkan kebijakan dan strategi pengelolaan sampah rumah tangga, pemerintah Indonesia menerbitkan Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sejenis Sampah Rumah Tangga Nasional atau disingkat Jakstranas yang termuat dalam Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017. Tujuan dari Jakstranas ini yaitu agar tercipta arah kebijakan dan strategi dalam pengurangan dan penanganan sampah nasional yang terpadu dan berkelanjutan. Adapun target dari Jakstranas, tertera pada Gambar 1.1, yaitu pengurangan timbulan sampah nasional sebesar 30% dan penanganan timbulan sampah nasional

sebesar 70% pada tahun 2025. Target ini akan dicapai melalui strategi atau program pembatasan timbulan sampah, pendauran ulang sampah, pemanfaatan kembali sampah, pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pemrosesan akhir (KLHK, 2019).



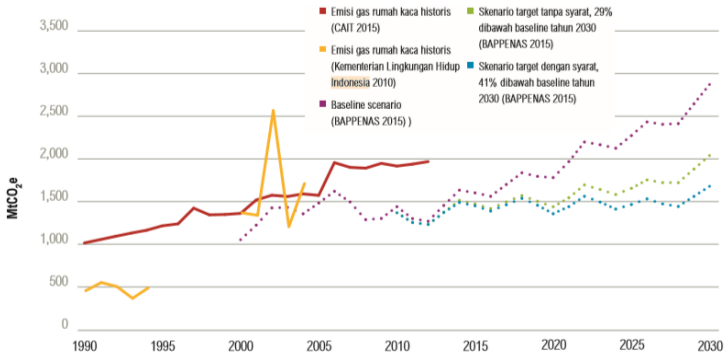
Gambar 1.1 Target Pengurangan dan Penanganan Sampah Nasional berdasarkan Jakstranas

Sumber: KLHK, 2019

Strategi pengurangan dan penanganan sampah dilakukan dalam rangka mengurangi dampak negatif sampah terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat seperti dihasilkannya emisi gas rumah kaca (GRK) seperti CO_2 dan CH_4. Terlebih Indonesia merupakan salah satu negara penghasil emisi GRK terbesar di dunia yang mencapai 9.2 tCO_2 per kapita dengan tren meningkat sejak awal tahun 2000-an (Gambar 1.2) dan lebih tinggi jika dibandingkan dengan rata-rata negara G20 yaitu sebesar 8 tCO_2 per kapita (Climate Transparency, 2018). Emisi GRK Indonesia berkontribusi sebesar 5.3% dari emisi GRK secara global (World Resources Institute, 2016). Berdasarkan laporan Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) tahun 2015, penanganan sampah merupakan salah satu sektor terbesar yang menyumbang total emisi GRK (11%) di Indonesia, berdampingan dengan sektor industri, dan pertanian. Dengan adanya Jakstranas, diharapkan turut membantu pencapaian target Indonesia untuk mengurangi emisi sektor penanganan sampah sebesar 0.38% pada tahun 2030 (World Resources Institute, 2016).

Kota Surabaya merupakan salah satu kota terbaik di Indonesia terkait pengelolaan sampah, dibuktikan dengan penetapan Kota Surabaya sebagai *role model* dalam pengelolaan sampah perkotaan pada tahun 2018 oleh KLHK.

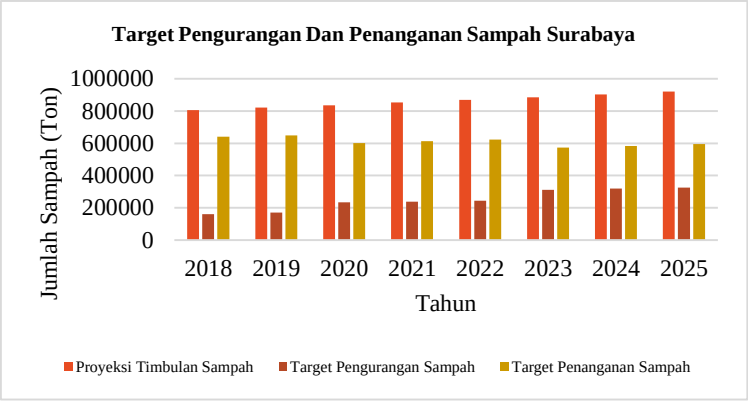
Penetapan ini didasarkan pada komitmen Kota Surabaya dalam mengurangi jumlah sampah dan penanganan sampah dengan adanya pusat daur ulang sampah serta penerapan konsep *waste to energy* di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo. Selain itu, pada tahun 2017 Surabaya juga ditetapkan sebagai salah satu dari tiga kota terbaik dunia pada kategori *"Global Green City"* oleh *United Nation Environment Program* dalam kegiatan Forum Global tentang Pemukiman dan Kota Berkelanjutan, dan penerima Adipura Kencana tahun 2006 hingga 2011 (Rukmananda, 2017). Kemudian, Surabaya juga merupakan salah satu kota yang telah menerapkan *Eco City* yaitu dengan penerapan konservasi lingkungan pada pembangunan kota yang berkelanjutan. *Eco city* sendiri merupakan kota yang sehat dan ekologis yang aman dan nyaman untuk dihuni oleh manusia (International Ecocity Framework & Standards (IEFS) Advisory Team, 2010).



Gambar 1.2 Proyeksi Emisi Gas Rumah Kaca Indonesia

Sumber: Bappenas, 2015

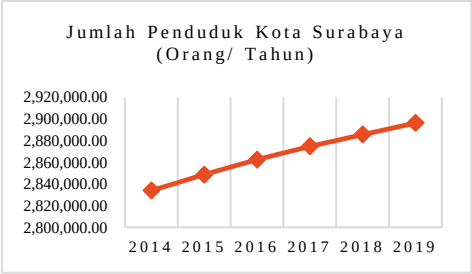
Selanjutnya, sebagai bentuk keseriusan dalam merespon adanya Jakstranas dari pemerintah Indonesia, Pemerintah Kota Surabaya kemudian menerbitkan Peraturan Walikota Surabaya Nomor 64 Tahun 2018 mengenai kebijakan dan strategi pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga daerah atau disingkat Jakstrada. Gambar 1.3 menunjukkan target Jakstrada yang akan dicapai oleh Surabaya pada tahun 2025. Jakstrada Kota Surabaya juga mencakup arah kebijakan, strategi, program, dan target pengurangan serta penanganan sampah yang akan dicapai hingga tahun 2025, seperti misalnya peningkatan kapasitas pengurangan dan penanganan sampah, pengembangan skema investasi, penerapan teknologi yang ramah lingkungan dan tepat guna, serta adanya skema insentif (Walikota Surabaya, 2018).



Gambar 1.3 Target Pengurangan dan Penanganan Sampah Nasional berdasarkan Jakstrada Kota Surabaya

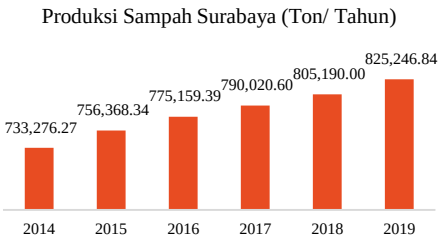
Sumber: Peraturan Walikota Surabaya, 2018

Saat ini, produksi sampah per kapita Surabaya mencapai 0.78 Kg/ hari dengan tren meningkat dan berada di atas rata-rata produksi sampah per penduduk dunia yaitu sebesar 0.74 Kg/ hari (The World Bank, 2020). Pada Gambar 1.4 dan Gambar 1.5 dapat dilihat bahwa jumlah sampah Surabaya meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk. Sampah yang bersumber dari penduduk dikelola oleh Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau (DKRTH). Pengelolaan sampah dimulai dari proses pengumpulan sampah dari masyarakat menuju ke tempat pembuangan sampah sementara (TPS) atau bank sampah. Dari sini, sampah kemudian diangkut dengan menggunakan kendaraan khusus menuju ke TPS 3R (*Reduce*, *Reuse*, dan *Recycle*), atau ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo.



Gambar 1.4 Jumlah Penduduk Surabaya

Sumber: BPS Kota Surabaya, 2019



Gambar 1.5 Jumlah Produksi Sampah Surabaya

Sumber: DKRTH, 2019

Mayoritas sampah yang diproduksi di Surabaya, lebih dari 65% dengan jumlah lebih dari 1,500 ton per hari, berakhir di TPA Benowo dengan kondisi sampah sepenuhnya tercampur antara sampah organik dan anorganik. TPA Benowo

sendiri telah beroperasi sejak tahun 2001 dengan menerapkan sistem *controlled landfill*, dan mulai tahun 2012 dikelola oleh PT Sumber Organik. Aktivitas di TPA saat ini yaitu pengelolaan sampah dengan *waste to energy* (WTE) melalui proses biokimia yang menghasilkan energi listrik, aktivitas penimbunan sampah, penyemprotan cairan kimia untuk mengurangi bau sampah, dan komposting untuk konsumsi internal TPA Benowo. Sejak tahun 2001 hingga tahun 2019, diperkirakan total sampah yang ada di TPA Benowo sebesar lebih dari 800 ribu ton sampah. Besarnya jumlah tumpukan sampah di TPA Benowo disebabkan belum adanya penerapan teknologi yang bisa mengurangi jumlah sampah secara masif hingga saat ini. Hal ini disebakan oleh kemoloran target awal pembangunan teknologi gasifikasi.

Besarnya jumlah sampah yang saat ini ditimbun di TPA Benowo dan jauhnya lokasi pengangkutan sampah, mendorong Pemerintah Kota Surabaya melakukan upaya untuk mengurangi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo. Upaya tersebut diwujudkan dengan menerapkan konsep *waste to product*, untuk menciptakan nilai tambah dari sampah, yaitu dengan dibangunnya pusat daur ulang dan komposting di beberapa titik lokasi di Surabaya. Namun, upaya mengurangi jumlah sampah yang masuk ke TPA melalui daur ulang dan komposting sampah belum bisa dilakukan secara optimal disebabkan oleh kondisi sampah Surabaya yang tercampur. Kondisi ini mengakibatkan penurunan kualitas sampah plastik atau logam, sehingga tidak bisa di daur ulang. Aspek lingkungan merupakan alasan lain adanya upaya pengurangan sampah yang masuk ke TPA Benowo. Hal ini dikarenakan proses pengangkutan sampah yang intens dilakukan setiap hari dapat menghasilkan emisi gas karbon dioksida (CO_2) dan BC (*black carbon)* serta proses degradasi sampah yang menghasilkan gas metan (CH_4). Emisi gas ini berkontribusi besar terhadap pemanasan global (*global warming potential)* dan apabila terlepas ke lingkungan bisa membahayakan kesehatan manusia.

Berdasarkan pemaparan target dan kondisi pengelolaan sampah Surabaya tersebut, dalam usaha pencapaian target pengelolaan sampah dan target penurunan emisi GRK daerah serta nasional diperlukan pemahaman kondisi sistem pengelolaan sampah secara menyeluruh. Strategi ataupun program diharapkan mampu mempertimbangkan performansi pengelolaan sampah saat ini, pengaruh

dinamika jumlah dan komposisi sampah, serta dampak jangka panjang dari strategi atau program yang dipilih. Selain itu, seperti yang tertuang dalam kerangka pengelolaan sampah yang berkelanjutan (*sustainable waste management*) diharapkan pengelolaan sampah Surabaya ke depan bisa meminimkan dampak terhadap lingkungan, meningkatkan efisiensi proses dan kebutuhan biaya, menyerap tenaga kerja pengelolaan sampah, sehingga berkelanjutan dari aspek biaya, lingkungan, ataupun sosial.

Salah satu metode yang biasa digunakan dalam pemodelan kondisi sistem pengelolaan sampah dan memprediksi kondisi pengelolaan sampah ke depan adalah Sistem Dinamik. Metode ini mampu mengakomodasi kompleksitas pengelolaan sampah yang melibatkan banyak proses meliputi proses pengumpulan, pengangkutan, dan pengolahan sampah yang saling berhubungan serta menentukan variabel, serta dapat mengetahui interaksi antar variabel sistem yang berpengaruh terhadap kinerja sistem pengelolaan sampah. Seperti misalnya pada tahun 2019, Sistem Dinamik digunakan untuk menganalisis pengaruh proses pemilahan sampah terhadap performansi pengelolaan sampah organik di Jepang (Babalola, 2019). Kemudian, pada tahun yang sama, Sistem Dinamik juga digunakan untuk analisis penerapan TPS 3R untuk mengurangi jumlah sampah yang masuk ke TPA di Banda Aceh, Indonesia (Mulyati, et al., 2019).

Sedangkan dalam mempelajari dampak lingkungan dari proses pengelolaan sampah, metode Sistem Dinamik bisa dikombinasikan dengan metode *Life Cycle Assesment* (LCA). LCA digunakan untuk analisis faktor dampak lingkungan, seperti faktor kesehatan manusia, kualitas lingkungan, dan pemanasan global. Hasil analisis faktor dampak lingkungan ini kemudian digunakan sebagai salah satu masukan dalam pemodelan Sistem Dinamik. Seperti misalnya, tahun 2018, LCA dan Sistem Dinamik digunakan untuk menganalisis pengelolaan limbah elektronik dan daur ulang di Cina dengan menentukan metode pengelolaan limbah yang dapat meminimasi penggunaan sumber daya dan jumlah polusi lingkungan (Yao, et al., 2018).

Penelitian ini akan membangun sebuah model integrasi antara LCA dan Sistem Dinamik sebagai alat untuk mengevaluasi kondisi pengelolaan sampah di Surabaya untuk mengelola sampah yang bersumber dari TPS dan berakhir di TPA

Benowo. Model ini digunakan untuk mengetahui kondisi pencapaian target pengelolaan sampah saat ini. Kemudian, model akan digunakan untuk merumuskan rekomendasi kebijakan yang mendukung upaya pencapaian target pengelolaan sampah yaitu peningkatan penanganan sampah, penurunan timbulan sampah, dan emisi GRK daerah ataupun nasional sehingga pengelolaan sampah Kota Surabaya bisa berkelanjutan, baik dari aspek keberlanjutan lingkungan, sosial, atau ekonomi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan latar belakang permasalahan di atas, rumusan permasalahan penelitian ini adalah bagaimana upaya atau strategi pengelolaan sampah yang dapat menurunkan timbulan sampah, meningkatkan penanganan sampah, dan menurunkan emisi pengelolaan sampah sehingga pengelolaan sampah di Surabaya bisa berkelanjutan di masa depan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan gambaran detail pengelolaan sampah Surabaya.
2. Memproyeksi dampak peningkatan jumlah sampah dan perkembangan operasional pengolahan sampah terhadap keberlanjutan pengelolaan sampah Surabaya ke depan yang dilihat dari aspek sosial, lingkungan, dan ekonomi.
3. Memperoleh skenario kebijakan yang menjamin pencapaian target pengelolaan sampah di Surabaya dan berkelanjutan di masa depan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui dampak pengelolaan sampah terhadap lingkungan dan usaha-usaha pengurangan dampak lingkungan.
2. Memperoleh alternatif usaha untuk meningkatkan efisiensi dan efektifitas pengelolaan sampah serta dapat membuka peluang kerja bagi masyarakat setempat.

3. Pemerintah Kota memperoleh instrumen tata kelola kebijakan pengelolaan sampah yang berkelanjutan.
4. Pemerintah Kota Surabaya dapat mencapai target Jakstrada dan Jakstranas.
5. Mengukur seberapa jauh capaian Pemerintah Kota dalam standar pencapaian pada butir-butir tujuan SDGs yang ke-3 (*ensure healthy lives, and promote well-being for all at all ages)*, ke-6 *(ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all)*, ke-7 *(ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all)*, ke-11 (*make cities inclusive, safe, resilient, and sustainable)*, ke-12 *(ensure sustainable consumption and production patterns)*, ke-13 *(take urgent action to combat climate change and its impacts)*, dan ke-14 *(conserve and sustainability use the oceans, seas and marine resources).*
6. Penelitian ini bisa dijadikan oleh Pemerintah Kota Surabaya di dalam memposisikan diri sebagai kota percontohan dalam hal pengelolaan sampah yang memenuhi persyaratan SDGs.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup pada penelitian tugas akhir ini meliputi batasan dan asumsi yang berguna untuk membatasi penelitian akibat cakupan penelitian yang begitu luas. Adapun batasan dan asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut.

1.5.1 Batasan

Batasan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan sistem terbatas jenis sampah rumah tangga, baik organik atau anorganik, yang bersumber dari TPS, dikelola oleh DKRTH Kota Surabaya, dan berakhir di TPA Benowo.
2. Pengelolaan sampah Surabaya meliputi proses pengumpulan dan penanganan sampah.
3. Proses pengumpulan sampah meliputi proses pemilahan dan pengangkutan sampah dari TPS hingga TPA Benowo.

4. Proses penanganan sampah meliputi proses pengolahan sampah di TPA Benowo yang terdiri atas aktivitas penimbunan, gasifikasi, dan daur ulang sampah.
5. Indikator keberlanjutan pengelolaan sampah yang digunakan yaitu dari aspek lingkungan (pencemaran ke udara oleh pengelolaan sampah), aspek ekonomi (penambahan nilai guna sampah, peningkatan pendapatan masyarakat), dan aspek sosial (penyerapan pekerja pengelolaan sampah).
6. Analisis keberlanjutan dilakukan selama periode 15 tahun, mulai tahun 2017 hingga tahun 2032.
7. Metode LCA yang digunakan dalam *software* Simapro adalah *IPCC 2013* dengan paremeter lingkungan berupa *Global Warming Potential (kgCO2eq).*

1.5.2 Asumsi

Asumsi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Konsumsi bahan bakar untuk setiap jenis kendaran pengangkut sama tidak mempertimbangkan jenis kendaraan dan umur kendaraan.
2. Efisiensi teknologi proses pengolahan sampah sesuai dengan kondisi awal, tidak mempertimbangkan umur penggunaan teknologi.
3. Data baku dari studi literatur atau penelitian lain yang berkaitan dengan dampak lingkungan pengelolaan sampah dapat digunakan sebagai *input*, seperti: komposisi sampah TPA Benowo, dan konsumsi listrik proses pengolahan sampah.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan proposal tugas akhir ini meliputi penjelasan singkat pada setiap bagian yang terdapat dalam laporan. Proposal ini akan terdiri atas tiga bab dan beberapa sub bab.

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab Pendahuluan mengandung latar belakang penelitian yang dilakukan untuk menentukan rumusan masalah penelitian, tujuan penelitian, manfaat

penelitian, ruang lingkup penelitian yang terdiri dari batasan dan asumsi serta penjelasan singkat dari sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab Tinjauan Pustaka mencakup landasan teori yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini yang bersumber dari berbagai studi literatur untuk membantu penulis dalam memperoleh gambaran dari permasalahan yang diteliti dan menentukan metode yang sesuai. Tinjauan pustaka akan membahas mengenai sampah, sampah padat, sampah padat perkotaan, pengelolaan sampah padat perkotaan yaitu *waste to energy* dan *waste to product*, pengelolaan sampah padat perkotaan di Surabaya, peraturan pengelolaan sampah di Indonesia dan Surabaya, pengelolaan sampah padat yang berkelanjutan, *sustainable development goals*, LCA, dan Sistem Dinamik.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab Metodologi Penelitian berisi mengenai tahapan proses penelitian yang akan dilakukan oleh peneliti. Metodologi penelitian disusun sebagai pedoman pelaksanaan penelitian agar mendapatkan hasil sesuai dengan tujuan penelitian. Tugas akhir ini akan menggunakan *software* STELLA dan Simapro untuk mengukur dampak lingkungan dan memodelkan sistem pengelolaan sampah di Surabaya. Bab metodologi penelitian terdiri dari hipotesis dinamik, perancangan skenario kebijakan, dan prosedur penelitian. Prosedur penelitian akan terdiri dari atas proses pengukuran dampak lingkungan dengan LCA dan pemodelan Sistem Dinamik.

BAB 4 PEMODELAN SISTEM PENGELOLAAN SAMPAH

Bab ini berisi mengenai perancangan model simulasi pada kondisi eksisting yang digunakan untuk mengetahui sistem pengelolaan sampah di Surabaya. Pembuatan model simulasi digunakan sebagai bahan dasar perancangan skenario kebijakan untuk mendukung upaya peningkatan kemampuan pengolahan sampah, minimasi dampak lingkungan, dan penciptaan nilai tambah bagi sampah. Tahapan pertama adalah melakukan penetuan variabel dan entitas pada sistem pengelolaan sampah Surabaya, kemudian membuat model konseptual dalam bentuk *causal loop diagram*. Dari model konseptual yang telah tervalidasi kemudian dibangun model simulasi atau *stock and flow diagram* dan dilakukan verifikasi serta validasi

terhadap model simulasi untuk dapat menentukan perancangan skenario kebijakan. Pada bab ini juga akan dilakukan pengukuran dampak lingkungan kondisi eksisting dengan metode *Life Cycle Analysis* yang terdiri atas *goal and scope identification, life cycle inventory analysis, life cycle impact assesment,* dan interpretasi.

BAB 5 PERANCANGAN SKENARIO PENGELOLAAN SAMPAH

Bab ini berisi mengenai perancangan skenario kebijakan berdasarkan model simulasi yang telah terverifikasi dan tervalidasi. Hasil perancangan skenario ini kemudian di *running* untuk melihat dampak dan perubahan dari sistem pengelolaan sampah Surabaya terhadap kemampuan penanganan potensi peningkatan jumlah sampah, dampak lingkungan, dan penciptaan nilai tambah sambah. Hasil *running* skenario kebijakan ini kemudian dibandingkan dengan hasil *running* skenario pada kondisi eksisting untuk dapat mengetahui alternatif skenario yang terbaik.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini mencakup kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan sesuai dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Selain itu, juga disebutkan saran dan rekomendasi bagi penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab Tinjauan Pustaka akan dipaparkan mengenai sampah, sampah padat perkotaan (*muncipal solid waste*), pengelolaan sampah padat perkotaan, pengelolaan sampah padat perkotaan di Surabaya, peraturan pengelolaan sampah padat perkotaan di Surabaya, pengelolaan sampah padat perkotaan yang berkelanjutan, SDGs, LCA, pemodelan sistem dinamik, dan penelitian terdahulu.

2.1. Sampah

Berdasarkan Undang-Undang RI NO. 18 Tahun 2008 dan Peraturan Pemerintah No. 18 Tahun 1999, sampah adalah sisa aktivitas manusia atau hasil dari proses alam yang berbentuk padat. Sampah erat kaitannya dengan kegiatan manusia baik individu ataupun kelompok. Sedangkan limbah adalah sisa aktivitas usaha atau kegiatan, bersifat lebih kompleks seperti pada lingkungan industri. Tiga sumber utama sampah berasal dari kegiatan residen (pemukiman masyarakat), institusi, komersil, industri, konstruksi, dan pembangunan (El-Maghraby, et al., 2014).

2.1.1 Sampah Padat (Solid Waste)

Sampah padat merupakan sampah padat atau semi-padat yang dihasilkan dari aktivitas manusia. Sampah padat dapat diklasifikasikan berdasarkan asal atau sumber sampah yaitu limbah industri, limbah rumah sakit, sampah perkotaan, limbah pertanian, limbah komersil, limbah konstruksi, dan limbah pertambangan. Selain itu, sampah padat juga bisa dikategorikan berdasarkan dampaknya terhadap lingkungan yaitu sampah padat yang berbahaya atau tidak berbahaya (Jassim, 2017)**.**

2.2 Sampah Padat Perkotaan (*Municipal Solid Waste* atau MSW)

Sampah padat perkotaan (*municipal solid waste*) adalah sampah padat atau semi padat yang dibuang oleh masyarakat. MSW diklasifikasikan ke dalam sampah organik dan anorganik (Ghanimeh, et al., 2012). Komposisi sampah perkotaan ditentukan oleh tingkat pertumbuhan ekonomi, iklim, dan budaya. Secara umum

sampah perkotaan terdiri atas sampah makanan, sampah plastik, kemasan produk (kaleng), dan peralatan masyarakat lainnya. Namun, untuk komposisi sampah perkotaan pada negara berkembang didominasi oleh sampah organik (sampah sisa makanan) dan pada negara maju didominasi oleh sampah anorganik (Trang, et al., 2017).

2.3 Pengelolaan Sampah Padat Perkotaan (*Municipal Solid Waste Management*)

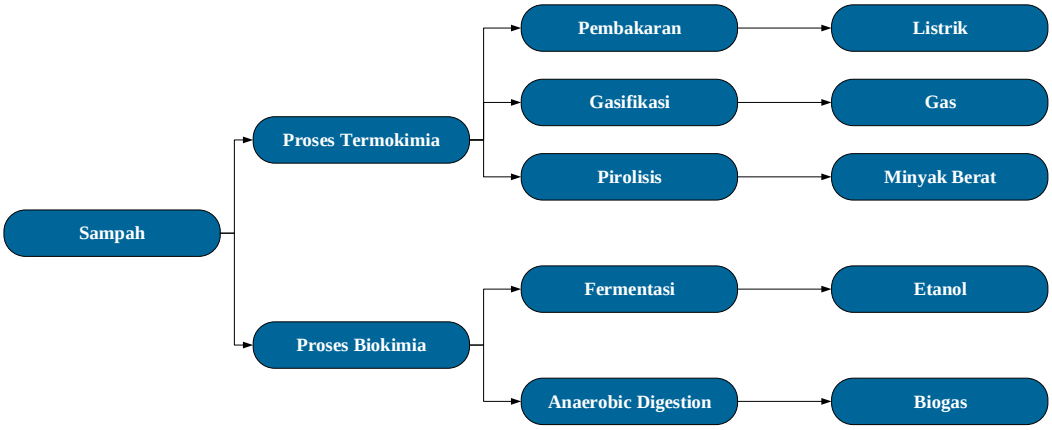
Pengelolaan sampah padat perkotaan merupakan proses pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, pendauran ulang, pemulihan, dan pembuangan sampah padat perkotaan. Pengelolaan sampah padat bertujuan untuk memastikan masyarakat perkotaan terhindar dari dampak negatif pengelolaan sampah, memastikan lingkungan perkotaan yang sehat dengan mengendalikan potensi terjadinya polusi air, udara, dan tanah, memastikan ekosistem lingkungan yang berkelanjutan di wilayah perkotaan, membantu peningkatan ekonomi perkotaan dengan menyediakan layanan pengelolaan sampah untuk memanfaatkan material yang masih berguna, dan menyediakan lapangan pekerjaan pada sektor pengelolaan sampah (Agbaeze, et al., 2014).

2.3.1 Waste to Energy

Pendekatan pengolahan sampah menjadi energi (*waste to energy*) merupakan proses mengonversi sampah menjadi energi yang dibutuhkan oleh masyarakat (Moya, et al., 2017). Metode pengolahan sampah ini merupakan bentuk pengaplikasian ISWM (*Integrated Solid Waste Management*) dalam rangka mengurangi dampak pemanasan global dan perubahan iklim yang terjadi. WTE berperan penting dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan (Brunner & Rechberger, 2014).

Proses WTE menghasilkan energi panas, listrik, dan bahan bakar substitusi seperti biogas, biofuel, dsb (GIZ, 2017). Manfaat pengaplikasian WTE seperti didapatkannya sumber energi terbarukan, penurunan jumlah gas rumah kaca yang dihasilkan dari sampah, dan penurunan kebutuhan lahan untuk penampungan sampah. Terdapat dua macam proses WTE yaitu proses termokimia (digunakan

pada sampah dengan kandungan air rendah) dan proses biokimia (digunakan pada sampah dengan kandungan air tinggi) (Zafar, 2019).

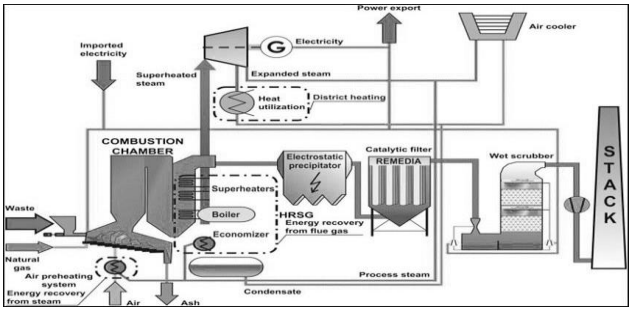


Gambar 2. 1 Metode WTE

2.3.1.1 Proses Termokimia

Berikut merupakan jenis proses termokimia untuk mengolah sampah menjadi energi:

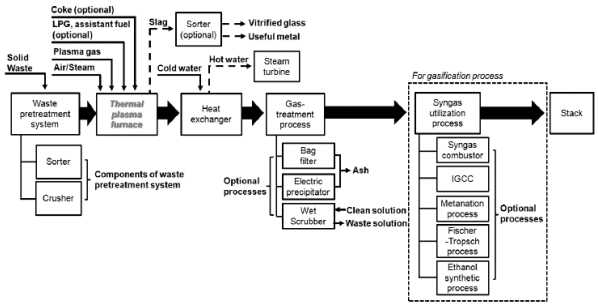
1. Pembakaran (*inceneration*) : proses penghancuran limbah padat dengan dibakar pada suhu tinggi (antara suhu 800°C atau di atasnya) kemudian dihasilkan panas yang bisa dikonversi menjadi energi. Jumlah energi yang dihasilkan bergantung pada densitas dan komposisi dari sampah yang dibakar. Metode pembakaran cocok diterapkan di kota besar dan padat karena dapat mengurangi kuantitas dan volume sampah yang seharusnya ditimbun. Proses pembakaran dapat mengurangi jumlah gas metan (CH_4) yang dihasilkan oleh sampah dan menghasilkan energi substitusi dari bahan bakar fosil. Adapun emisi yang harus diatasi meliputi: gas SO_2, HF, NO_2, NO, HCl, CO, debu, karbon organik, dan logam berat (Moya, et al., 2017).



Gambar 2. 2 Proses Pembakaran Sampah

Sumber: Moya, Diego. *et al* , 2017

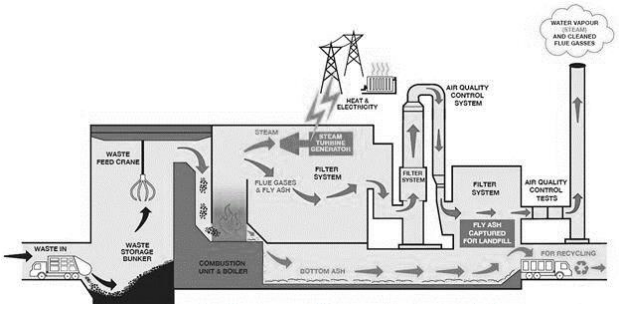
2. Gasifikasi : merupakan proses mengonversi komponen organik ke dalam gas dan limbah padatan. Gas yang dihasilkan bisa digunakan untuk pembangkitan energi atau produksi biofuel, sedangkan limbah padatan yang dihasilkan berupa campuran karbon organik dan debu (Perrot & Subiantoro, 2018). Gasifikasi dapat mengonversi beragam komponen sampah menjadi gas, namun dibutuhkan proses lanjutan yaitu pemisahan komponen gas yang tidak diperlukan sehingga dapat digunakan untuk membangkitkan listrik (US Department of Energy, 2019). Manfaat gasifikasi yaitu pengurangan volume sampah hingga 70%-90%, dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Biogas yang dihasilkan dari proses ini memiliki kandungan berupa gas metan, karbon dioksida, dan hidrogen yang dapat digunakan untuk membangkitkan turbin atau mesin pembangkit energi listrik (Moya, et al., 2017).



Gambar 2. 3 Proses Gasifikasi

Sumber: Byun, *et al* , 2014

3. Pirolisis : proses mengonversi limbah tanpa oksigen pada suhu dan tekanan tinggi menjadi produk energi. Metode ini mirip dengan gasifikasi karena bisa diterapkan untuk semua jenis limbah padat (Perrot & Subiantoro, 2018). Pada pirolisis dibutuhkan perlakuan awal, yaitu separasi, untuk memisahkan komponen kaca, logam, dan *inert materials.* Dari proses pirolisis dihasilkan gas, cairan, dan residu padat dimana gas terdiri atas kandungan gas metan, hidrogen, karbon monoksida, dan karbon dioksida. Kelebihan dari proses ini adalah peralatan mudah dipasang, tidak dibutuhkan proses pemisahan sampah, minimasi dampak lingkungan, dan hasil proses yang bisa digunakan sebagai bio-produk, energi, serta bahan bakar (Department for Environment Food and Rural Affairs from UK, 2014).



Gambar 2. 4 Proses Pirolisis

Sumber: Demoral, *et.al* , 2018

Berikut adalah rekap untuk teknoogi WTE, komposisi sampah yang digunakan, luaran dan residu proses pengolahan sampah.

Tabel 2. 1 Teknologi WTE

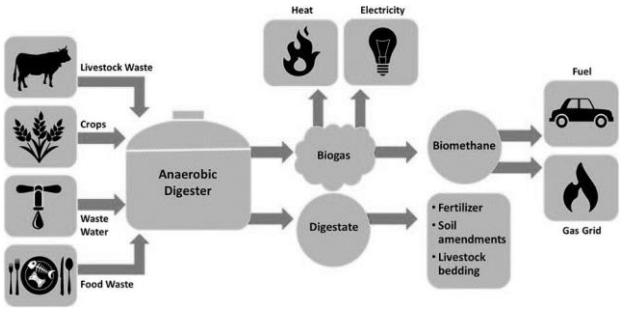
Teknologi	Komposisi Sampah	Luaran	Residu
Pembakaran	Sampah pemukiman, sampah komersil dan industri, sampah konstruksi dan pembangunan, sisa bahan bakar	Energi panas, listrik, material sisa yang bisa dimanfaatkan lebih lanjut	Abu, polusi udara, logam
Gasifikasi	Sisa bahan bakar, sampah pemukiman, sampah komersil dan industri, sampah konstruksi dan pembangunan, sampah organik	Energi panas, listrik, gas	Abu, polusi udara
Pirolisis	Sampah homogen dari hasil sortir sampah komersil, industri, pembangunan dan konstruksi, hasil sortir sampah perkotaan (plastik), dan sampah organik	Gas, Minyak pirolisis, biochar	Polusi udara
Pengolahan secara mekanik atau biologis	Residu sampah perkotaan, sampah komersil dan industri, sampah organik	Biogas, listrik, bahan bakar, sampah tersortir	Air, polusi udara, material sisa yang tidak berguna
Anaerobic Digestion	Sampah makanan, sampah organik	Kompos, panas, listrik, biogas	Air lindi, material sisa yang tidak berguna

Teknologi	Komposisi Sampah	Luaran	Residu
Fermentasi	Sampah organik dengan kadar gula tinggi (jagung, limbah tebu, dsb)	Alkohol, etanol untuk bahan bakar	Cairan reside, air lindi

2.3.1.2 Proses Biokimia

Berikut merupakan jenis proses biokimia untuk mengolah sampah menjadi energi:

1. *Anaerobic digestion* merupakan proses dekomposisi sampah melalui bakteri tanpa udara. Dari proses ini dihasilkan gas metan dan karbon dioksida. Gas metan yang dihasilkan bisa dirubah menjadi energi listrik. Proses ini memiliki kelebihan yaitu emisi karbon dioksida yang dihasilkan lebih rendah, adanya kemungkinan valorisasi limbah organik, dan penurunan emisi *odor* akibat proses pembakaran yang tidak sempurna. Akan tetapi, metode in kurang efektif untuk mengurangi jumlah penumpukan sampah secara masif karena proses yang berjalan lama dan hanya bisa diaplikasikan pada sampah biodegradable atau sampah organik (Perrot & Subiantoro, 2018). Proses ini terbagi ke dalam dua jenis teknik yaitu teknik "basah/ *wet*" dan teknik "kering/ *dry*". Sampah cair diproses dengan teknik basah dan dihasilkan biogas serta air jernih. Sedangkan sampah kering diproses melalui teknik kering dan dihasilkan energi panas, biogas, serta pengurangan jumlah sampah di tempat pembuangan akhir (Moya, et al., 2017).



Gambar 2. 5 Proses Pirolisis

Sumber: EESI, 2017

2. *Direct biological conversion* : merupakan proses fermentasi (biokimia) sampah untuk menghasilkan beragam biofuel dan bioproduk (US Department of Energy, 2019). Proses ini terbagi ke dalam dua proses yang berbeda yaitu proses aerobik atau komposting (melibatkan oksigen) dan proses anaerobik (tanpa melibatkan oksigen). Hasil proses anaerobik berupa gas metan dan karbon dioksida.

Tabel 2. 2 Peluang dan Tantangan Penerapan WTE

Waste to Energy	
Peluang/ Keuntungan	**Tantangan/ Resiko**
1. Produksi produk yang bermanfaat (energi) 2. Pengurangan emisi gas rumah kaca 3. Sumber energi terbarukan bagi negara 4. Pembangunan ekonomi dari adanya investasi 5. Lapangan pekerjaan baru 6. Peningkatan pemulihan sumber daya 7. Pengurangan ketergantungan pada TPA 8. Memperpanjang kapasitas TPA 9. Menciptkan nilai pada sampah	1. Resiko pembentukan sampah yang berlebih 2. Resiko polusi udara 3. Resiko kontaminasi tanah

2.3.2 Waste to Product

Pengolahan sampah menjadi produk (*waste to product)* adalah proses pemanfaatan kembali sampah sebagai sumber daya yang bisa digunakan untuk memproduksi barang atau produk yang berguna bagi masyarakat (El-Maghraby, et al., 2014). *Waste to product* cocok diterapkan pada kota metropolitan dimana kapasitas penampungan sampah akhir terbatas.

2.3.2.1 Daur Ulang Sampah (*Recycling*)

Daur ulang sampah merupakan proses penggunaan kembali material sampah. Adapun produk yang biasanya digunakan kembali seperti: kaleng aluminium, kemasan makanan, kaleng aerosol, botol plastik, botol kaca, kertas, majalah, koran, dan kardus. Proses daur ulang menjadi produk baru dari produk ini relatif lebih mudah karena komponen penyusun produk yang tunggal. Pada proses daur ulang seringkali dibutuhkan biaya yang tinggi akibat proses pengumpulan dan pemilahan sampah yang mahal, hal ini dikarenakan kondisi sampah yang tercampur (El-Maghraby, et al., 2014). Proses daur ulang dapat diklasifikasikan berdasarkan urutan prosesnya, yaitu: (1) *product recycling* : dimana komposisi kimia dan bentuk fisik produk tetap sama namun produk tidak digunakan seperti tujuan awal pembentukannya (penggunaan botol untuk material bangunan), (2) *material recycling* : dimana bentuk fisik produk diubah namun komposisi kimianya tetap sama (proses peleburan logam), dan (3) *feedstock recycling* : bentuk fisik dan komposisi kimia diubah (proses *de-polymerization*) (Bartl, 2014).

2.3.2.2 Komposting

Proses komposting mengolah sampah organik seperti sisa makanan dan kertas menjadi produk kompos yang dapat digunakan sebagai pupuk kebutuhan agrikultur atau kesuburan tanah. Metode komposting terbagi menjadi tiga yaitu secara aerobik, anaerobik dan *hybrid*. Metode pengomposan aerobik menggunakan bantuan udara pada proses penguraian sampah dan tidak menghasilkan bau. Sedangkan proses pengomposan anaerobik tanpa menggunakan bantuan udara dan memaksimalkan potensi gas metan dari sampah (El-Maghraby, et al., 2014).

2.4 Pengelolaan Sampah Padat di Surabaya

Jumlah produksi sampah oleh penduduk Surabaya mencapai 2,164.4 ton per hari, dengan komposisi 68% dari pemukiman penduduk, 16% dari pasar, 11% dari komersil/ industri, dan 5% dari jalan atau ruang terbuka (DKRTH, 2020). Pengelolaan sampah domestik Surabaya dikelola oleh DKRTH dengan menerapakan sistem pengelolaan sampah terpadu dengan menerapkan prinsip *reduce*, *reuse*, dan *recycle* (3R), pembangunan rumah kompos dan pusat daur ulang, serta pembangkit listrik tenaga sampah. Alur pengelolaan sampah yaitu sampah perkotaan yang telah terbentuk dari pemukiman masyarakat kemudian dikumpulkan ke tempat pembuangan sampah sementara (TPS) terdekat. Pengumpulan ini dilakukan oleh petugas khusus yang digaji secara mandiri oleh masyarakat. Selain dikumpulkan ke TPS, beberapa daerah di Surabaya mengumpulkan sampah ke fasilitas TPST/ TPS 3R yang dimiliki oleh Pemerintah Kota Surabaya. Pada fasilitas ini sampah anorganik akan dipilah dan dijual ke pengepul, sedangkan sampah organik berupa sampah makanan dan sampah dedauanan akan digunakan untuk bahan baku kompos. Pada proses pengumpulan sampah, bank sampah juga memiliki peran dalam proses pengumpulan sampah terpilah dari masyarakat. Dimana masyarakat bisa menjual sampah terpilah di bank sampah dan mendapatkan imbalan yang bisa ditabung.

Proses lanjutan dari sampah yang telah terkumpul di TPS yaitu proses pengangkutan sampah ke fasilitas pegolahan akhir sampah (TPA) yang berlokasi di Benowo, Surabaya Barat. Proses pengangkutan dilakukan dengan menggunakan kendaraan pengangkutan yang dimiliki oleh DKRTH. Dari seluruh TPS yang ada

di TPA Benowo, sekitar 75% sampah yang diangkut secara mandiri oleh DKRTH, sedangkan sisanya diangkut oleh mitra dari DKRTH (rekanan) setiap harinya. Di TPA, pengelolaan sampah dilakukan oleh PT. Sumber Organik yang bekerja sama dengan Pemerintah Kota Surabaya. Dimana kerjasama ini telah berlangsung sejak tahun 2012 dengan masa kontrak selama 20 tahun hingga tahun 2032. Pengelolaan sampah di TPA Benowo saat dilakukan dengan proses penimbunan sampah, pengolahan air lindi dengan fasilitas IPAL, dan pengolahan gas metan sampah menjadi listrik pada fasilitas LFG Power Plant. Selain itu, saat ini juga tengah dikembangkan fasilitas pengolahan sampah baru yaitu pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSa) dengan teknologi gasifikasi, dimana teknologi ini diharapkan dapat mengurangi jumlah timbunan sampah di TPA. Fasilitas PLTSa diproyeksikan dapat mengolah sampah sebanyak 1,000 hingga 1,700 ton setiap harinya dan menghasilkan listrik sebesar 12 MW per bulannya.

2.5 Peraturan Pengelolaan Sampah Padat Perkotaan

Sampah padat perkotaan di Indonesia didominasi oleh sampah rumah tangga dan sejenis rumah tangga yang diatur dalam UU. No. 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah. Di dalam undang-undang disebutkan bahwa pengelolaan sampah bertujuan untuk meningkatkan kesehatan masyarakat dan kualitas lingkungan serta menjadikan sampah sebagai sumber daya (*resource management*). Pengelolaan sampah yang dilakukan terdiri atas proses pengurangan sampah yang meliputi proses pembatasan timbulan sampah, pendauran ulang sampah, dan atau pemanfaatan kembali sampah, serta proses penanganan sampah yang meliputi proses pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pemrosesan akhir (Undang Undang Republik Indonesia, 2008).

Selanjutnya, dalam rangka menstrukturkan kebijakan dan strategi pengelolaan sampah rumah tangga, pemerintah Indonesia menerbitkan Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sejenis Sampah Rumah Tangga Nasional atau disingkat Jakstranas yang termuat dalam Peraturan Presiden Nomor 97 Tahun 2017. Dalam Jakstranas disebutkan bahwa pada tahun 2025 target pengelolaan sampah Indonesia adalah 100% dalam rangka mewujudkan Indonesia Bersih Sampah 2025. Jabaran target ini yaitu 30% target pengurangan

sampah dengan mencegah proses penumpukan sampah, daur ulang, dan pemanfaatan kembali, dan 70% target penanganan sampah dengan proses pemilahan, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pemrosesan akhir (Peraturan Presiden, 2017).

Selain itu, dalam rangka merespon Jakstranas, konsep dasar penghargaan Adipura juga berubah. Perubahan ini didasari karena masih adanya permasalahan dasar pengelolaan sampah dari penerapan Adipura sebelumnya yaitu mayoritas sampah masih dibuang ke TPA dengan sistem *open dumping*, tingginya indeks perilaku ketidak pedulian lingkungan hidup masyarakat Indonesia, trend peningkatan komposisi sampah plastik, dan minimnya peraturan mengenai tanggung jawab produsen sampah. Konsep Adipura 2025 sekarang adalah berbasis data kondisi riil, membagi kota berdasarkan sistem klasifikasi, dan menggunakan paradigma "bergerak ke hulu" dalam rangka mengoptimalkan proses pengurangan sampah serta berfokus pada pembangunan kota yang berkelanjutan. KLHK mengharapkan adanya Adipura 2025 ini dapat membantu perwujudan kota yang bersih, teduh (hijau), dan berkelanjutan. Terdapat penambahan indikator penilain baru dalam penghargaan ini yaitu adanya Jakstrada di daerah, neraca pengelolaan sampah (kapasitas pengolahan dan jumlah sampah yang harus diolah), operasional TPA, dan luas ruang terbuka hijau (KLHK, 2019)

Pengelolaan sampah di Kota Surabaya diatur dalam Peraturan Daerah Kota Suabaya Nomor 5 Tahun 2014 mengenai pengelolaan sampah dan kebersihan di Kota Surabaya. Respon Surabaya terhadap adanya Jakstranas melalui terbentuknya Peraturan Walikota Surabaya Nomor 64 Tahun 2018 mengenai Kebijakan dan Strategi Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga tingkat daerah atau disebut Jakstrada. Pada Jakstrada termuat arah kebijakan pengurangan dan penanganan sampah serta strategi, program, dan target pengurangan serta penanganan sampah di Surabaya hingga tahun 2025 (Walikota Surabaya, 2018).

2.6 Konsep Keberlanjutan (*Sustainability*)

Keberlanjutan (*sustainability*) adalah tidak terganggunya kebutuhan masa depan dari pemakaian kebutuhan saat ini. Terdapat tiga pilar utama dalam

keberlanjutan yaitu: ekonomi (*economic*), lingkungan (*environmental*), dan sosial (sosial) yang juga terkenal dengan sebutal *Profits, Planet,* dan *People* (3P). Konsep keberlanjutan mendorong pengambilan keputusan yang mempertimbangkan dampak jangka panjang dari aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan (Grant, 2020). Berikut adalah penjabaran kriteria dari ketiga aspek keberlanjutan.

Tabel 2.3 Kriteria Keberlanjutan

Aspek	Kriteria	Detail Kriteria
Ekonomi	Pertumbuhan, Perkembangan, Produktivitas, Penurunan	Adanya program yang lebih efisien (pembiayaan) dan lebih efektif , Efisiensi proses, Meningkatkan pendapatan
Sosial	Pemberdayaan, Ekuitas, Aksesibilitas, Partisipasi, Berbagi, Budaya, Stabilitas	Bermanfaat bagi lingkungan sekitar, Meningkatkan kemakmuran masyarakat, Mengenalkan budaya
Lingkungan	Penyatuan ekosistem, Biodiverisitas, Sesuai kapasitas	Penjagaan sistem alam, perencanaan lingkungan, adaptasi terhadap peraturan lingkungan, perlinfungan lingkungan

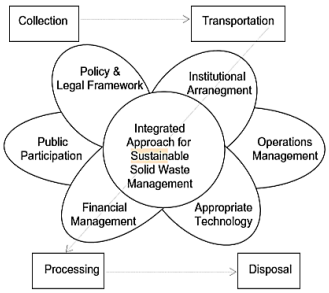
Sumber: Basiago, 1999

2.7 Sistem Pengelolaan Sampah Padat yang Berkelanjutan (*Sustainable Solid Waste Management*)

Sistem pengelolaan sampah padat yang berkelanjutan adalah sistem pengelolaan sampah yang dikelola oleh masyarakat setempat, disesuaikan dengan keadaan dan permasalahan kota terkait, memanfaatkan dan mengembangkan kapasitas pemangku kepentingan terkait, baik masyarakat, pengguna layanan pengelolaan, pemerintah, petugas, dan lain sebagainya (Agbaeze, et al., 2014). Pengelolaan sampah padat yang berkelanjutan sangat penting diterapkan untuk penghematan sumber daya alam yang digunakan, pengurangan emisi gas yang tidak diperlukan, dan perlindungan terhadap kesehatan masyarakat serta ekosistem lingkungan (Jassim, 2017). Proses pengelolaan sampah yang berkelanjutan dengan strategi “zero emissions” akan mendukung pencapaian tiga tujuan dalam SDGs, yaitu: *environmental protection, economic sustainability*, dan *public well being.*

Sistem pengelolaan sampah padat yang berkelanjutan harus ditinjau dari seluruh siklus sampah, meliputi proses produksi sampah, pengumpulan,

pengangkutan, dan pembuangan akhir sampah. Prinsip dari strategi sistem pengelolaan sampah padat yang berkelanjutan yaitu: (1) mengurangi jumlah produksi sampah, (2) meningkatkan nilai sampah melalui proses daur ulang, perbaikan, dan penggunaan kembali, dan (3) memastikan pembuangan sampah yang aman serta ramah lingkungan. Keberlanjutan pengelolaan sampah padat perkotaan ini bergantung pada tingkat efisiensi dan efektivitas manajemen pengelolaan sampah padat perkotaan tersebut (Agbaeze, et al., 2014).



Gambar 2. 6 *Integrated Sustainable Solid Waste Management*

Sumber: Khatib, 2011

Pada tahun 1990-an, dikembangkan pendekatan pengelolaan sampah padat berkelanjutan yang terintegrasi (*Integrated Sustainable Solid Waste Management*) oleh *Collaborative Working Group On Solid Waste Management in Low and Middle Income Countries* (CWG), sebagai suatu pendekatan sistem yang mencakup pemangku kepentingan (pihak yang berkontribusi pada pengelolaan sampah padat: penghasil sampah, penyedia layanan, pemakai layanan, sektor swasta, dsb), elemen (komponen teknis pengelolaan sampah padat baik dari proses pembentukan sampah, pengumpulan, pengangkutan, dan pengolahan sampah), dan aspek yang diperlukan untuk pengelolaan sampah padat yang berkelanjutan seperti keuangan, sosial, kelembagaan, politik, hukum, serta lingkungan.

Prinsip dari ISSWM yaitu: (1) pemanfaatan teknologi dan operasi yang efisien dan handal, (2) aspek teknis dengan dampak lingkungan yang rendah serta pengurangan dan pemisahan limbah dari sumber, (3) pendapatan dari pengelolaan sampah digunakan kembali untuk mengelola sampah, (4) pengelolaan sampah yang aman, memadai, dan terjangkau yang dirasakan oleh seluruh lapisan masyarakat, (5) adanya keterlibatan seluruh pemangku kepentingan dalam perencanaan dan implementasi aktivitas manajemen pengelolaan sampah, dan (6) adanya kebijakan

atau peraturan yang mendorong keterlibatan pemangku kepentingan termasuk organisasi non-pemerintahan dan sektor swasta (Khatib, 2011). Selain itu, pengelolaan sampah yang berkelanjutan perlu memperhatikan aspek dampak lingkungan, keuangan, manfaat ekonomi, sosial dan budaya, institusi, politik, dan hukum (Premakumara, et al., 2011).

2.8 *Sustainable Development Goals (SDGs)*

Sustainable Development atau pembangunan yang berkelanjutan adalah konsep pembangunan untuk memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengganggu pemenuhan kebutuhan di masa depan. *Sustainable Development Goals* (SDGs) merupakan hasil kesepakatan dari 193 negara anggota PBB pada tahun 2015, dengan judul *"Transforming Our World the 2030 Agenda for Sustainable Development"* yang berlaku mulai tahun 2016 hingga 2030. SDGs dirumuskan untuk mengatasi permasalahan global yang tertuang ke dalam 17 tujuan dengan 169 target capaian. Seluruh tujuan SDGs bertujuan untuk mencapai kehidupan bumi yang damai, sejahtera, dan adil. Terdapat 5 prinsip dasar (5P) dari SDGs yaitu *people* (manusia), *planet* (bumi), *prosperity* (kemakmuran), *peace* (perdamaian), dan *partnership* (kerjasama) yang digunakan untuk menyeimbangkan dimensi sosial, lingkungan, dan ekonomi dunia.

Terkait permasalahan sampah, dalam SDGs disebutkan bahwa negara perlu menerapkan pengelolaan sampah yang berkelanjutan untuk menjamin kemudahan akses ke layanan pengumpulan sampah, terhentinya pembuangan yang tidak terkontrol, dan terhentinya pembakaran sampah secara terbuka sehingga pada tahun 2030 dapat tercapai pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan. Untuk mencapai ini, melalui *United Nations Environment Programme* dan *International Solid Waste Association,* dibentuklah *Global Waste Management Outlook* yang berfokus menyusun strategi keberlanjutan pengelolaan sampah dalam membantu pencapaian SDGs.

Gambar 1. 6 17 Tujuan dalam Sustainable Development Goals

Sumber: PBB, 2019

Berikut adalah seluruh tujuan yang akan dicapai dalam *Global Waste Management Goals* dalam rangka rangka membantu pencapaian pengelolaan sampah yang berkelanjutan di dunia berdasarkan SDGs.

Tabel 2. 4 Korelasi *Global Waste Management Goals* dengan *Sustainable Development Goals*

Global Waste Management Goals	***Sustainable Development Goals***
By 2020, ensure access for all to adequate, safe and affordable solid waste collection serviceS	*Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages* *11 Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable*
By 2020, eliminate uncontrolled dumping and open burning	*3 Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages* *12 Ensure sustainable consumption and production patterns*
By 2030, ensure the sustainable and environmentally sound management of all wastes, particularly hazardous wastes	*12 Ensure sustainable consumption and production patterns*
By 2030, substantially reduce waste generation through prevention and the 3Rs (reduce, reuse, recycle) and thereby create green jobs	*12 Ensure sustainable consumption and production patterns*
By 2030, halve global per capita food waste at the retail and consumer levels and reduce food losses in the supply chain	*2 End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture*
Create green jobs through the circular economy Build sustainable livelihoods by integrating the informal sector into mainstream waste and resource management in the poorest citie	*1 End poverty in all its forms everywhere* *8 Promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and*

Global Waste Management Goals	*Sustainable Development Goals*
	productive employment and decent work for all
By 2030, reduce industrial waste generation at source through waste prevention, resource efficiency and greater adoption of clean and environmentally sound technologies and industrial processes	*8 Promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all* *9 Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialisation and foster innovation*
By 2020, eliminate uncontrolled dumping and open burning	*6 Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all* *14 Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources* *15 Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss*
(By 2030, ensure environmentally sound management of all wastes)	*7 Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all* *13 Take urgent action to combat climate change and its impacts*

Sumber: *Global Waste Management Outlook* , 2015

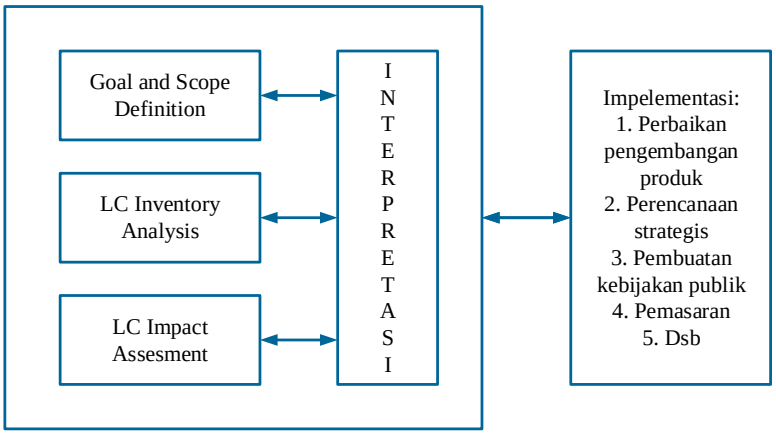
2.9 Pengukuran Dampak Lingkungan dengan *Life Cycle Assesment*

Life cycle assesment merupakan metode untuk mengidentifikasi dampak lingkungan yang muncul pada siklus hidup produk (*product life cycle*), mulai dari ekstraksi material bahan baku (*cradle*) hingga akhir produk digunakan (*grave*). *Life cycle assesment* mengukur dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses ekstraksi material bahan baku, proses pengiriman material bahan baku, proses manufaktur, proses pengiriman ke konsumen, proses penggunaan produk, perbaikan produk, pemeliharaan produk, hingga produk itu dibuang atau digunakan kembali (Vinodh, et al., 2015).

2.9.1. Siklus Hidup Produk (Product Life Cycle)

Berikut adalah siklus hidup produk pada proses pengelolaan sampah yang akan diukur dalam penelitian ini.

1. Proses distribusi merupakan pengangkutan sampah dari TPS ke TPA Benowo. Dampak lingkungan diukur berdasarkan jenis dan bahan bakar kendaraan yang digunakan serta jarak tempuh proses pengangkutan.



Gambar 2. 7 LC Assesment Framework

2. Pembuangan produk/ daur ulang produk (akhir siklus hidup produk) merupakan tahap akhir dari siklus hidup produk meliputi aktivitas pemusnahan atau daur ulang produk. Penggunaan energi dan residu yang timbul dari proses pemusnahan / daur ulang produk akan dipertimbangkan dalam proses perhitungan dampak lingkungan. Proses yang diamati meliputi proses komposting, daur ulang, gasifikasi, dan degradasi sampah secara alami.

2.9.2. Life Cycle Assesment Framework

Berikut adalah empat tahapan yang digunakan dalam pengukuran dampak lingkungan pada penelitian ini.

1. Perumusan tujuan dan batasan

Tujuan dalam *LCA Assesment* beragam, seperti proses identifikasi dampak lingkungan suatu produk, membandingkan dampak lingkungan antar produk, atau ke duanya. Sedangkan batasan dalam LCA *Assesment* mencakup seberapa jauh pengukuran dampak lingkungan dilakukan, baik mulai dari tahap ekstraksi material bahan baku hingga proses pemusnahan atau daur ulang. Penelitian ini untuk mengukur dampak lingkungan yang dihasilkan dari pengelolaan sampah yang

meliputi proses pengumpulan sampah dari masyarakat hingga tempat pembuangan akhir dan pengolahan sampah di TPA Benowo.

2. *Life Cycle Inventory Analysist* (LCIA)

LCIA digunakan untuk menggambarkan aliran material dan energi dalam proses, yang menggambarkan *input* dan *output* dalam siklus hidup produk. *Input* ini meliputi aliran material seperti air, material bahan baku, dan sumber daya lain sedangkan energi digunakan untuk memproses produk. *Output* meliputi produk, jasa, emisi, dan limbah. LCIA digunakan untuk membantu proses analisis dari dampak penggunaan sumber daya dan emisi yang dilepaskan ke lingkungan. Pada LCIA akan dianalisis masukan dan keluaran dari proses pengumpulan dan pengolahan sampah.

3. *Life Cycle Impact Assesment* (LC *Impact Assesment*)

LC *Impact Assesment* berfungsi untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari hasil LCIA. Indikator dampak lingkungan yang diperoleh, kemudian akan dibobotkan untuk setiap kategori dampak dengan proses normalisasi dan pembobotan. Proses ini akan memperlihatkan dampak lingkungan yang paling dominan.

4. Interpretasi

Pada tahap ini akan dilakukan proses identifikasi, kuantifikasi, dan evaluasi hasil LC *Impact Assesment.*

2.10 Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah

Pemodelan sistem merupakan proses mendeskripsikan atau menganalogikan sistem dan semua komponen penting dari sistem dalam rangka membantu menggambarkan kondisi sistem yang tidak bisa diamati secara langsung. Pada pemodelan sistem ditampilkan aktivitas sistem, batasan sistem, komponen dan sub sistem, hubungan dinamik/ statis, masukan sistem, serta keluaran sistem (Daellenbach & McNickle, 2005). Sistem dinamik merupakan pendekatan berbasis komputer untuk perancangan dan analisis kebijakan dengan mempelajari perilaku dinamik dari sistem yang kompleks (J.W, Forrester, 1969).

Penyelesaian permasalahan yang timbul akibat sampah memerlukan pendekatan yang terintegrasi dan holistik (Bing, et al., 2016). Pendekatan

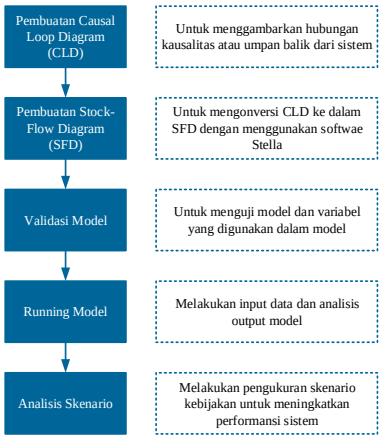
pemodelan sistem dinamik cocok digunakan untuk menyelesaikan permasalahan manajemen pengelolaan sampah dikarenakan kompleksitas sistem pengelolaan sampah, adanya saling ketergantungan antar variabel sistem seperti jumlah pengangkutan sampah akan bergantung pada jumlah sampah yang diangkut, dan keputusan DKRTH mengenai jumlah armada serta kapasitas pengangkutan yang disediakan. Kemudian, dalam sistem ini juga terdapat hubungan timbal balik antar variabel, seperti misalnya jumlah penumpukan sampah akan mempengaruhi kapasitas pengolahan sampah yang harus disediakan dan kapasitas pengolahan sampah ini juga akan berpengaruh pada pengurangan jumlah penumpukan sampah. Variabel pengolahan sampah akan dipengaruhi dan mempengaruhi jumlah penumpukan sampah, begitu juga sebaliknya. Pemodelan sistem dinamik bisa digunakan untuk memodelkan sistem pengolahan sampah secara komprehensif, mempelajari perilaku sistem pengolahan sampah selama periode waktu tertentu dan mengetahui hubungan timbal balik antar variabel sistem pengolahan sampah, seperti penumpukan sampah, pengangkutan sampah, serta pengolahan sampah.

Asumsi yang digunakan dalam pemodelan sistem dinamik, yaitu: adanya umpan balik dalam sistem sudah menggambarkan perilaku sistem yang kompleks, seperti misalnya adanya umpan balik dari proses penumpukan, pengangkutan, dan pengolahan sampah. Hal ini dikarenakan peningkatan jumlah penumpukan sampah akan mengakibatkan peningkatan jumlah sampah yang diangkut dan diolah. Demikian sebaliknya, peningkatan jumlah sampah yang diolah dan diangkut akan menurunan jumlah penumpukan sampah. Asumsi lain yaitu kemampuan menggambarkan kompleksitas dinamis sistem bisa didapatkan dari pendekatan interview, diskusi kelompok, dan atau analisis dokumen tertulis, perubahan parameter model untuk menggambarkan perilaku historis (*reference modes of behaviour*) sehingga perilaku model bisa semirip mungkin dengan kondisi aslinya (Yearworth, 2014).

2.10.1. Causal Loop Diagram (CLD)

Model *Causal-Loop Diagram* (CLD) menggambarkan informasi umpan balik dalam sistem berupa hubungan kausalitas (*cause and effect*) (Ford, 2010). CLD diaplikasikan untuk menggambarkan hubungan timbal balik antar variabel sistem. Dalam pembuatan CLD terdapat tanda (+) yang menggambarkan hubungan

positif antar variabel, dimana jika komponen variabel yang mempengaruhi berubah atau meningkat maka komponen variabel yang dipengaruhi akan berubaha atau meningkat juga, dan tanda (–) yang menggambarkan hubungan negatif antar variabel, dimana jika komponen varibael yang mempengaruhinya meningkat maka komponen variabel yang dipengaruhi justru akan menurun, begitu juga sebaliknya (Malabay, 2008).



Gambar 2. 8 Tahapan Pemodelan Sistem Dinamik

Sumber: Sterman, 2000

CLD dapat digunakan sebagai model konseptual yang dapat menggambarkan beragam aspek dari sistem dan interaksi dinamik dalam sistem (Babalola, 2019). Berikut merupakan contoh pembuatan diagram sebab akibat dari pengolahan sampah di Surabaya.

Gambar 2. 9 CLD Pengelolaan Sampah di Surabaya

Pada Gambar 2.17 dapat dilihat bahwa jumlah penumpukan sampah akan mempengaruhi dan dipengaruhi oleh jumlah pengangkutan sampah serta jumlah sampah yang di olah akan dipengaruhi oleh jumlah sampah yang terangkut dan akan mempengaruhi jumlah penumpukan sampah. Pemodelan sistem dengan menggunakan pendekatan CLD ini memiliki kelebihan seperti memberikan gambaran permasalahan secara menyeluruh dan komprehensif, serta adanya gambaran hubungan sebab dan akibat sehingga dapat membantu dalam perumusan skenario kebijakan dan pengambilan keputusan (Malabay, 2008). Hubungan sebab

dan akibat antar variabel akan menghasilkan sebuah siklus (*loop*). *Closed loop* dalam sistem menggambarkan basis perilaku dinamik pada sistem (Sterman, 2000). Terdapat dua macam *closed feedback* loop yaitu *goal seeking* atau *stabilizing behavior* atau *balancing feedback* dan *reinforcing feedback* atau *amplifying behavior* . *Reinforcing feedback* merupakan *loop* yang memiliki arah yang sama untuk seluruh hubungan kausal antar variabel. *Balancing feedback* apabila terdapat arah *loop* yang tidak sama pada hubungan kausal antar variabel (Sterman, 2004). Pada Gambar 2.17, dapat dilihat bahwa tipe *closed loop* adalah *stabilizing behavior* (S) karena arah *loop berbeda.* Pendekatan CLD memiliki keterbatasan seperti penggambaran sistem yang tidak komprehensif karena tidak menggambarkan sistem secara detail dan pada CLD tidak dibedakan antara *stock* serta *flows* (Sterman, 2000).

2.10.2. Stock and Flow Diagram (SFD)

Stock and Flow Diagram (SFD) digunakan untuk mengevaluasi dinamika model dan menyimulasikan sistem. Terdapat 4 modul yang digunakan dalam pengembangan model SFD di STELLA, yaitu: stok (*stocks*), aliran (*flows*), konverter (*converters*), dan konektor (*connectors*). Pada permasalahan pengolahan sampah, jumlah penumpukan sampah, jumlah sampah yang diangkut, dan jumlah sampah yang diolah merupakan *stocks* karena besar nilainya ditentukan berdasarkan hasil akumulasi dari aliran informasi yang masuk atau keluar. Seperti misalnya, nilai jumlah sampah yang diangkut ditentukan berdasarkan hasil akumulasi aliran informasi pengangkutan dan pengolahan sampah. Jumlah armada, kapasitas armada, dan jumlah ritase adalah informasi (*converters*) yang digunakan untuk menentukan jumlah kapasitas pengangkutan. Sedangkan informasi kapasitas tiap teknologi dan jumlah teknologi pengolahan digunakan untuk menentukan nilai kapasitas pengolahan. Nilai kapasitas pengangkutan dan pengolahan ini digunakan sebagai informasi berapa jumlah sampah yang bisa diangkut dan diolah. Hubungan antar informasi , aliran, dan stok tersebut bisa digambarkan dengan *connector*.

Gambar 2. 10 SFD Pengelolaan Sampah di Surabaya

2.10.3. Pengujian Model dan Validasi

Pengujian dan validasi model dilakukan untuk mendapatkan model yang *robust* dan output yang sesuai dengan tujuan penelitian. Forrester dan Senge (1980) menyebutkan beberapa pengujian yang digunakan untuk validasi struktur model sistem dinamik sebagai berikut (Forrester & Senge, 1980).

Tabel 2.5 Validasi Model Sistem Dinamik

Pengujian	Tujuan Pengujian
Kecukupan batas (*boundary adequacy*)	Untuk menentukan konsep dan struktur model yang penting dan mempengaruhi model. Uji kecukupan batasan dilakukan dengan menilai kecukupan batasan yang digunakan terhadap tujuan penelitian. Pengujian dilakukan dengan melihat pengaruh antar variabel dalam CLD. Pengujian ini akan melihat ada atau tidak adanya perubahan rekomendasi kebijakan apabila batasan model dirubah (Sterman, 2004).
Verifikasi struktur (*structure verification*)	Untuk memastikan struktur model konsisten dan relevan untuk dimodelkan. Uji struktur model digunakan untuk melihat kemiripan interaksi antar variabel dalam model (struktur model) terhadap interaksi sistem aslinya (struktur sistem). Validasi struktur dapat dilakukan dengan validitas konstruksi (valid secara ilmiah) dan dengan kestabilan struktur (*robustness* struktur dalam dimensi waktu) (Siswosudarmo, et al., 2001)**.**
Verifikasi parameter (*parameter verification*)	Untuk memastikan paramater dalam model konsisten dengan informasi deskriptif dan numerik dalam sistem. Uji parameter model dilakukan untuk melihat konsistensi nilai paramater model dengan melihat kesesuaian hubungan yang digambarkan melalui CLD. Pengujian ini dapat dilakukan melalui validasi input (membandingkan data historis dan data pada model) dan validasi logika (pengecekan logika model) (Maftuhah, 2013)**.**
Konsistensi Dimensi Satuan (*dimensional consistency*)	Untuk memastikan setiap rumus dalam sistem sesuai dengan kondisi sistem nyata.
Kondisi Ekstrim (*extreme conditions*)	Untuk memastikan perilaku logis dari sistem pada kondisi ekstrim. Uji kondisi ekstrim dilakukan dengan merubah nilai *input* dari *equation* model dengan nilai maksimum kemudian dilakukan pengecekan kewajaran *output* hasil simulasi (Sterman, 2004).
Uji Perilaku Model	Selain itu, terdapat uji perilaku model yang dilakukan dengan membandingkan perilaku model dengan perilaku kondisi aslinya melalui *output* yang dihasilkan dari simulasi dan data asli sejumlah replikasi dari simulasi (Barlas, 1996)**.**

2.10.4. Base Run Model

Proses *running* model fokus pada kondisi eksisting sistem, digunakan untuk mempelajari perilaku sistem pada kondisi eksisting.

2.10.5. Policy Scenarios Analysis

Tahap ini dimulai dengan perumusan skenario kebijakan, *running* model skenario dan melakukan analisis dari hasil simulasi model skenario. Tujuan pembuatan skenario yaitu meningkatkan performansi pengelolaan sampah Surabaya.

2.11 Penelitian Terdahulu

Pada sub bab ini akan dipaparkan mengenai penelitian terdahulu terkait penerapan LCA dan Sistem Dinamik pada analisis pengelolaan sampah.

Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Tujuan Penelitian
1	Deus, *et al* (2019)	*A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assesment and identification of best management practices*	LCA	Merumuskan indikator untuk mengukur dampak lingkungan dari manajemen pengelolaan sampah perkotaan di Sao Paulo, Brazil
2	Tonini, *et al* (2018)	*Environmental impacts of food waste: learnings and challenges from a case study on UK*	LCA	Mengukur dampak lingkungan dari pembentukan sampah makanan di 4 sektor rantai pasok makanan di UK, mulai dari pertanian, grosil, ecer, hingga penjual makanan
3	Ding, *et al* (2018)	*A system dynamics-based environmental benefit assesment model of construction waste reduction management at the design and construction stages*	Sistem Dinamik	Untuk mengukur dampak lingkungan dari metode pengurangan sampah konstruksi
4	Tseng, *et al* (2019)	*System Dynamics modeling of waste management, greenhouse gas emissions,*	Sistem Dinamik	Membandingkan 6 skenario pengelolaan sampah berdasarkan emisi gas rumah

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Tujuan Penelitian
		and environmental cost from convenience stores		kaca dan biaya dampak lingkungan yang dihasilkan
5	An, *et al* (2013)	Analisis Potensi Utilisasi Sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kota Metropolis: Suatu Pendekatan Model Berbasis Sistem Dinamik (Study Kasus: TPA Kota Surabaya)	Sistem Dinamik	Untuk mengetahui kondisi pengelolaan sampah di TPA dan mengusulkan alternatif utilisasi sampah
6	Agustia (2014)	Model Sistem Dinamik Pada Pengembangan Pengelolaan Sampah Kecamatan Gubeng, Kota Surabaya	Sistem Dinamik	Menentukan potensi reduksi sampah di Kecamatan Gubeng, Kota Surabaya
7	Yao, *et al* (2018)	*An integrated method of life-cycle assesment and system dynamics for waste mobile phone management and recycling in China*	LCA dan Sistem Dinamik	Analisis faktor lingkungan pada daur ulang sampah elektronik dan memprediksi keuntungan dari beragam metode daur ulang yang ada
8	Pinto, *et al* (2019)	*Integrating life cycle analysis into system dynamics: the case of steel in Europe*	LCA dan Sistem Dinamik	Untuk mengeksplor manfaat dari integrasi kedua metode dalam aplikasi konsep *circular economy* dan *industrial ecology*.
9	Onat, *et al* (2016)	*Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: a case for electric vehicles*	LCA dan Sistem Dinamik	Memperluas pengaplikasian LCA dengan memperhitungkan dampak makro, ekonomi, dan sosial, serta dampak dinamika keberlanjutan transportasi (TBL)
10	Ilhamsah, *et al* (2017)	*An Integrated Framework of System Dynamics and Life Cycle Assessment for Managing Sustainable Creative Industries*	LCA dan Sistem Dinamik	Mengembangkan model kebijakan industri kreatif yang berkelanjutan berdasarkan dampak aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan

Berdasarkan tabel penelitian terdahulu tersebut, Penelitian (1) hingga (5) digunakan sebagai langkah awal pemahaman pengelolaan sampah, pengukuran dampak lingkungan sampah dengan LCA, dan pemodelan sistem pengelolaan sampah dengan Sistem Dinamik secara terpisah. Kemudian, penelitian ini akan mengembangkan penelitian (6) dengan cakupan lebih luas yaitu pengelolaan sampah Surabaya. Penelitian ini akan mengadopsi penelitian (7) hingga (10) dalam proses intergrasi metode LCA dan Sistem Dinamik dalam pemodelan sistem pengelolaan sampah yang lebih komprehensif yang memperhatikan aspek makro dan aspek mikro dari paramater dampak lingkungan.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Pada Bab Metodologi Penelitian akan dibahas mengenai hipotesis dinamik, perumusan skenario kebijakan, dan prosedur penelitian. Prosedur penelitian berisi tahapan yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir terdiri dari prosedur pengukuran dampak lingkungan dengan LCA dan pemodelan Sistem Dinamik.

3.1. Hipotesis Dinamik

Hipotesis dinamik menjelaskan penyebab dari dinamika permasalahan. Dinamika sistem diperoleh dari peningkatan jumlah penumpukan sampah akan meningkatkan jumlah pengangkutan dan pengolahan sampah. Namun, di sisi lain, peningkatan pengolahan dan pengangkutan sampah akan menurunkan jumlah penumpukan sampah (R1). Peningkatan jumlah penumpukan sampah di TPA Benowo akan meningkatkan jumlah sampah yang harus di olah. Namun, di sisi lain, peningkatan jumlah pengolahan sampah di tempat pembuangan akhir akan mengurangi jumlah penumpukan sampah di TPA Benowo (R2).

3.2. Prosedur Penelitian

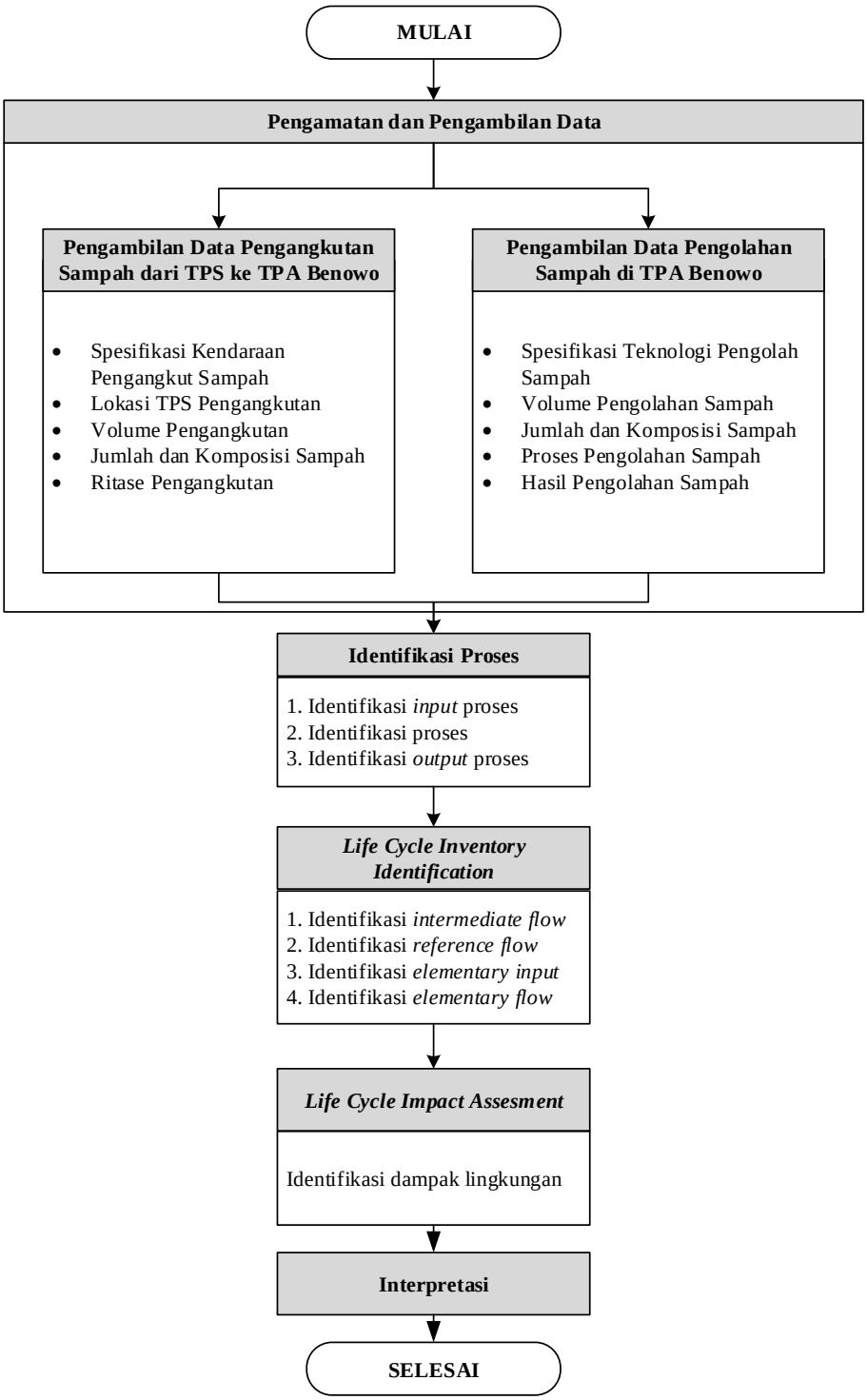
Pada sub bab ini akan menjelaskan tahapan dari penelitian yang meliputi prosedur pengukuran dampak lingkungan dengan LCA dan pemodelan Sistem Dinamik.

3.2.1. Pengukuran Dampak Lingkungan dengan LCA

Pengukuran dampak lingkungan dengan LCA meliputi tahap pengamatan dan pengumpulan data, identifikasi proses, *life cycle inventory analysist, life cycle impact assesment,* dan interpretasi.

3.2.1.1 Pengamatan dan Pengumpulan Data

Proses pengamatan dilakukan secara langsung pada proses pengangkutan sampah dari masyarakat ke tempat pembuangan akhir dan pengolahan sampah di TPA Benowo. Sedangkan pengumpulan data dilakukan secara langsung melalui pengamatan dan wawancara, serta secara tidak langsung melalui data sekunder dari *website* serta penelitian terdahulu.



Gambar 3. 1 Prosedur Pengukuran Dampak Lingkungan dengan LCA

3.2.1.2 Identifikasi Tujuan dan Batasan LCA

Tujuan berisi mengenai maksud dilakukannya LCA dan batasan digunakan untuk membatasi sistem yang diamati atau diukur.

3.2.1.3 Identifikasi Proses

Tahap ini digunakan untuk mendata detail *input*, proses, dan *output* proses pengangkutan dan pengolahan sampah.

Tabel 3. 1 Data Pengukuran Dampak Lingkungan

Data	Metode Pengambilan Data	Perencanaan Hasil Pengambilan Data
Pengambilan Data Pengangkutan Sampah dari TPS ke TPA Benowo		
Spesifikasi Kendaraan Pengangkut Sampah	Pencarian Data di DKRTH	Jenis Bahan Bakar
		Konsumsi Bahan Bakar per Satuan Jarak
		Kapasitas Pengangkutan
Lokasi TPS Pengangkutan	Pencarian Data di DKRTH	Jumlah TPS
		Alamat Lokasi TPS
Volume Pengangkutan	Pencarian Data di DKRTH	Rata-Rata Sampah yang Diangkut per Satuan Waktu
Jumlah dan Komposisi Sampah	Pencarian Data di DKRTH dan Penelitian Terdahulu	Jumlah dan Komposisi Sampah di TPS
Ritase Pengangkutan	Pencarian Data di DKRTH	Frekuensi Pengangkutan per Satuan Waktu
Pengambilan Data Pengolahan Sampah di TPA Benowo		
Spesifikasi Teknologi Pengolah Sampah	Pencarian Data di TPA Benowo, Internet, dan Penelitian Terdahulu	Kapasitas Pengolahan per Satuan Waktu
		Efisiensi Proses Pengolahan
Volume Pengolahan Sampah		Rata-Rata Sampah yang Diolah per Satuan Waktu
Jumlah dan Komposisi Sampah		Jumlah dan Komposisi Sampah di TPA Benowo
Proses Pengolahan Sampah		*Input* dan *Output* Proses
		Proses Sebelum dan Sesudah
		Proses Pengolahan Sampah
Hasil Pengolahan Sampah		Hasil Produk
		Emisi dan Residu Pengolahan Sampah

3.2.1.4 *Life Cycle Inventory Analysist*

Data yang telah dikumpulkan kemudian diidentifikasi berdasarkan *life cycle inventory* dan limbah yang dihasilkan. Terdapat empat macam *inventory flow*, yaitu

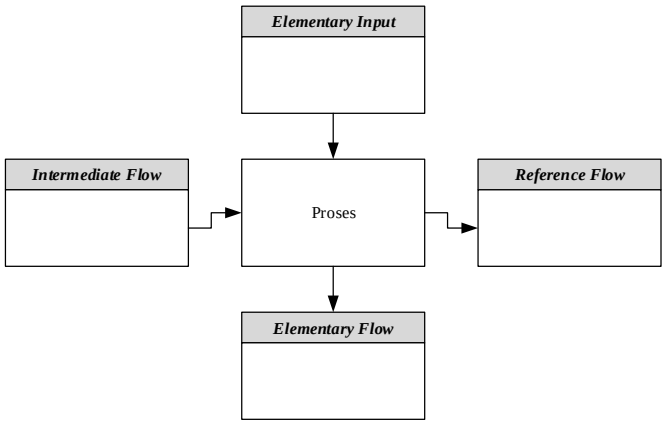
intermediate flow (*input* dari proses sebelumnya), *elementary input* (*input* dari lingkungan), *elementary flow* (*output* yang menyebabkan dampak lingkungan), dan *reference flow* (*output* yang diharapkan dari proses).

3.2.1.5 *Life Cycle Impact Assesment*

Tahap ini untuk mengukur dampak lingkungan berdasarkan aktivitas proses dan limbah yang dihasilkan. Hasil identifikasi menghasilkan karakteristik dampak lingkungan yang berdampak misalnya pada penipisan lapisan ozon, perubahan iklim, asidifikasi, pengurangan sumber daya, dan lain sebagainya.

3.2.1.6 Interpretasi

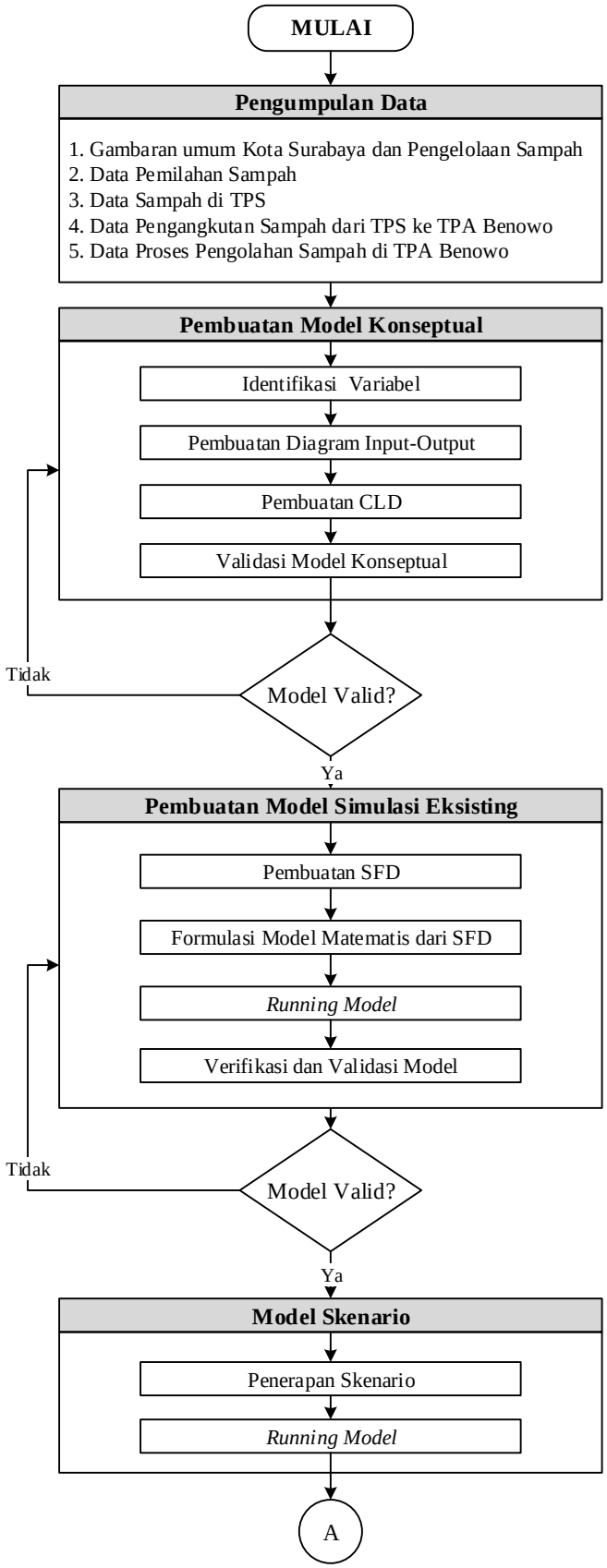
Pada tahap ini akan berisi hasil dampak lingkungan dari proses pengangkutan sampah dari masyarakat ke tempat pembuangan akhir dan pengolahan sampah di TPA Benowo.



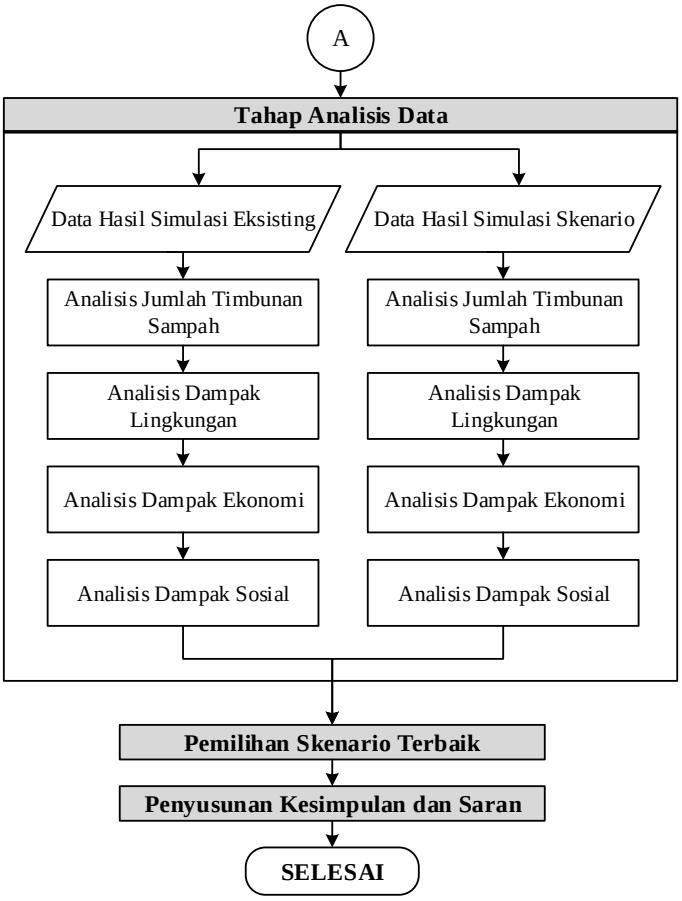
Gambar 3. 2 *Life Cycle Inventory Framework*

3.2.2. Pemodelan Sistem Dinamik dan Integrasi LCA dengan Sistem Dinamik

Tahap pemodelan sistem dinamik dimulai dari proses pengumpulan data, pembuatan model konseptual, pembuatan model simulasi, verifikasi dan validasi, analisis dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran.



Gambar 3.3 Prosedur Pemodelan Sistem Dinamik



Gambar 3.3 Prosedur Pemodelan Sistem Dinamik (Lanjutan)

3.2.2.1.Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data

Penelitian dimulai dengan tahap pengumpulan data secara sekunder. Data sekunder diperoleh dari penelitian sebelumnya, BPS Kota Surabaya, Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau, dan penelitian sebelumnya. Berikut merupakan jenis dan rincian metode pengambilan data.

Tabel 3. 2 Jenis dan Metodologi Pengumpulan Data

Data	Metode Pengambilan Data	Perencanaan Hasil Pengambilan Data
Gambaran umum Kota Surabaya	Pencarian data di BPS Kota Surabaya	Data kependudukan, produksi sampah Surabaya selama 5 tahun terakhir
	Pencarian data dari Internet dan Penelitian Sebelumnya	Data komposisi sampah Surabaya

Tabel 3.2 Jenis dan Metodologi Pengumpulan Data (lanjutan)

Data	Metode Pengambilan Data	Perencanaan Hasil Pengambilan Data
Pemilahan Sampah	Pencarian data dari Internet	Jumlah dan komposisi sampah yang masuk ke Bank Sampah dan Pusat Daur Ulang (ton/ bulan)
Sampah di TPS	Pencarian data di DKRTH Surabaya	Data lokasi TPS, jumlah kontainer bin di setiap TPS, jumlah dan komposisi sampah (ton/ bulan)
Pengangkutan Sampah dari TPS Ke TPA	Pencarian data di DKRTH Surabaya	Data jumlah unit, tipe, kapasitas kontainer truk sampah, ritase pengangkutan per bulan, konsumsi bahan bakar yang dimiliki DKRTH dan rekanan saat ini, data jumlah dan komposisi sampah yang masuk dari TPS ke TPA dari truk sampah
	Pencarian data dari Internet	Jarak antar lokasi titik keberangkatan truk sampah, TPS, dan TPA
Pengolahan sampah di TPA	Pencarian data dari Internet dan Penelitian Sebelumnya	Jumlah sampah di TPA saat ini, jumlah unit dan kapasitas fasilitas pengolahan sampah, jumlah dan komposisi sampah yang masuk dari TPS (ton/ bulan), jumlah sampah dari TPS yang diolah (ton/ bulan), residu pengolahan sampah (ton/ bulan), keluaran pengolahan sampah
Teknologi Pemilah Sampah	Pencarian data dari Internet dan Penelitian Sebelumnya	Kapasitas pengolahan (ton/ bulan), keluaran dan residu pengolahan
Data Dampak Lingkungan	Pengukuran dengan Metode LCA	Faktor dampak lingkungan proses pengangkutan dan pengolahan sampah

3.2.2.2.Tahap Pembuatan Model Konseptual

Tahap ini dimulai dengan identifikasi variabel dari sistem pengelolaan sampah sesuai dengan batasan sistem yang telah ditentukan. Tujuan identifikasi ini untuk memperdalam informasi dari pengelolaan sampah Surabaya yang meliputi sistem pengangkutan sampah dan pengolahan sampah di TPA. Identifikasi variabel akan meliputi aspek pembentukan sampah Surabaya, pemilahan sampah, penumpukan sampah di TPS, pengangkutan sampah dari TPS ke TPA, dan pengolahan sampah di TPA. Setelah variabel berhasil teridentifikasi, kemudian

dilanjutkan dengan proses pembuatan diagram *input* dan *output*. *Input* dibedakan menjadi *input* terkendali dan tidak terkendali. *Output* dibedakan menjadi *output* yang diharapkan dan tidak diharapkan. Kemudian, dilakukan pembuatan model *causal loop diagram* dari semua aspek yang akan diamati. Model ini akan menggambarkan hubungan sebab akibat antar aspek yang diamati.

3.2.2.3.Tahap Pembuatan Model Simulasi

Tahap pembuatan model simulasi dimulai dengan pembuatan model *stock and flow diagram* yang menggambarkan sistem pengelolaan sampah Surabaya secara lebih detail dan formulasi model matematis dari hubungan antar variabel dalam model. Setelah model selesai dibuat, dilakukan proses *running* model kondisi eksisting dan proses verifikasi serta validasi model. Proses ini dilakukan seperti yang telah disebutkan pada bab 2. Apabila model belum benar atau belum valid maka dilakukan evaluasi mulai dari input data yang digunakan, hubungan antar variabel, dan formulasi model yang digunakan.

Setelah model benar dan valid, dilanjutkan evaluasi dari sistem eksisting dengan melihat nilai variabel yang berhubungan dengan pencapaian tujuan penelitian. Kemudian dilakukan perumusan skenario kebijakan, sebagai upaya pengubahan nilai variabel dan parameter serta perubahan struktur model yang dapat meningkatkan aspek keberlanjutan dari sistem pengelolaan sampah Surabaya. Perancangan skenario kebijakan bertujuan untuk meningkatkan performasi dan keberlanjutan dari pengolahan sampah Surabaya dalam aspek kemampuan pengolahan sampah, total dampak lingkungan, dan nilai tambah dari sampah. Setelah perumusan skenario, dilanjutkan proses *running* model skenario dan dilakukan perbandingan *output* hasil simulasi kondisi eksisting dan kondisi adanya penambahan skenario kebijakan.

3.2.2.4.Tahap Analisis

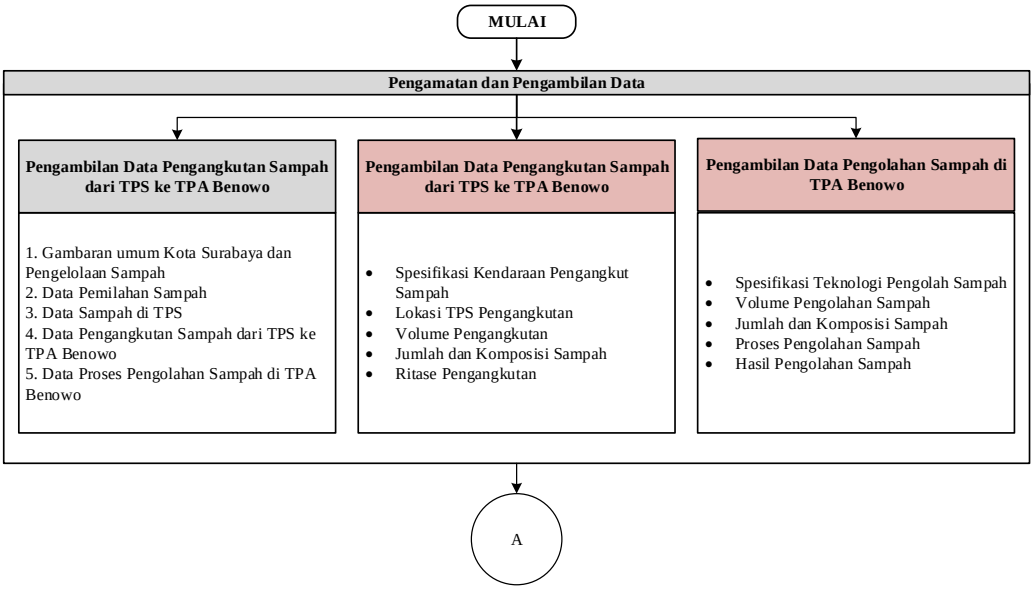
Pada tahap ini akan dilakukan analisis hasil simulasi, baik kondisi eksisting atau kondisi setelah penerapan skenario kebijakan. Analisis model eksisting digunakan untuk melihat kondisi pengelolaan sampah Surabaya saat ini yang ditinjau dari kemampuan mengolah sampah, total dampak lingkungan, dan nilai tambah sampah. Kemudian, hasil pengimplementasian skenario, digunakan untuk melihat pengaruh skenario terhadap peningkatan kemampuan pengolahan sampah,

penurunan dampak lingkungan, dan peningkatan nilai tambah sampah. Tahap ini diakhiri dengan pemilihan skenario kebijakan berdasarkan pemenuhan tujuan penelitian.

3.2.2.5.Tahap Kesimpulan dan Saran

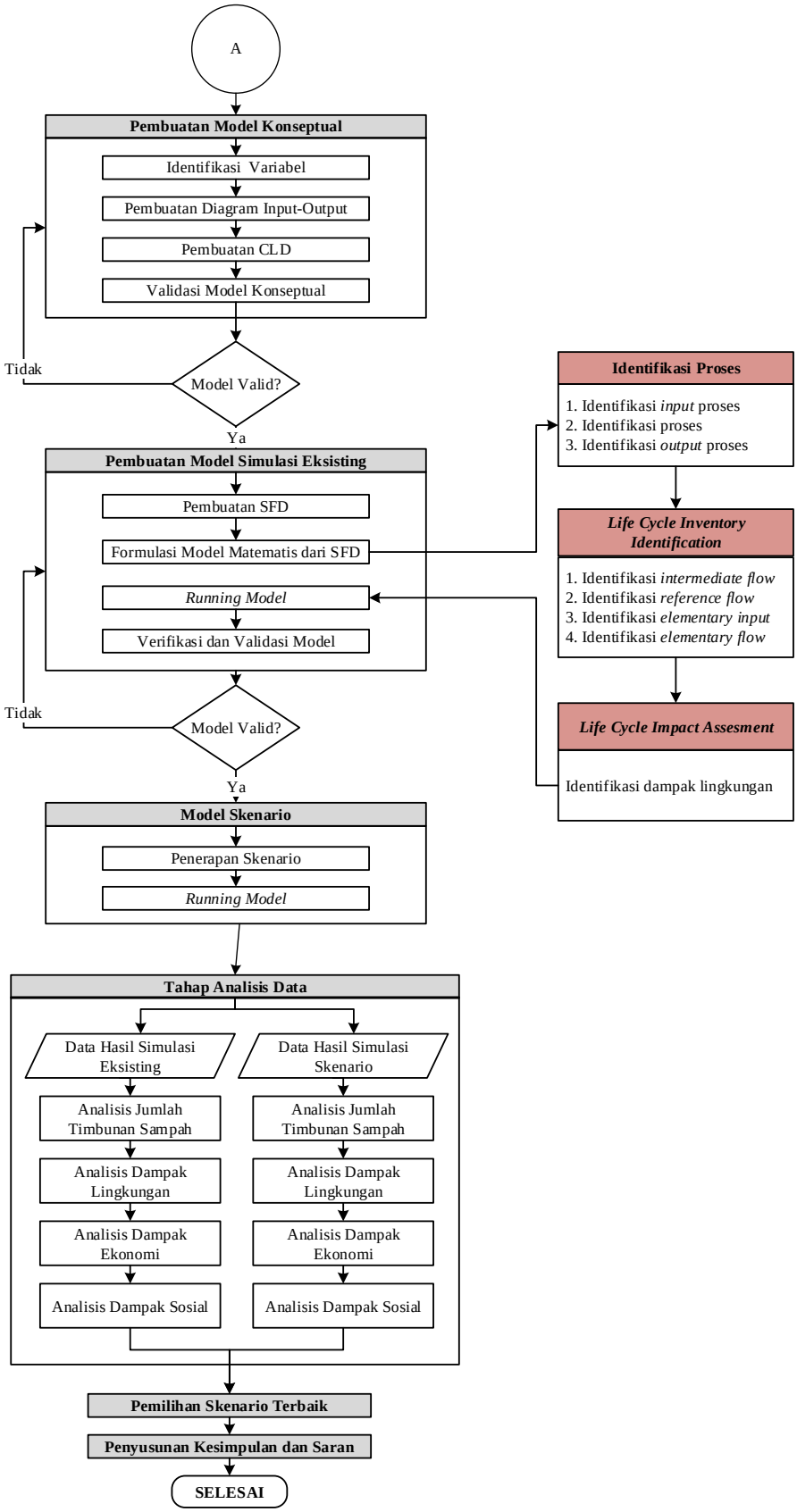
Kesimpulan akan mencakup pencapaian tujuan penelitian mengenai keberlanjutan dan performansi pengelolaan sampah Surabaya saat ini dan setelah adanya skenario kebijakan yang diterapkan. Sedangkan saran berupa rekomendasi yang diberikan kepada pihak terkait yaitu pemerintah dan untuk penelitian selanjutnya.

Berikut adalah *flowchart* gabungan antara metode LCA dan Sistem Dinamik yang digunakan dalam penelitian ini, dimana pada metode LCA terdapat proses perhitungan parameter dampak lingkungan yang akan dihitung melalui model sistem dinamik.



Gambar 3.4 Prosedur Kombinasi Pemodelan Sistem Dinamik dan LCA

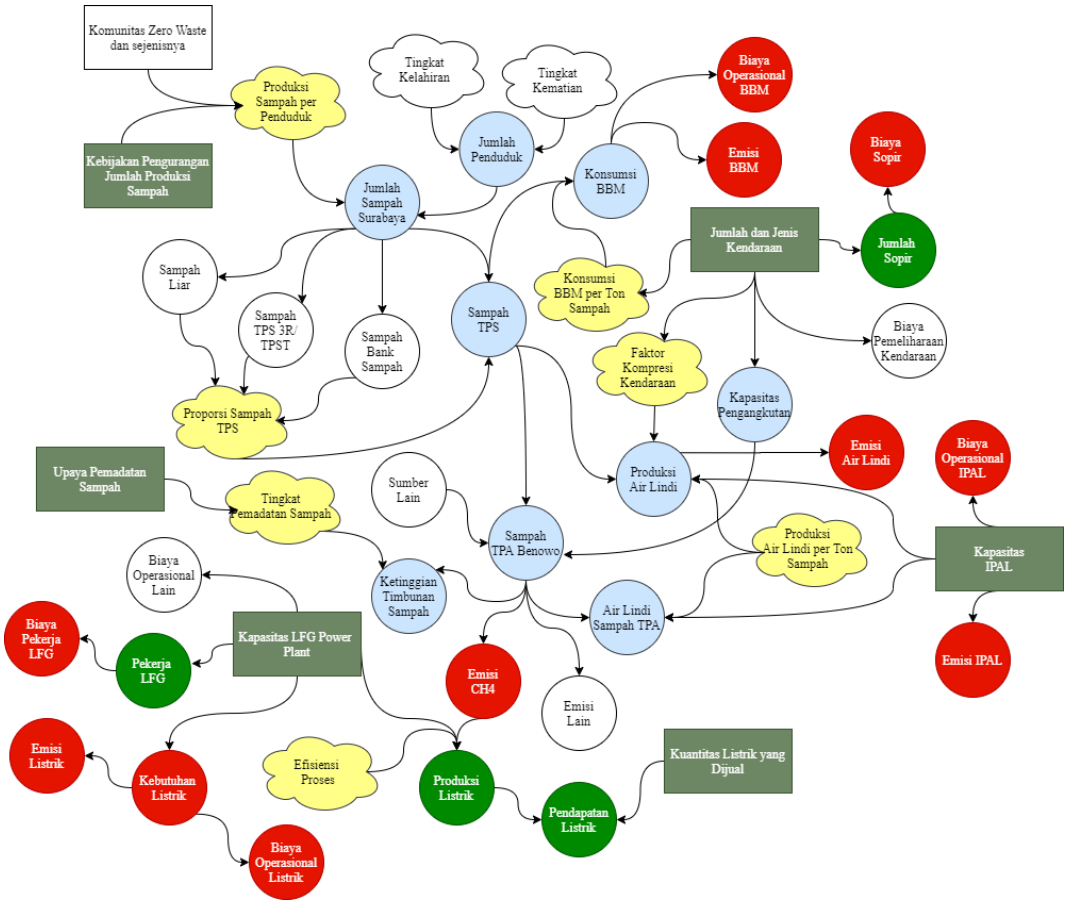
LCA



Gambar 3.4 Prosedur Kombinasi Pemodelan Sistem Dinamik dan LCA (Lanjutan)

BAB IV
PEMODELAN SISTEM PENGELOLAAN SAMPAH SURABAYA

Pada Bab Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah Surabaya akan dipaparkan proses pemodelan sistem pengelolaan sampah Surabaya kondisi eksisting dengan pendekatan Sistem Dinamik.



Gambar 4. 1 *Influence Diagram* Kondisi Eksisting Pengelolaan Sampah Surabaya

Keterangan :

- Dampak Negatif/ Pengeluaran
- Dampak Positif/ Pendapatan
- Ketidakpastian
- Data
- Keputusan/ Kebijakan
- Sub-sistem yang tidak diamati

4.1. Deskripsi Sistem Amatan

Pada subbab ini akan dipaparkan secara lebih detail kondisi pengelolaan sampah perkotaan Surabaya saat ini, meliputi alur pengelolaan sampah, kapasitas pengolahan sampah, dan dampak dari pengelolaan sampah itu sendiri.

4.1.1. Sampah dari Pemukiman Masyarakat Surabaya

Sampah dari masyarakat didominasi oleh sampah organik. Hal ini juga tergambar dari jenis sampah masyarakat yang masuk ke TPA Benowo yang menunjukan bahwa lebih dari 50% sampah berkategori sampah organik. Berikut merupakan detail kategori sampah yang masuk ke TPA Benowo yang akan digunakan sebagai acuan komposisi sampah Surabaya.

Tabel 4. 1 Komposisi Sampah di TPA Benowo

4.1.2. Pembentukan Sampah Perkotaan di Surabaya

Salah satu faktor penentu jumlah sampah adalah jumlah penduduk, dimana peningkatan jumlah penduduk akan berdampak pada peningkatan jumlah total produksi sampah yang dihasilkan. Berdasarkan data historis produksi sampah Surabaya tahun 2017 hingga 2019, jumlah produksi sampah meningkat seiring dengan adanya penambahan jumlah penduduk dengan jumlah mencapai 0.265 ton per penduduk pada tahun 2019. Nilai ini lebih besar daripada Standar Nasional Indonesia mengenai rata-rata jumlah timbulan sampah per kapita penduduk kota besar yaitu sebesar 0.219 ton per tahun.

Tabel 4. 2 Jumlah Penduduk dan Produksi Sampah Penduduk Kota Surabaya

4.1.3. TPS Surabaya

Sampah yang bersumber dari pemukiman masyarakat Surabaya, salah satunya disalurkan ke tempat pembuangan sampah sementara (TPS). Pada penelitian ini, terdapat 237 TPS yang dikelola oleh DKRTH, yang tersebar di lima wilayah di Surabaya, yaitu Surabaya Utara, Surabaya Selatan, Surabaya Barat, Surabaya Timur, dan Surabaya Pusat. Dalam menentukan proyeksi jumlah sampah yang terkumpul akan digunakan data historis sampah selama tiga tahun terakhir.

Berdasarkan data pembentukan sampah per bulan tersebut, berikut adalah perbandingan jumlah sampah yang berakhir di TPS terhadap total timbulan sampah yang terbentuk. Jumlah sampah yang masuk ke 267 TPS mencapai 50% dari total timbulan sampah, yang mana jumlah sampah ini kemudian harus diangkut ke TPA Benowo.

Tabel 4. 3 Perbandingan Jumlah Sampah TPS terhadap Jumlah Timbulan Sampah 2017 -2019

4.1.4. Pengangkutan Sampah TPS ke TPA Benowo

Sampah di TPS kemudian diangkut ke tempat pembuangan akhir sampah (TPA) yang berlokasi di Benowo, Surabaya Barat. Proses pengangkutan dilakukan dengan kendaraan pengangkutan sampah yang dimiliki oleh DKRTH dengan jenis *compactor*, dan *armroll*. Saat ini, setiap kendaraan bisa mengangkut sampah sebanyak tiga ritase setiap harinya atau tiga kali perjalanan bolak-balik dari TPS ke TPA Benowo. Berdasarkan data historis proses pengangkutan selama tahun 2017 hingga 2019, maka dapat dihitung jumlah kendaraan dan kapasitas pengangkutan sampah setiap ritasenya. Berikut adalah jumlah dan kapasitas kendaraan pengangkut sampah yang beroperasi saat ini.

Tabel 4. 4 Spesifikasi Kendaraan Pengangkutan Sampah Milik DKRTH

Variasi berat kapasitas sampah yang bisa diangkut salah satunya dipengaruhi oleh volume sampah. Untuk mengoptimalkan jumlah berat sampah yang bisa diangkut, sampah yang masuk ke kendaraan akan dipres dengan alat kompresi sehingga volume sampah berkurang sebesar faktor kompresi kendaraan. Pengurangan volume sampah ini akan meningkatkan jumlah berat sampah yang bisa diangkut. Hasil kompresi selain volume sampah yang berkurang yaitu pengeluaran air lindi dari sampah. Berikut adalah data faktor kompresi kendaraan pengangkutan sampah.

Tabel 4. 5 Data Faktor Kompresi Kendaraan

Pada pemodelan kondisi eksisting, faktor kompresi sebesar 3.28% akan digunakan untuk memprediksi jumlah produksi air lindi proses pengangkutan sampah. Pada kendaraan tipe *compactor* air lindi akan ditampung di dalam wadah yang ada pada kendaraan sehingga tidak tercecer pada lingkungan selama proses pengangkutan. Sedangkan untuk tipe *armroll* terdapat air lindi yang menetes di jalan yang bisa mencemari lingkungan. Jumlah tetesan air lindi yang terlepas ke lingkungan dihitung berdasarkan historis proporsi sampah yang diangkut dengan *armroll*, dimana sebesar 23% sampah bisa diangkut dengan menggunakan *armroll*. Proporsi ini digunakan untuk mengestimasi jumlah air lindi yang terlepas ke lingkungan yaitu sebesar 23% dari total produksi air lindi sampah yang diangkut.

4.1.5. Pengelolaan Sampah di TPA Benowo

Saat ini, pengelolaan sampah di TPA Benowo terdiri atas penimbunan sampah, pengolahan air lindi dengan fasilitas IPAL, dan pengolahan gas metan sampah menjadi energi listrik pada LFG *Power Plant*.

4.1.5.1.Penimbunan Sampah

Aktivitas utama pengelolaan sampah di TPA Benowo adalah proses penimbunan sampah, dengan salah satu sumber sampahnya berasal dari proses pengangkutan sampah TPS. Sebelum ditimbun, sampah yang masuk ke fasilitas pembuangan akhir akan dicek asal sumber sampah dan berat sampah di stasiun penimbangan sampah TPA Benowo. Kemudian, sampah akan masuk ke tempat penimbunan sampah. Pada proses penimbunan sampah ini, sampah akan ditumpuk dengan disusun membentuk terasering, dengan maksud menghindari longsor. Setiap sore hari, dilakukan proses pemberian cairan berupa EM4, EM6, dan obat anti lalat, dengan maksud untuk mengurangi jumlah lalat. Jenis sampah yang masuk ke TPA Benowo adalah sampah organik dan anorganik. Dari aktivitas penimbunan sampah organik akan dihasilkan gas metan yang bersumber dari proses dekomposisi sampah oleh bakteri (*anaerobic digestion*). Gas metan ini akan dikumpulkan melalui pipa vertikal atau pipa horizontal yang tertanam di antara timbunan sampah. Jaringan pipa ini akan menuju ke mesin pembangkit listrik (LFG Power Plant) yang akan mengolah lebih lanjut gas metan menjadi energi listrik. Sedangkan untuk sampah anorganik, sampah yang tidak bisa menghasilkan gas metan, belum diproses lebih lanjut atau hanya ditimbun di TPA.

Luas TPA Benowo saat ini adalah sebesar 32 Ha dimana 22 Ha digunakan sebagai lokasi penimbunan sampah. Ketinggian timbunan sampah dibatasi hingga maksimum 25 m. Setiap tahunnya terdapat upaya dari pengelola TPA Benowo untuk memadatkan sampah yang ketinggian awalnya sebesar 7 m berkurang sebesar 5 m hingga 5.5 m. Sehingga dengan menggunakan rumus (4.1) dapat diketahui bahwa tingkat pemadatan sampah TPA Benowo saat ini mencapai 3.53 ton per m^3 nya (Poltekkes Makassar, 2009).

Estimasi Ketinggian Sampah

$$Tinggi\ Sampah = \frac{Berat\ sampah\ (ton)}{Panjang\ (m) x\ Lebar\ (m)\ x\ tingkat\ pemadatan\ sampah\ (\frac{ton}{m^3})} \quad (4.1)$$

(Pemerintah Republik Indonesia, 2013)

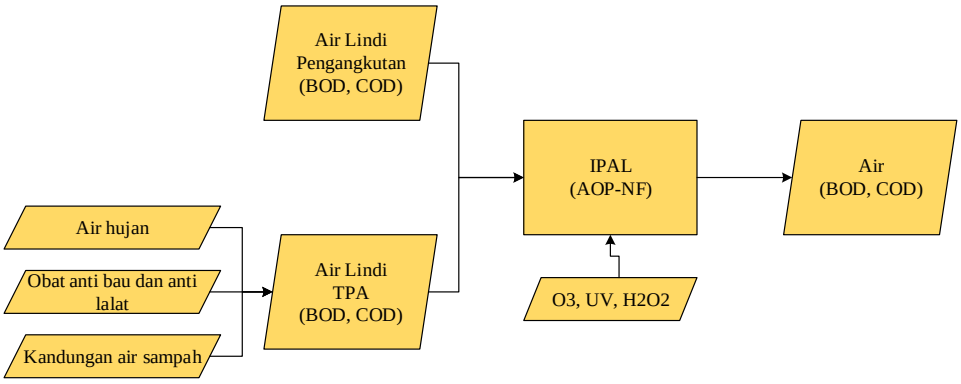
4.1.5.2.LFG *Power Plant*

Saat ini, LFG *Power Plant* memiliki kapasitas produksi listrik sebesar 2 MW per hari dengan efisiensi proses sebesar 85% (Bove & Launghi, 2006). Dimana dari 2 MW energi yang dihasilkan, 1.65 MW telah dijual ke PLN sedangkan sisanya digunakan untuk operasional TPA. Nilai kapasitas ini berasal dari 2 *engine* yang masing-masing berkapasitas 1 MW dan berfungsi untuk mengonversi gas metan menjadi energi listrik. Proses konversi ini diawali dengan proses penyaluran gas metan ke unit *gas extraction equipment* yang berfungsi untuk menghilangkan komponen gas yang tidak diperlukan. Gas metan yang telah diekstraksi kemudian akan masuk ke *heat exchanger* yang berfungsi untuk memanaskan gas. Lalu gas ini akan menggerakan blower dan dikonversi menjadi listrik. Adapun listrik yang dihasilkan akan disimpan di dalam generator dan disalurkan ke PLN. Berdasarkan data dari Senior Manager *General Affairs* PLN UID Jatim, dari 1.65 MW listrik yang dijual ke PLN, bisa digunakan untuk memasok sebesar 740,000 kWh/ bulan untuk 5,573 pelanggan. Saat ini, pembangkit LFG telah mempekerjakan sekitar 28 orang karyawan untuk memproduksi listrik dengan kapasitas 2 MW tersebut (Widarti, 2019).

4.1.5.3.Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)

Fasilitas IPAL di TPA Benowo telah menerapkan teknologi AOP-NF (*Advanced Oxydation Process and Nano Filtration)* atau disebut "*Landfill Leachete*

Treatment Plant" dengan kapasitas sebesar 1200 m^3 per hari (Zefa Valindo Jaya, 2015). Teknologi AOP-NF mengombinasikan tiga zat oksidan yaitu O_3 (*ozone*), H_2O_2 (*hydrogen peroxida*), dan sinar UV. Kelebihan pengoperasian teknologi ini adalah tidak menimbulkan bau, tidak menimbulkan *sludge* atau endapan, tidak membutuhkan bakteri atau *nutrient*, tidak membutuhkan area yang luas, dan mudah pada proses perawatan (Zefa Valindo Jaya, 2015). Teknologi ini diaplikasikan untuk mengurangi kadar zat kimia berbahaya dari lindi yaitu pengurangan sebesar 98.2% kadar COD dan kadar Pb sebesar 0.00825 per liter air yang dihasilkan. Dimana batas maksimum standar baku mutu air lindi yang diizinkan sebelum dilepas ke lingkungan di Indonesia adalah sebesar 300 mg/ liter untuk COD dan sebesar 0.1 mg/ l untuk Pb (KLH, 2016).



Gambar 4. 2 Proses IPAL di TPA Benowo dengan Teknologi AOP-NF

Untuk produksi air lindi di TPA Benowo yaitu sebesar 400 m^3 per hari atau sebesar 146,000,000 liter per tahun pada tahun 2016 (Al Hakim, 2016). Produksi air lindi dipengaruhi oleh kandungan air pada timbunan sampah TPA, air limbah hasil proses pengangkutan, dan air yang masuk ke timbunan sampah seperti air hujan serta cairan EM4, EM6, dan obat lalat. Data intensitas air hujan di TPA Benowo adalah sebesar 2,976 mm per tahun, dengan luas area timbunan sebesar 22,000 m^2 maka total air hujan yang jatuh ke area penimbunan adalah sebesar 65,472,000 liter per tahunnya. Dengan menggunakan data evaporasi air hujan yaitu sebesar 0.53 (Wati, 2015) dimana sebesar 53% air hujan yang jatuh ke tanah akan diuapkan kembali, maka estimasi air hujan yang tertampung di area penimbunan adalah sebesar 30,771,840.00 liter per tahun. Kemudian, cairan yang diberikan ke TPA Benowo yaitu sebesar 2,500 liter/ hari atau sebesar 912,500.00 liter/ tahun

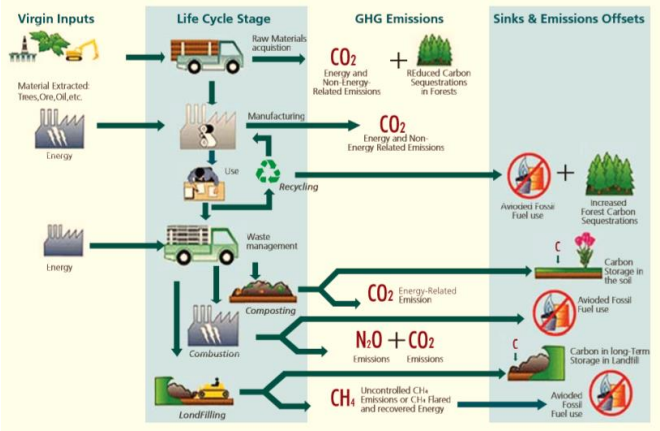
(Poltekkes Makassar, 2009). Sehingga air lindi yang dihasilkan dari timbunan sampah dan proses pengangkutan adalah sebesar 114,315,660.00 liter/ tahun. Selanjutnya, data ini akan digunakan untuk mengestimasikan total air lindi yang dihasilkan oleh sampah setiap 1 tonnya. Dengan mengasumsikan bahwa air lindi sampah ini dihasilkan oleh keseluruhan sampah yang tertimbun di TPA pada tahun tersebut, maka rata-rata air lindi yang dihasilkan oleh setiap ton sampah adalah sebesar 142.22 liter. Dan dengan data densitas air lindi yaitu sebesar 0.00100098 ton/ liter (Souza, et al., 2014), maka didapatkan bahwa produksi air lindi sebesar 0.1424 ton setiap 1 ton sampah. Nilai ini akan digunakan untuk memprediksi jumlah air lindi dari jumlah sampah yang ditimbun di TPA Benowo dan sampah hasil pengangkutan.

4.1.6. Dampak Lingkungan Pengelolaan Sampah di Surabaya

Pengelolaan sampah menghasilkan dampak bagi lingkungan karena pada setiap tahap pengelolaan sampah dapat menghasilkan substansi yang membahayakan lingkungan. Pada penelitian ini akan berfokus pada dampak lingkungan pengelolaan sampah ke udara (pencemaran udara). Gambar 4.2 menunjukkan dampak lingkungan pengelolaan sampah yang menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) yang berbahaya bagi lingkungan, yaitu CO_2, CH_4, dan N_2O. Pada proses pengangkutan sampah, dampak lingkungan dapat timbul dari emisi proses pembakaran bahan bakar (*fuel combustion*) seperti gas karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), dan N_2O. Selain itu, pada proses pengangkutan dengan kendaraan *armroll*, terdapat air lindi yang terlepas ke lingkungan, dimana dalam air lindi terkandung komponen organik (COD dan BOD) yang bisa terdekomposisi dan menghasilkan gas metan. Sedangkan pada proses pengolahan sampah, dampak lingkungan dapat timbul dari emisi penggunaan energi listrik, gas metan (CH_4) dan air lindi dari proses penimbunan sampah dimana gas metan yang dihasilkan oleh *landfill* merupakan sumber utama gas rumah kaca dari sektor persampahan secara global.

Sesuai dengan Laporan Pedoman Umum, Petunjuk Teknis dan Manual Perhitungan Pemantauan, Evaluasi dan Pelaporan (PEP) Pelaksanaan RAN dan RAD-GRK Bidang Pengelolaan Limbah, yang dikeluarkan oleh Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional (BAPPENAS) tahun 2015, perhitungan emisi

GRK Indonesia menggunakan metode IPCC 2006 *Guideline* (IPCC 2006 GL) dengan tingkat ketelitian Tier 1 yaitu dengan menggunakan data aktifitas dan faktor emisi default dari IPCC 2006 GL.



Gambar 4. 3 Emisi GRK Pengelolaan Sampah

Sumber: BAPPENAS, 2014

Tabel 4. 6 IPPC 2006 *Guideline*

4.1.7. Dampak Sosial dan Ekonomi Pengelolaan Sampah di Surabaya

Pada penelitian ini, dampak sosial pengelolaan sampah akan dilihat dari jumlah lapangan pekerjaan yang tercipta dari fasilitas pengelolaan sampah yang ada, yaitu: peluang menjadi sopir proses pengangkutan sampah, dan pekerja proses pengolahan sampah di TPA Benowo. Timbulnya peluang kerja ini akan berdampak pada perolehan pendapatan masyarakat. Selain itu, hasil energi listrik yang dihasilkan dari LFG *Power Plant* juga akan menambah pendapatan dari PT. Sumber Organik, disamping kebutuhan energi listrik untuk proses pengolahan gas metan, dan kebutuhan sumber daya lain untuk proses IPAL.

4.2. Konseptualisasi Sistem

Pada sub bab ini akan dipaparkan mengenai konseptualisasi sistem pengelolaan sampah Surabaya untuk kondisi eksisting,.

4.2.1. Identifikasi Variabel

Berikut adalah variabel yang digunakan dalam pemodelan kondisi eksisting pengelolaan sampah Surabaya.

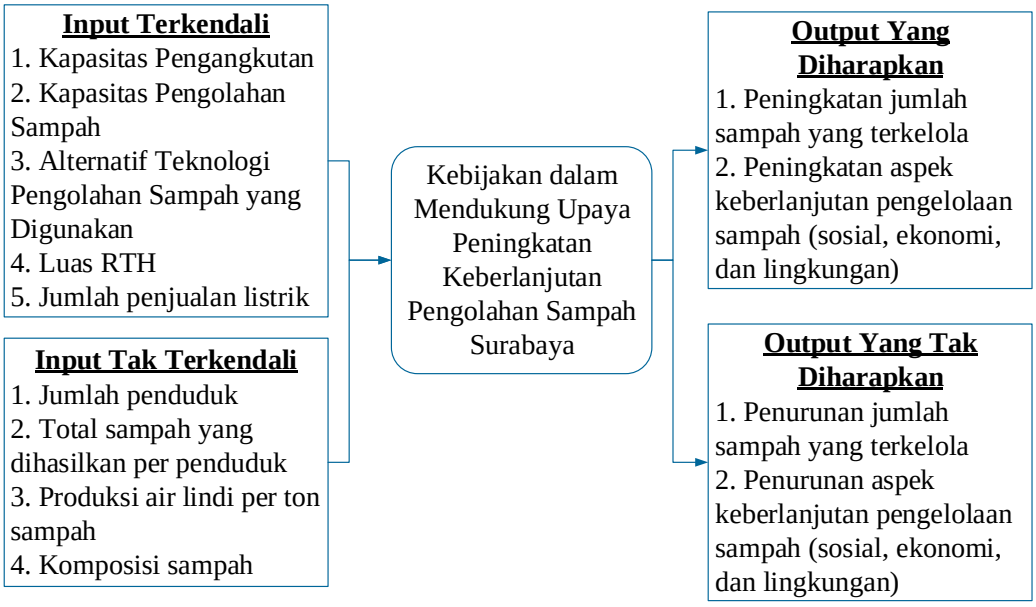
Tabel 4. 7 Variabel dalam Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah Surabaya

No	Variabel	Deskripsi	Simbol	Unit
Submodel Pembentukan Sampah Surabaya				
1	Tingkat kelahiran	Penambahan jumlah penduduk setiap tahunnya	*Converter*	%
2	Laju pertambahan penduduk	Laju penambahan jumlah penduduk	*Flow*	Orang/ tahun
3	Jumlah penduduk Surabaya	Jumlah penduduk setiap tahunnya	*Stock*	Orang
4	Tingkat kematian	Pengurangan jumlah penduduk setiap tahunnya	*Converter*	%
5	Laju kematian penduduk	Laju pengurangan jumlah penduduk setiap tahuunya	*Flow*	Orang/ tahun
6	Produksi sampah tiap penduduk	Data produksi sampah setiap penduduk per tahunnya	*Converter*	Ton/ Orang/ Tahun
7	Pembentukan sampah Surabaya	Laju pembentukan sampah penduduk Surabaya setiap tahunnya	*Flow*	Ton/ Tahun
8	Jumlah Sampah Surabaya	Jumlah produksi sampah penduduk Surabaya setiap tahunnya	*Stock*	Ton
Submodel Penumpukan Sampah di TPS				
9	Proporsi sampah ke TPS	Proporsi sampah yang berakhir di TPS	*Converter*	%
10	Total sampah ke bank sampah	Jumlah sampah yang awalnya ke TPS namun beralih ke bank sampah	*Converter*	Ton/ tahun
11	Total sampah dari bank sampah	Sisa sampah setelah proses di bank sampah yang dibuang ke TPS	*Converter*	Ton/ tahun
12	Penumpukan sampah di TPS	Laju penumpukan sampah Surabaya di TPS	*Flow*	Ton/ tahun
13	Jumlah sampah di TPS Surabaya	Jumlah sampah di TPS setiap tahunnya	*Stock*	Ton
Submodel Pengangkutan Sampah di TPS				
14	Kapasitas C6	Total kapasitas *compactor* 6 m^3	*Converter*	Ton/ kendaraan-ritase
15	Unit C6	Total unit kendaraan *compactor* 6 m^3	*Converter*	Kendaraan

Tabel 4. 8 Variabel dalam Pemodelan Sistem Pengelolaan Sampah Surabaya (Lanjutan)

4.2.2. Diagram Input dan Output

Berikut adalah diagram input dan output yang digunakan untuk mengetahui input terkenadali dan tak terkendali yang dapat digunakan dalam proses perumusan skenario kebijakan dan output yang diharapkan serta tidak diharapkan yang digunakan sebagai acuan pemilihan skenario.



Gambar 3. 5 Diagram Input dan Output

4.2.3. Causal Loop Diagram (CLD)

Berikut adalah CLD dari pengelolaan sampah Surabaya saat ini.

Gambar 3. 6 *Causal Loop Diagram*

4.2.4. Validasi CLD

Dalam penelitian ini, proses validasi dilakukan dengan menggunakan literatur oleh karena keterbatasan proses diskusi dengan pihak DKRTH yang disebabkan oleh pandemi virus. Proses pembuatan CLD telah mengacu pada literatur yang kredibel yaitu UU. No. 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah, Peraturan Daerah Kota Surabaya Nomor 5 Tahun 2014, dan Peraturan Walikota Surabaya Nomor 64 Tahun 2018 mengenai pengelolaan sampah di Surabaya serta

literatur penelitian terdahulu dan jurnal terkait. Pembuatan model telah mengikuti gambaran hubungan variabel antar sistem pengelolaan sampah Surabaya sesuai dengan literatur, yang dimulai dari proses pembentukan sampah di masyarakat Surabaya, pengumpulan sampah oleh masyarakat ke TPS, pengangkutan sampah TPS ke TPA Benowo oleh DKRTH, dan pengolahan sampah di TPA Benowo oleh PT. Sumber Organik.

4.3. Model Simulasi Kondisi Eksisting

Pada sub bab ini akan dipaparkan mengenai model *stock and flow diagram (SFD)* sistem pengelolaan sampah Surabaya pada kondisi eksisting, yang meliputi proses pembentukan sampah dan penumpukan sampah di TPS, pengangkutan sampah di TPS ke TPA Benowo, dan pengolahan sampah di TPA Benowo. Selain itu, juga akan dimodelkan evaluasi keberlanjutan pengelolaan sampah Surabaya yang ditinjau dari aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial.

Gambar 4. 4 SFD Pembentukan Sampah Surabaya

4.3.1. SFD Pembentukan Sampah Masyarakat

Model pembentukan sampah masyarakat menampilkan variabel yang berpengaruh terhadap proses pembentukan sampah Surabaya, yaitu variabel jumlah penduduk sampah Surabaya per tahun dan variabel jumlah sampah yang dihasilkan tiap penduduk Surabaya per tahun. Dimana, jumlah penduduk per tahunnya dipengaruhi oleh angka kelahiran dan angka kematian penduduk Surabaya pada tahun tersebut. Proyeksi jumlah sampah penduduk (ton/ tahun) dilakukan dengan menggunakan persamaan regresi dari data tiga tahun terakhir (Kolekar, et al., 2016). Hasil proyeksi menunjukkan bahwa produksi sampah penduduk mencapai 0.263 ton/ tahun.

4.3.2. SFD Penumpukan Sampah di TPS

Penumpukan sampah di TPS dipengaruhi oleh jumlah sampah timbulan sampah yang dibuang ke TPS. Dimana setiap tahunnya 50% timbulan sampah berakhir di 267 TPS yang dikelola oleh DKRTH.

Gambar 4. 5 SFD Penumpukan Sampah di TPS

4.3.3. SFD Pengangkutan Sampah TPS ke TPA

Sampah yang telah terkumpul di TPS kemudian akan diangkut ke TPA setiap harinya. Jumlah sampah yang diangkut bergantung pada jumlah sampah yang ada di TPS atau kapasitas pengangkutan sampah. Variabel kapasitas pengangkutan sampah ini dipengaruhi oleh variabel jumlah kendaraan (kendaraan), variabel kapasitas angkut kendaraan (ton/ ritase/ kendaraan), dan variabel jumlah ritase yang diterapkan (ritase/ tahun). Saat ini jumlah ritase yang diterapkan oleh DKRTH adalah sebanyak 3 ritase tiap kendaraan per harinya dan kapasitas kendaraan yang beroperasi diasumsikan sesuai dengan kapasitas maksimumnya.

Gambar 4. 6 SFD Pengangkutan Sampah Surabaya

4.3.4. SFD Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah

Produksi air lindi proses pengangkutan dipengaruhi oleh kandungan air lindi per ton sampah, berat sampah, dan faktor kompresi kendaraan. Berikut adalah model perhitungan jumlah air lindi proses pengangkutan sampah pada model SFD pengelolaan sampah Surabaya.

Gambar 4. 7 SFD Produksi Air Lindi Pengankutan Sampah

4.3.5. SFD Penimbunan Sampah dan Pengolahan Air Lindi di TPA Benowo

Sampah TPS yang diangkut ke TPA Benowo akan ditimbun di lokasi penimbunan. Setiap harinya sampah yang ditimbun akan dipadatkan dengan menggunakan traktor sehingga ketinggian sampah berkurang. Upaya pemadatan ini dilakukan agar ketinggian sampah tidak mencapai batas maksimum yang diijinkan yaitu sebesar 25 m. Selain proses penimbunan sampah, juga terdapat proses pengolahan air lindi di TPA Benowo dengan kapasitas sebesar 438,000,000 liter dalam setahun. Air lindi di TPA Benowo berasal dari air lindi hasil proses pengangkutan, air lindi dari air hujan, air lindi dari hasil penyemprotan cairan, dan air lindi dari timbunan sampah. Berikut adalah model SFD yang menggambarkan proses penimbunan sampah dan pengolahan air lindi di TPA Benowo.

Gambar 4. 8 SFD Proses Penimbunan Sampah dan Pengolahan Air Lindi di TPA Benowo

4.3.6. SFD LFG Power Plant di TPA Benowo

Salah satu hasil proses penimbunan sampah yaitu gas metan yang dihasilkan dari proses dekomposisi sampah organik. Gas metan ini kemudian dikonversi menjadi listrik. Listrik yang diproduksi dipengaruhi oleh nilai kalor gas metan (J/ ton gas metan), kapasitas pembangkit, dan efisiensi mesin. Adapun jumlah energi panas (kalor) adalah sebesar 6.13 x 10^7 J/ ton gas metan dimana setara dengan 17.027 kWh (Syafirudin, 2012) dan asumsi efisiensi mesin konstan yang digunakan adalah sebesar 85% (Bove & Launghi, 2006). Pada proses pengolahan gas metan menjadi listrik juga dibutuhkan energi listrik yaitu sebesar 0.0036 kWh per 1 kWh listrik yang dihasilkan (Bove & Launghi, 2006).

Rumus Perhitungan Output Listrik dari Gas Metan

$$Jumlah\ Output\ Listrik\ (kWh) = Jumlah\ Gas\ Metan\ (Kg)\ x\ 17.027\frac{kWh}{Kg}\ x\ efisiensi\ mesin \quad (4.\ 2)$$

Rumus Perhitungan Kebutuha Listrik Operasional LFG Power Plant

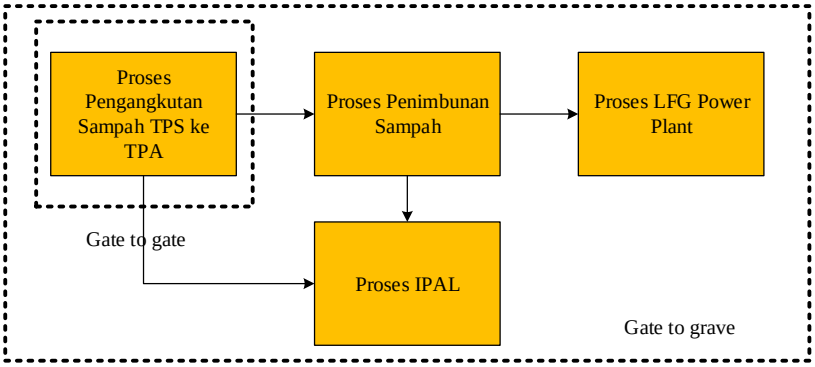
$$Jumlah\ Kebutuhan\ Listrik\ (kWh) = Jumlah\ Produksi\ Listrik\ (kWh)\ x\ Jumlah\ Standar\ Kebutuhan\ Listrik\ (\frac{kWh}{kWh}) \quad (4.\ 3)$$

Pada model SFD proses LFG Power Plant, akan dihitung nilai variabel produksi listrik dari gas metan yang dipengaruhi oleh nilai variabel produksi gas metan sampah TPA, variabel kapasitas produksi, dan efisiensi proses. Nilai variabel produksi gas metan dihitung dari potensi gas metan yang terbentuk dengan menggunakan standar IPCC GL 2006. Sedangkan variabel kapasitas produksi dan efisiensi proses LFG Power Plant digunakan data literatur dan bernilai konstan.

Gambar 4. 9 SFD Proses Pengolahan Gas Metan pada LFG Power Plant di TPA Benowo

4.3.7. SFD Dampak Lingkungan Pengelolaan Sampah

Formulasi model matematis dari dampak lingkungan pengelolaan sampah dilakukan berdasarkan *framework* LCA, yaitu dimulai dari pendefinisian tujuan dan batasan pengukuran dampak lingkungan, identifikasi proses pengelolaan sampah, identifikasi inventori, dan pengukuran dampak (*life cycle impact assesment*). Pengukuran dampak lingkungan dilakukan dengan batasan *gate* (proses) *to grave* (akhir hidup produk), dimana pada proses perhitungan akan dibagi berdasarkan urutan proses (*gate to gate*) hingga berakhir pada pengolahan sampah di TPA Benowo (*grave*).



Gambar 4. 10 Proses LCA Pengelolaan Sampah Surabaya

4.3.6.1.Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses Pengelolaan Sampah

Berikut adalah tujuan dan batasan dari pengukuran dampak lingkungan pengelolaan sampah Surabaya.

Tabel 4. 8 Tujuan dan Batasan Proses Pengelolaan Sampah

Tujuan	Batasan
Mengukur dampak lingkungan dari proses pengelolaan sampah Surabaya	1. Pengelolaan sampah terdiri atas proses pengangkutan sampah di TPS menuju TPA Benowo dan pengolahan sampah di TPA Benowo (penimbunan sampah, IPAL, dan LFG *Power Plant*) 2. Pengangkutan sampah dari 267 TPS yang dikelola oleh DKRTH Surabaya dengan tipe kendaraan *Armroll* dan *Compactor*. 3. Konsumsi BBM kendaraan pengangkutan sampah dihitung berdasarkan jumlah sampah yang diangkut (liter/ ton) 4. Unit fungsi yang digunakan adalah untuk mengolah sampah setiap tahunnya (ton/tahun) pada periode tahun 2017 hingga 2032 5. Dampak lingkungan yang diukur adalah dampak pencemaran terhadap udara

4.3.6.2.Identifikasi Proses Pengelolaan Sampah

Tabel 4.10 merupakan gambaran proses pengangkutan sampah meliputi *input* yang dibutuhkan untuk mengangkut sampah dan *output* dari proses pengangkutan sampah.

Tabel 4. 9 Identifikasi Proses Pengangkutan Sampah

Input	**Proses**	***Output***
Konsumsi bahan bakar (liter) Sampah TPS (ton)	Proses pengangkutan sampah	Dampak lingkungan pembakaran bahan bakar kendaraan (ton) Sampah TPA (ton) Air lindi (liter)

Berikut adalah *input* yang dibutuhkan untuk menimbun sampah dan *output* dari proses penimbunan sampah.

Tabel 4. 10 Identifikasi Proses Penimbunan Sampah

Input	**Proses**	***Output***
Sampah TPA (ton)	Proses penimbunan sampah	Dampak lingkungan penimbunan sampah (ton) Gas metan (ton) Sampah TPA (ton) Air lindi (ton)

Salah satu gas hasil penimbunan sampah (*landfill gas*) adalah gas metan. Gas metan ini bisa dimanfaatkan lanjut dan dikonversi menjadi energi listrik pada LFG *Power Plant.* Berikut adalah *input* yang dibutuhkan untuk mengonversi gas metan hasil proses penimbunan sampah menjadi energi listrik dan *output* yang dihasilkan.

Tabel 4. 11 Identifikasi Proses LFG *Power Plant*

Input	**Proses**	***Output***
Gas metan (ton) Listrik (kWh)	Proses LFG *Power Plant*	Dampak lingkungan penggunaan listrik (ton) Listrik (kWh)

Selain itu, air lindi juga dihasilkan dari proses penimbunan sampah. Air lindi ini berasal dari zat organik yang larut bersama dengan air atau proses dekomposisi sampah.

Tabel 4. 12 Identifikasi Proses IPAL

Input	**Proses**	***Output***
Air lindi (liter)	Proses di IPAL (Instalasi Pengelolaan Air Limbah).	Air jernih (liter) Air lindi (liter) Emisi air lindi (ton)

4.3.6.3.*Life Cycle Inventory Analysis* Pengelolaan Sampah

Inventori pengelolaan sampah meliputi data dampak lingkungan proses pengangkutan, penimbunan sampah, proses pada LFG *Power Plant* dan IPAL. Perhitungan inventori dampak lingkungan berdasarkan dampak pencemaran udara.

4.3.6.3.1.LCIA Pengangkutan Sampah

Dampak lingkungan pengangkutan sampah berasal dari emisi pembakaran bahan bakar kendaraan dan air lindi. Pertama, yaitu dampak lingkungan dari penggunaan BBM kendaraan pengangkut, akan dihitung dengan menggunakan formula sebagai berikut.

Formula Matematis Emisi Pengangkutan Sampah

$$Emisi\ GRK\ \left(\frac{Ton}{tahun}\right) = Konsumsi\ Energi\ \left(\frac{TJ}{tahun}\right) x Faktor\ emisi\ \left(\frac{Ton}{TJ}\right) \quad (4.\ 4)$$

$$Konsumsi\ Energi\ \left(\frac{TJ}{tahun}\right) = Konsumsi\ Energi\ \left(\frac{liter}{tahun}\right) x\ Nilai\ kalor\ \left(\frac{TJ}{\frac{liter}{tahun}}\right) \quad (4.\ 5)$$

$$Konsumsi\ Energi\ \left(\frac{liter}{tahun}\right) = Konsumsi\ Energi\ \left(\frac{liter}{ton}\right) x\ Jumlah\ Sampah\ yang\ Diangkut\ (ton) \quad (4.\ 6)$$

Dalam perhitungan inventori konsumsi BBM kendaraan pengangkutan sampah, akan digunakan data pendukung sebagai berikut.

Tabel 4. 13 Konsumsi Bahan Bakar Kendaraan Pengangkutan Sampah

Tabel 4. 14 Faktor Emisi Penggunaan Bahan Bakar Solar

Tabel 4. 15 Nilai Kalor Bahan Bakar Solar

Berikut adalah proses perhitungan inventori pengangkutan sampah dalam model sistem dinamik.. Pada pemodelan dampak penggunaan BBM kendaraan pengangkutan sampah, nilai dampak lingkungan dipengaruhi oleh variabel total konsumsi BBM, dimana nilai ini akan meningkat seiring peningkatan jumlah sampah yang harus diangkut.

Gambar 4. 11 LCIA Dampak Lingkungan Penggunaan BBM pada Proses Pengangkutan Sampah

Kemudian, akan dihitung dampak lingkungan dari produksi air lindi yang tercecer di lingkungan yang merupakan hasil proses kompresi sampah menggunakan rumus perhitungan berikut.

Formula Matematis Dampak Lingkungan Air Lindi

$$Dampak\ lingkungan\ \left(\frac{ton}{tahun}\right) = Faktor\ dampak\ lingkungan\ \left(\frac{ton}{liter}\right) x\ Air\ lindi\ \left(\frac{liter}{tahun}\right) \quad (4.\ 7)$$

$$Air\ lindi\ \left(\frac{liter}{tahun}\right) = Fakto\ Kompresi\ x\ Jumlah\ air\ lindi\ per\ ton\ sampah\ \left(\frac{ton}{ton}\right) x\ Jumlah\ Sampah\ yang\ Diangkut\ \left(\frac{ton}{tahun}\right) x\ Proporsi\ Air\ Lindi\ ke\ Lingkungan\ (\%): densitas\ air\ lindi\ (\frac{liter}{ton}) \quad (4.\ 8)$$

Untuk menghitung dampak lingkungan dari air lindi sampah, akan digunakan data literatur berikut. *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) merupakan

jumlah komponen organik yang bisa teroksidasi secara bilogis (dalam satuan berat). Data BOD yang digunakan pada penelitian ini akan menggunakan standar perhitungan BOD yaitu BOD_5 yang menggambarkan jumlah kebutuhan oksigen untuk menguraikan komponen organik pada air lindi dalam keadaan aerobik selama lima hari. Sedangkan *Chemical Oxygen Demand* (COD) merupakan total jumlah komponen organik, baik yang mudah terurai secara biologis (*biodegradable*) atau sulit teruarai (*non biodegradable*). BOD dan COD yang mengandung komponen organik, berpotensi untuk menghasilkan emisi gas metan (CH_4) (IPCC, 2006). Perhitungan produksi emisi gas metan ini akan menggunakan data dan rumus perhitungan berdasarkan standar pada IPCC GL 2006 sebagai berikut.

Tabel 4. 16 Data Dampak Air Lindi

Berikut adalah pemodelan dampak lingkungan dari air lindi hasil proses kompresi sampah yang diangkut, dan besar pencemaran ke lingkungan.

Gambar 4. 12 LCIA Dampak Lingkungan dari Produksi Air Lindi pada Proses Pengangkutan Sampah

4.3.6.3.2.LCIA Penimbunan Sampah

Berdasarkan IPCC 2006 GL, proses penimbunan sampah akan menghasilkan emisi gas metan akibat proses degradasi sampah. Adapun kategori sampah yang bisa menghasilkan gas metana adalah sampah organik yaitu: sampah makanan, sampah kebun, kertas, karton, kayu, tekstil, dan diapers. Berikut adalah metode perhitungan untuk menghitung nilai gas metan.

$$DDOCmd\ (t) = W(t)\ x\ DOC\ X\ DOCf\ x\ MCF \quad (4.\ 9)$$

$$DDOCmrem\ (t) = DDOCmd\ (t)\ x\ e^{(-k\ x\ \left(\frac{13-M}{12}\right))} \quad (4.\ 10)$$

$$DDOCmdec\ (t) = DDOCmd\ (t)\ x\ (1 - e^{\left(-k\ x\ \left(\frac{13-M}{12}\right)\right)}) \quad (4.\ 11)$$

$$DDOCma\ (t) = DDOCmrem\ (t) + (DDOCma\ (t-1)\ x\ e^{-k}) \quad (4.\ 12)$$

$$DDOCmdecomp\ (t) = DDOCmdec\ (t) + (DDOCma\ (t-1)\ x\ (1-e^{-k})) \quad (4.\ 13)$$

$$CH4\ generated\ (t) = DDOCmdecomp\ (t) x\ F\ x \frac{16}{12} \quad (4.\ 14)$$

$$CH4\ emitted\ (t) = \left(CH4\ generated\ (t) - R\ (t)\right)\ x\ (1 - OX\ (t)) \quad (4.\ 15)$$

$$CO2\ (t) = CH4\ emitted\ (t)\ x\ \left[\frac{1-F}{F} + OX\right] x \frac{44}{16} \quad (4.\ 16)$$

Dimana :

DDOCm	= Jumlah DOC yang bisa terdekomposisi pada kondisi anaerobik
DDOCmd (t)	= Jumlah DDOCm dari jumlah sampah yang ditimbun di TPA pada tahun t
DDOCmrem (t)	= Jumlah DDOCm yang tertimbun namun belum terdekomposisi pada akhir tahun dekomposisi t
DDOCmdec (t)	= Jumlah DDOCm yang tertimbun dan terdekomposisi selama tahun dekomposisi t
DDOCma (t)	= Jumlah akumulasi DDOCm yang belum terdekomposisi pada TPA pada akhir tahun t
DDOCma (t-1)	= Jumlah akumulasi DDOCm yang belum terdekomposisi pada TPA pada akhir tahun t-1
DDOCmdecomp (t)	= Jumlah DDOCm yang terdekomposisi pada tahun t
CH_4 *generated* (t)	= Jumlah CH_4 yang terbentuk dari dekomposisi DOC
CH_4 *emitted* (t)	= Jumlah CH_4 yang terbuang ke lingkungan
t	= tahun inventori
W (t)	= jumlah sampah yang ditimbun pada tahun t
MCF	= *methane correction factor*
DOC	= jumlah material organik yang bisa terdekomposisi pada kondisi aerobik
DOCf	= proporsi DOC pada kondisi anaerobik
F	= fraksi gas metan dari total *landfill gas*
R (t)	= jumlah CH_4 terekoveri pada tahun t
OX (t)	= faktor oksidasi pada tahun t

k	= konstanta reaksi
M	= bulan dimulainya reaksi dengan jeda waktu 13 bulan
16/12	= rasio molekul CH_4 terhadap C
44/16	= rasio molekul CO_2 terhadap CH_4

Berdasarkan rumus perhitungan emisi gas metan dari IPCC GL 2006, jumlah potensi produksi gas metan tahun ini bergantung pada kandungan potensi komponen organik sampah yang bisa terdekomposisi tahun ini, dan sisa komponen organik sampah tahun sebelumnya yang belum terdekomposisi. Dimana, proses dekomposisi komponen organik akan bergantung pada nilai konstanta reaksi, faktor oksidasi, dan MCF. Perhitungan inventori produksi gas metan tersebut, akan digunakan data pendukung sebagai berikut.

Tabel 4. 17 Data Pendukung Proses Penimbunan Sampah

Berikut adalah contoh perhitungan inventori produksi gas metan dari sampah jenis bahan makanan pada model SFD. Model ini akan mengestimasikan jumlah produksi gas metan tahunan dari sampah bahan makanan yang tertimbun di TPA.

Gambar 4. 13 Contoh LCIA Produksi Gas Metan dari Proses Penimbunan Sampah Jenis Nappies di TPA Benowo

Perhitungan inventori gas metan dilakukan pada seluruh sampah organik yang ada di TPA Benowo. Berikut adalah model akumulasi produksi gas metan dari sampah tersebut. Variabel total CH_4 terbentuk menunjukan potensi gas metan yang bisa diproduksi dari komponen organik sampah TPA. Sedangkan variabel total CH_4 ke lingkungan adalah sisa dari CH4 yang terbentuk yang tidak dimanfaatkan untuk proses LFG *Power Plant* (CH_4 untuk LFG). Dari total CH_4 yang terbuang ke lingkungan apabila teroksidasi, sejumlah faktor oksidasi (OX), akan menghasilkan gas CO2 ke lingkungan.

Gambar 4. 14 Model Akumulasi Produksi Gas Metan dari Sampah Organik di TPA Benowo

4.3.6.3.3.LCIA IPAL

Air lindi yang masuk ke fasilitas IPAL, yang berasal dari air lindi proses pengangkutan, dan air lindi timbunan sampah di TPA, akan diproses dengan menggunakan teknologi AOP-NF. Teknologi ini membutuhkan zat oksidan seperti ozon, H_2O_2, dan UV serta dapat mengurangi kadar COD air lindi hingga 98.2% (Jang, et al., 2018). Berikut adalah data literatur yang digunakan untuk menghitung inventori fasilitas IPAL.

Tabel 4. 18 Data Pendukung Proses IPAL

Dampak proses IPAL yang diperhitungkan adalah dampak penggunaan sumber daya yang dibutuhkan dan emisi gas metan yang dihasilkan dari sisa komponen organik air (COD dan BOD). Berikut adalah model SFD untuk perhitungan inventori IPAL TPA Benowo.

Gambar 4. 15 Model LCIA Fasilitas IPAL di TPA Benowo

Hasil proses pengolahan air lindi yaitu air yang siap dilepaskan ke lingkungan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kandungan BOD dan COD pada air telah dikurangi sehingga aman apabila air terbuang ke lingkungan.

4.3.6.3.4.LCIA LFG Power Plant

LCIA LFG *Power Plant* akan menghitung dampak lingkungan dari kebutuhan energi listrik untuk operasional LFG Power Plant. Nilai dampak lingkungan akan bernilai 0 apabila hasil produksi listrik internal mampu mencukupi kebutuhan operasionalnya. Dengan menggunakan data dampak lingkungan yaitu nilai emisi C02 (ton) pada penggunaan listrik (kWh) sebesar 0.000725 ton/ kWh listrik, berikut adalah model SFD untuk mengestimasikan nilai emisi gas CO2 yang dihasilkan dari penggunaan listrik operasional LFG *Power Plant*.

Gambar 4. 16 Model SFD Estimasi Produksi Gas CO2 dari LFG Power Plant

4.3.6.4. Daya Dukung Lingkungan Surabaya

Daya dukung lingkungan Surabaya merupakan kapasitas lingkungan hidup dan sumber daya alam yang dimiliki oleh Surabaya dalam memenuhi kebutuhan masyarakat, seperti misalnya kapasitas lahan untuk memenuhi kebutuhan lahan masyarakat Surabaya atau kapasitas penyerapan limbah dari produksi limbah Surabaya. Dalam hal pengelolaan sampah Surabaya, daya dukung lingkungan akan dihitung dari kapasitas lingkungan Surabaya saat ini untuk mengatasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari pengelolaan sampah. Penelitian ini akan menghitung nilai dampak lingkungan pengelolaan sampah yaitu nilai produksi gas karbon dioksida, dan kapasitas lingkungan Surabaya untuk menyerap gas karbon dioksida tersebut. Nilai penyerapan dihitung dari nilai penyerapan emisi CO_2 rata-rata dari vegetasi ruang terbuka hijau (RTH) yang dimiliki oleh Surabaya. Saat ini, luas RTH Surabaya sebesar 7,290.53 Ha (21.79% dari total luas Surabaya) dengan kemampuan penyerapan emisi CO_2 sebesar 569.07 ton/ Ha setiap tahunnya (Mulyadin & Gusti, 2015). Berikut adalah model SFD yang menampilkan hasil produksi CO_2 dari aktivitas pengangkutan dan pengolahan sampah dari TPS hingga ke TPA Benowo, serta CO_2 yang bisa diserap oleh RTH Surabaya.

Gambar 4. 17 Model SFD Daya Dukung Lingkungan Surabaya (Daya Serap CO_2) terhadap Hasil Produksi Gas CO_2 Pengelolaan Sampah Surabaya

4.3.6.5.*Life Cycle Impact Assesment* Pengelolaan Sampah Surabaya

LCIA dilakukan dengan menggunakan metode IPCC 2013 GWP 500a V1.01, dengan kategori dampak IPCC GWP 500a dalam satuan kgCO_2eq. Metode ini menghasilkan faktor karakterisasi yang digunakan untuk mengklasifikasikan *input* dan *output* proses pengelolaan sampah ke dalam satu jenis kategori dampak (IPCC GWP 500a) yaitu emisi ke udara yang menyebabkan pemanasan global.

Tabel 4. 19 LC *Impact Assesment* Pengangkutan Sampah

Berikut adalah model pengkategorian dampak lingkungan dengan parameter besar kgCO2eq yang dihasilkan.

Gambar 4. 18 Model SFD Perhitungan Kategori Dampak kgCO2eq

4.3.7. SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Pengelolaan Sampah

Pada model SFD dampak sosial dan ekonomi pengelolaan sampah akan terbatas pada variabel jumlah sumber daya manusia yang menjadi pekerja, kebutuhan biaya operasional sampah, variabel pendapatan masyarakat, dan pendapatan listrik. Berikut adalah model SFD yang mengestimasikan nilai potensi dampak sosial dan ekonomi kondisi pengelolaan sampah saat ini.

Gambar 4. 19 Model SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Pengelolaan Sampah Surabaya Saat Ini

Berikut adalah detail data nilai ekonomi yang digunakan pada kondisi eksisting.

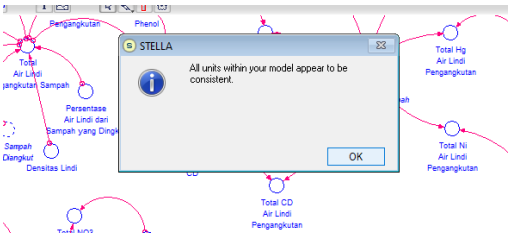
Tabel 4. 20 Data Nilai Ekonomi

4.4. Verifikasi dan Validasi SFD Model Simulasi Kondisi Eksisting

Setelah proses pembuatan model simulasi, selanjutkan adalah proses verifikasi dan validasi model simulasi. Verifikasi model merupakan proses pemeriksaan *error* yang mungkin terjadi dalam logika model simulasi. Sedangkan validasi model, adalah proses untuk memastikan bahwa model simulasi sudah representatif terhadap kondisi nyata.

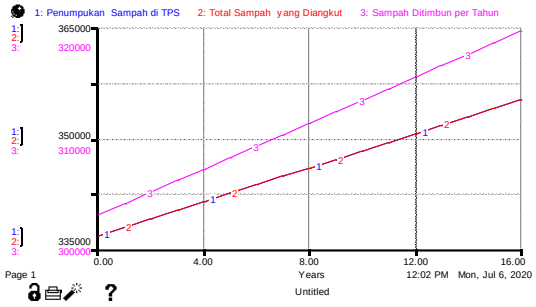
4.4.1. Verifikasi

Verifikasi dilakukan dengan menggunakan fitur *Check Units* pada menu *Run* di model Stella. Berikut merupakan hasil verifikasi model eksisting pengelolaan sampah Surabaya.



Gambar 4. 20 Verifikasi Model dengan Fitur *Check Units*

Selain itu, juga bisa dilakukan dengan mengecek kesesuaian formulasi dan output model. Seperti misalnya, peningkatan jumlah pembentukan sampah Surabaya akan berdampak pada peningkatan jumlah sampah di TPS, peningkatan jumlah sampah yang harus diangkut ke TPA, dan peningkatan jumlah sampah yang ditimbun di TPA Benowo. Berdasarkan data historis dan proyeksi pembentukan sampah Surabaya terdapat peningkatan jumlah sampah yang terbentuk setiap tahunnya yang mengakibatkan adanya peningkatan jumlah sampah yang terkumpul di TPS dan diangkut ke TPA Benowo.



Gambar 4. 21 Verifikasi Formula Model Kondisi Eksisting

4.4.2. Validasi

Dalam penelitian ini, terdapat lima proses validasi yang akan dilakukan pada model kondisi eksisting pengelolaan sampah Surabaya, yaitu uji struktur model, uji parameter model, uji kecukupan batasan model, uji kondisi ekstrim, dan uji perilaku atau replikasi.

4.4.2.1.Uji Struktur Model

Pengujian ini dilakukan dengan melihat model secara *white-box*, dengan melihat apakah struktur model sudah sesuai atau mirip dengan kondisi nyata. Model dinyatakan valid apabila telah mampu menggambarkan interaksi antar variabel dalam sistem nyata. Dalam penelitian ini, pembangunan struktur model telah mengacu pada literatur yang kredibel yaitu UU. No. 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah, Peraturan Daerah Kota Surabaya Nomor 5 Tahun 2014, dan Peraturan Walikota Surabaya Nomor 64 Tahun 2018 mengenai pengelolaan sampah di Surabaya serta literatur penelitian terdahulu dan jurnal terkait. Pembuatan model telah mengikuti gambaran struktur sistem pengelolaan sampah Surabaya sesuai dengan literatur, yang dimulai dari proses pembentukan sampah di masyarakat Surabaya, pengumpulan sampah oleh masyarakat ke TPS, pengangkutan sampah

TPS ke TPA Benowo oleh DKRTH, dan pengolahan sampah di TPA Benowo oleh PT. Sumber Organik.

4.4.2.2.Uji Kecukupan Batasan Model

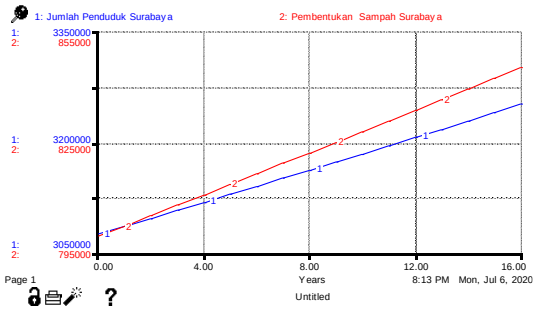
Pengujian kecukupan batasan model bertujuan untuk mengevaluasi batasan model yang digunakan terhadap pencapaian tujuan penelitian. Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi keberlanjutan pengelolaan sampah Surabaya saat ini dan merumuskan alternatif skenario yang dapat meningkatkan performansi pengelolaan sampah di masa depan dalam aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan serta yang terbatas pada sampah yang berakhir di TPA Benowo. Pengujian dilakukan dengan menghilangkan variabel yang tidak berpengaruh signifikan terhadap pencapaian tujuan hingga didapatkan model final kondisi eksisting pengelolaan sampah Surabaya.

4.4.2.3.Uji Parameter Model

Pengujian paramater model dilakukan dengan tujuan untuk menguji kesesuaian hubungan antar variabel. Seperti misalnya apabila hubungan antar variabel adalah positif, maka peningkatan nilai suatu variabel akan berdampak pada peningkatan variabel yang lain. Begitu juga dengan hubungan antar variabel yang negatif, dimana peningkatan nilai suatu variabel justru akan berdampak pada penurunan variabel yang lain. Berikut adalah hasil pengujian parameter untuk setiap sub model.

a. Sub Model Pembentukan Sampah Surabaya

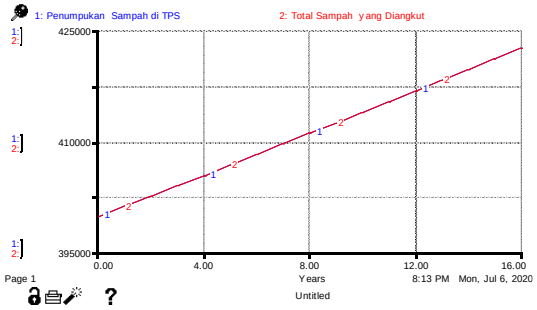
Pengujian paramater pada sub model pembentukan sampah Surabaya dilakukan untuk melihat konsistensi hubungan antar variabel yang mempengaruhi jumlah sampah yang terbentuk. Proses pembentukan sampah dipengaruhi oleh variabel jumlah penduduk dan variabel produksi sampah per penduduk, dimana peningkatan jumlah penduduk dan produksi sampah per penduduk akan berdampak pada peningkatan jumlah sampah yang terbentuk. Proyeksi jumlah penduduk Surabaya yang meningkat setiap tahunnya menghasilkan jumlah sampah yang meningkat pula.



Gambar 4. 22 Uji Parameter Sub Model Pembentukan Sampah Surabaya

b. Sub Model Penumpukan Sampah di TPS

Pengujian paramater sub model penumpukan sampah di TPS dilakukan untuk menguji kesesuaian hubungan variabel yang mempengaruhi jumlah penumpukan sampah di TPS. Penumpukan sampah di TPS dipengaruhi oleh jumlah produksi sampah Surabaya dan jumlah pengangkutan sampahsetiap tahunnya. Peningkatan jumlah sampah yang dibuang ke TPS akan menambah jumlah penumpukan sampah di TPS, dan peningkatan jumlah pengangkutan sampah TPS akan mengurangi jumlah sampah di TPS. Kesesuaian antara jumlah sampah TPS yang diangkut dengan jumlah penumpukan sampah di TPS akan berdampak pada tidak adanya sisa sampah yang menumpuk di TPS setiap tahunnya.

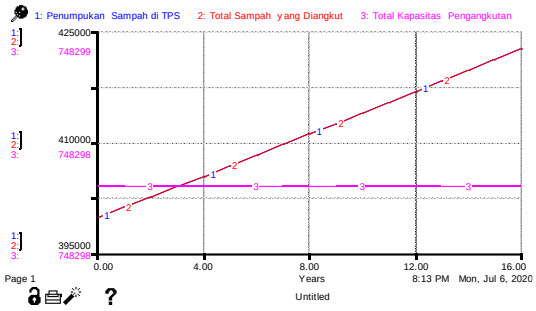


Gambar 4. 23 Uji Parameter Sub Model Penumpukan Sampah di TPS

c. Sub Model Pengangkutan Sampah TPS ke TPA Benowo

Pengujian parameter sub model pengangkutan sampah TPS ke TPA Benowo dilakukan untuk menguji konsistensi hubungan antar variabel yang mempengaruhi proses pengangkutan sampah. Terdapat variabel jumlah sampah TPS yang harus diangkut dan total kapasitas pengangkutan yang mempengaruhi jumlah sampah yang diangkut. Saat ini, total kapasitas kendaraan pengangkutan sampah Surabaya sebesar 748,298 ton per tahun. Dimana total kapasitas ini masih

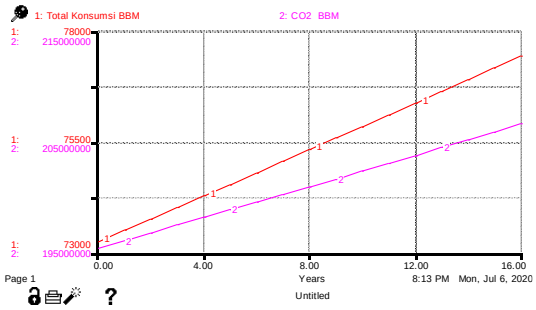
mampu mengangkut potensi peningkatan jumlah sampah hingga akhir tahun proyeksi, tahun 2032. Sehingga, jumlah penumpukan sampah di TPS sepenuhnya bisa diangkut ke TPA.



Gambar 4. 24 Uji Parameter Sub Model Pengangkutan Sampah TPS ke TPA Benowo

d. Sub Model Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah – Penggunaan BBM Kendaraan

Pengujian parameter sub model dampak lingkungan pengangkutan sampah dari penggunaan BBM kendaraan pengangkutan sampah dilakukan untuk menguji konsistensi hubungan antar variabel yang berpengaruh terhadap besar dampak lingkungan yang dihasilkan. Adapun dampak lingkungan ini dipengaruhi oleh besar konsumsi BBM kendaraan per tahunnya. Sehingga, adanya peningkatan konsumsi BBM berdampak pada peningkatan dampak lingkungan yaitu peningkatan emisi CO2, N2O, dan CH4 yang dihasilkan dari proses penggunaan BBM.

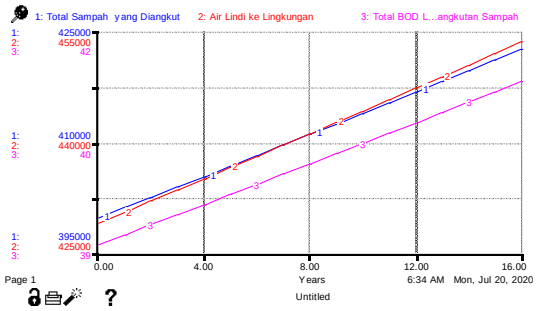


Gambar 4. 25 Uji Parameter Sub Model Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah – Penggunaan BBM Kendaraan

e. Sub Model Pengangkutan Sampah – Air Lindi

Pengujian sub model air lindi hasil proses pengangkutan sampah dilakukan untuk menguji konsistensi hubungan antar variabel yang mempengaruhi jumlah produksi air lindi pengangkutan sampah. Dengan menggunakan data produksi air

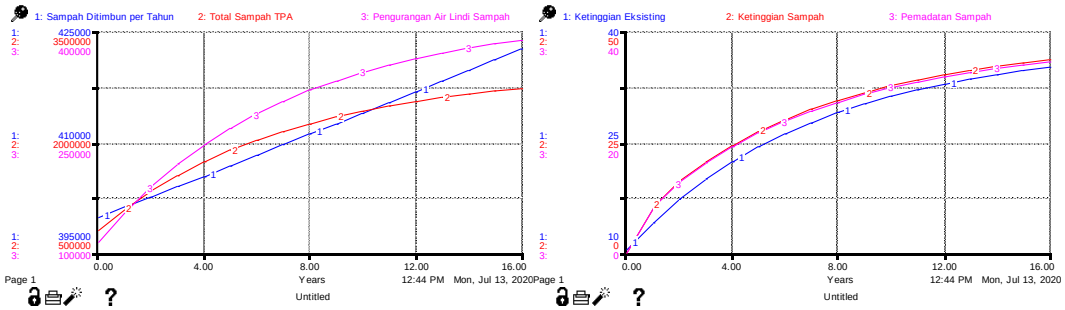
lindi per ton sampah sebesar 0.1424 ton dan faktor kompresi sebesar sebesar 3.28%, maka peningkatan jumlah sampah yang diangkut juga berdampak pada peningkatan jumlah air lindi. Air lindi yang mengandung beragam komponen organik dan zat kimia akan mengakibatkan peningkatan produksi komponen tersebut seiring dengan peningkatan jumlah air lindi.



Gambar 4. 26 Uji Parameter Sub Model Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah – Air Lindi

f. Sub Model TPA Benowo - Penimbunan Sampah

Pengujian parameter sub model penimbunan sampah di TPA Benowo dilakukan untuk menguji konsistensi hubungan antar variabel yang mempengaruhi akumulasi jumlah sampah yang tertimbun di TPA. Adapun penambahan jumlah timbunan sampah (berat) dipengaruhi oleh jumlah sampah yang masuk dan ditimbun di TPA. Sedangkan pengurangan jumlah timbunan sampah (berat) dipengaruhi oleh produksi air lindi yang disalurkan ke fasilitas IPAL. Sementara itu, untuk pengurangan jumlah timbunan sampah (volume) bergantung pada upaya pemadatan sampah yang dilakukan oleh pengelola TPA.

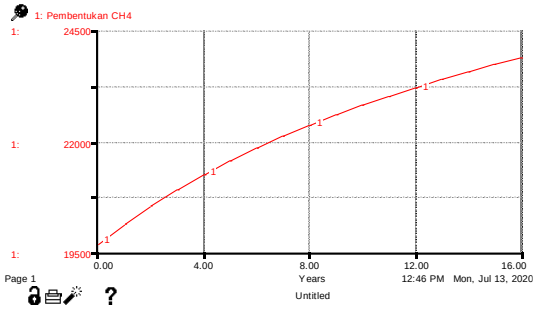


Gambar 4. 27 Uji Parameter Sub Model Penimbunan Sampah di TPA Benowo

g. Sub Model Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah di TPA Benowo

Proses pengujian paramater sub model dampak lingkungan penimbunan sampah di TPA Benowo dilakukan untuk menguji kesesuaian hubungan antar

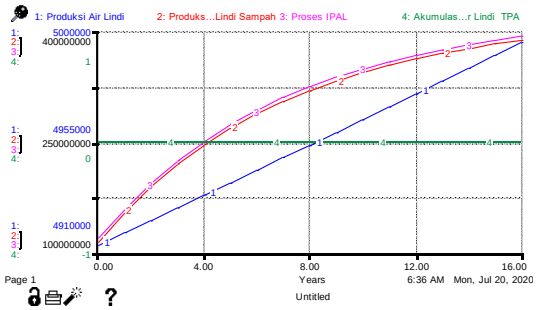
variabel yang mempengaruhi total dampak lingkungan yang dihasilkan. Dampak lingkungan penimbunan sampah yaitu pembentukan gas metan hasi proses dekomposisi sampah organik. Peningkatan jumlah timbunan sampah setiap tahunnya berdampak pada peningkatan jumlah gas metan yang dihasilkan.



Gambar 4. 28 Uji Parameter Sub Model Dampak Gas Metan Timbunan Sampah

h. Sub Model TPA Benowo - Produksi Air Lindi

Pengujian parameter sub model produksi air lindi TPA Benowo dilakukan untuk menguji kesesuaian hubungan antar variabel yang mempengaruhi akumulasi air lindi yang ada di TPA Benowo. Akumulasi air lindi dipengaruhi oleh produksi air lindi dan kapasitas IPAL setiap tahunnya, dimana produksi air lindi dipengaruhi oleh jumlah air lindi hasil pengangkutan sampah dan air lindi timbunan sampah. Sedangkan, kapasitas IPAL di TPA Benowo sebesar 438,000,000 liter per tahun. Berdasarkan hasil running model dapat diketahui bahwa dengan pengoptimalan utilitas kapasitas IPAL, maka dapat diketahui bahwa dari seluruh air lindi yang tertampung di IPAL dapat terolah.

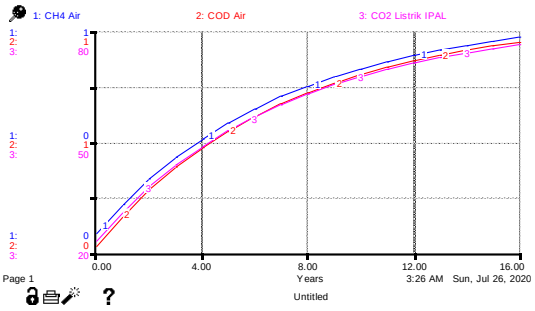


Gambar 4. 29 Uji Parameter Sub Model Produksi Air Lindi di TPA Benowo

i. Sub Model Dampak Lingkungan Air Lindi TPA Benowo

Pengujian parameter sub model dampak lingkungan air lindi TPA Benowo dilakukan untuk menguji kesesuaian hubungan antar variabel yang berpengaruh

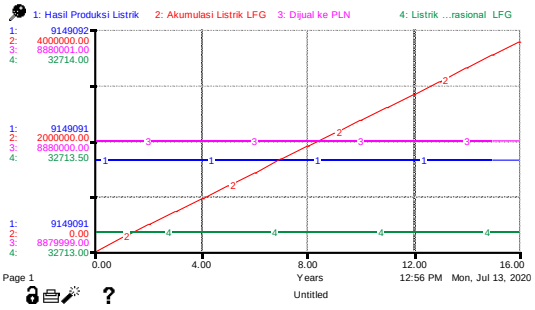
terhadap total dampak lingkungan yang dihasilkan. Peningkatan jumlah air lindi yang tidak tertangani dalam IPAL akan berdampak pada lingkungan akibat emisi air lindi yang dihasilkan.



Gambar 4. 30 Uji Parameter Sub Model Dampak Lingkungan Air Lindi di TPA Benowo

j. Sub Model LFG Power Plant

Pengujian parameter sub model LFG Power Plant dilakukan untuk menguji kesesuaian hubungan antar variabel yang mempengaruhi akumulasi jumlah listrik hasil proses LFG. Adapun variabel yang berpengaruh yaitu kapasitas produksi, penjualan listrik ke PLN, dan penggunaan listrik untuk operasional LFG. Jumlah produksi listrik yang jauh lebih besar dari pada jumlah yang dijual dan digunakan untuk operasional LFG, berdampak pada adanya akumulasi jumlah listrik yang dihasilkan yang bisa digunakan untuk kebutuhan operasional TPA lainnya.

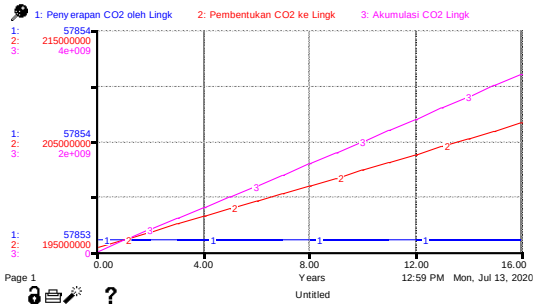


Gambar 4. 31 Uji Parameter Sub Model Proses pada LFG Power Plant

k. Sub Model Daya Dukung Lingkungan

Pengujian paramater sub model daya dukung lingkungan digunakan untuk melihat kesesuaian hubungan antar variabel yang berpengaruh terhadap kemampuan daya dukung lingkungan Surabaya. Variabel ini yaitu jumlah pembentukan dan jumlah penyerapan gas karbon dioksida tahunan, dimana

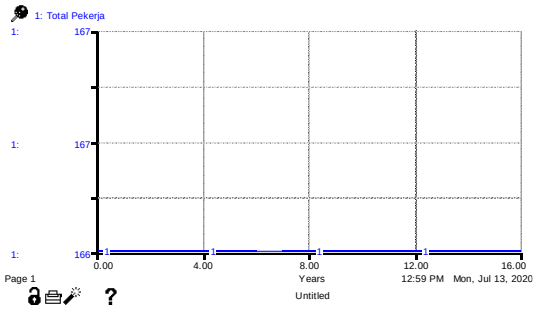
kemampuan penyerapan gas karbon dioksida dipengaruhi oleh kemampuan RTH Surabaya dalam menyerap gas tersebut.



Gambar 4. 32 Uji Parameter Sub Model Daya Dukung Lingkungan terhadap Penyerapan Emisi Gas Karbon Dioksida Hasil Pengelolaan Sampah Surabaya

l. Sub Model Dampak Sosial Pengelolaan Sampah Surabaya

Pengujian parameter sub model dampak sosial pengelolaan sampah Surabaya dilakukan untuk menguji kesesuaian hubungan antar variabel yang berpengaruh terhadap besar potensi dampak lingkungan dari proses pengelolaan sampah. Dampak sosial berupa penyerapan tenaga kerja pengelolaan sampah dipengaruhi oleh kebutuhan pekerja pada setiap proses pengelolaan sampah, yaitu pekerja pengangkutan sampah, dan pekerja LFG Power Plant. Oleh karena tidak adanya penambahan kapasitas pengelolaan sampah hingga akhir tahun proyeksi, maka tidak ada perubahan total pekerja yang dipekerjakan.

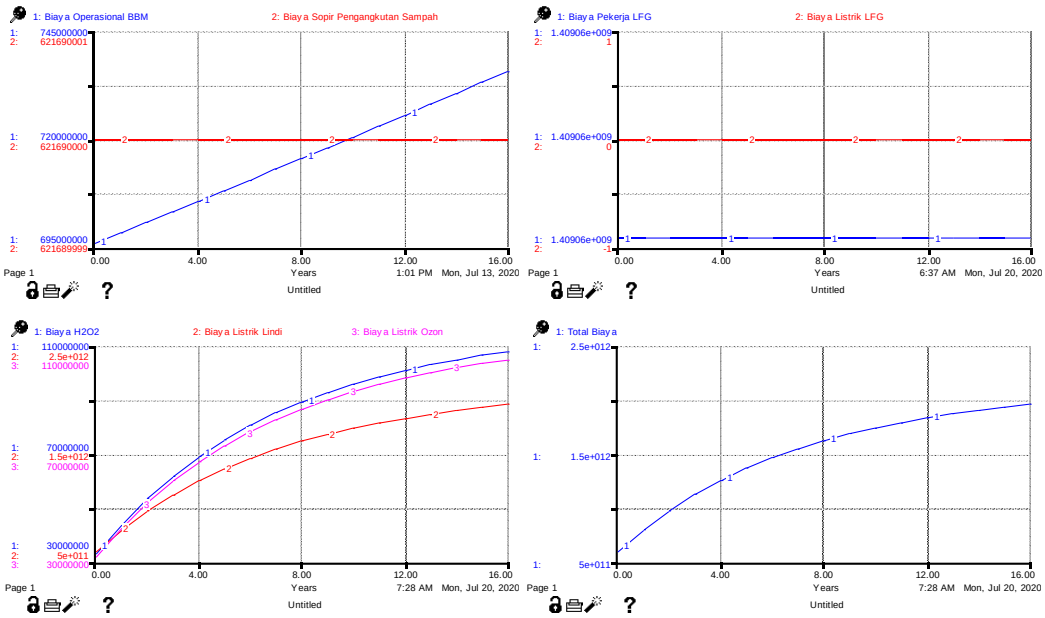


Gambar 4. 33 Uji Parameter Sub Model Dampak Sosial Pengelolaan Sampah Surabaya

m. Sub Model Dampak Ekonomi Pengelolaan Sampah Surabaya

Pengujian parameter sub model dampak ekonomi pengelolaan sampah dilakukan untuk menguji kesesuaian hubungan antar variabel yang mempengaruhi nilai potensi dampak ekonomi pengelolaan sampah. Dampak ekonomi yang ada berupa potensi biaya yang harus dikeluarkan dan potensi pendapatan yang bisa

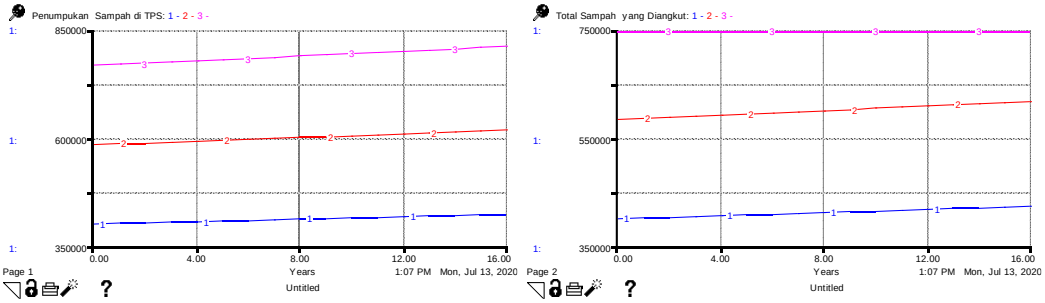
didapat. Potensi biaya yang harus dikeluarkan dipengaruhi oleh biaya operasional proses pengangkutan dan pengolahan sampah (biaya sewa pengolahan sampah di TPA, biaya operasional proses IPAL, dan biaya operasional proses LFG *Power Plant*). Sedangkan potensi pendapatan dipengaruhi oleh besar pendapatan hasil penjualan listrik dari *LFG Power Plant*. Dimana peningkatan besar komponen biaya atau pendapatan akan berdampak pada peningkatan total keperluan biaya atau total pendapatan yang diperoleh.

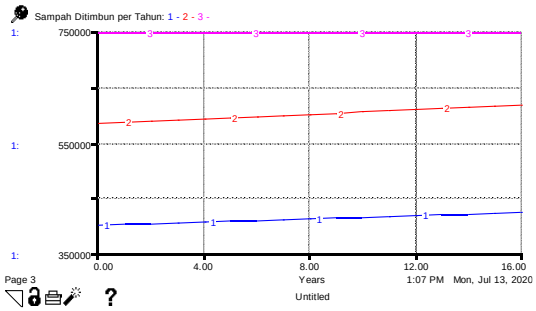


Gambar 4. 34 Uji Parameter Sub Model Dampak Ekonomi Pengelolaan Sampah Surabaya

4.4.2.4.Uji Kondisi Ekstrim

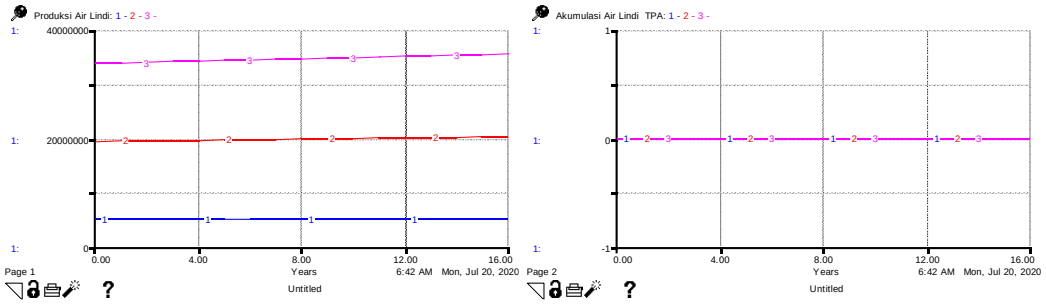
Pengujian kondisi ekstrim bertujuan untuk menguji kemampuan model untuk memodelkan sistem pada kondisi ekstrim, dengan memasukkan nilai ekstrim bawah dan atas pada variabel kontrol. Apabila nilai ekstrim tersebut merubah pola grafik hasil simulasi model, maka dapat disimpulkan bahwa model tidak bisa digunakan pada kondisi ekstrim.





Gambar 4. 35 Grafik Kondisi Ekstrim Jumlah Produksi Sampah per Penduduk (Ton/ Tahun)

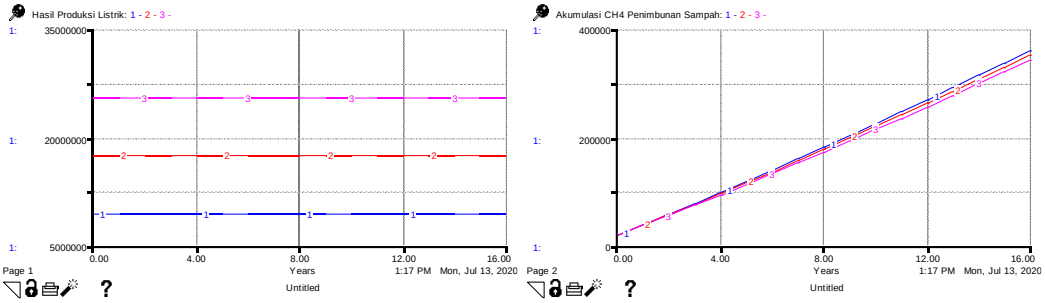
Grafik di atas menunjukkan pengaruh perubahan nilai parameter jumlah produksi sampah per penduduk (ton/tahun) terhadap jumlah timbunan sampah di TPS, jumlah sampah yang diangkut, dan jumlah sampah yang ditimbun di TPA Benowo setiap tahunnya. Nilai parameter yang digunakan yaitu: kondisi 1 (0.260 ton/tahun), kondisi 2 (0.380 ton/ tahun), dan kondisi 3 (0.500 ton/ tahun). Seluruh kondisi menunjukkan perilaku yang sama yaitu peningkatan jumlah produksi sampah akan berdampak pada peningkatan jumlah sampah yang diangkut dan ditimbun di TPA Benowo. Namun, pada kondisi 3 dimana jumlah produksi sampah tiap penduduk mencapai 0.500 ton per tahun, jumlah sampah yang seharusnya diangkut masih lebih besar daripada kapasitas pengangkutan. Sehingga pada kondisi 3 ini, jumlah sampah yang diangkut hanya sebesar kapasitas pengangkutannya.



Gambar 4. 36 Grafik Kondisi Ekstrim Proporsi Air Lindi Pengangkutan Sampah

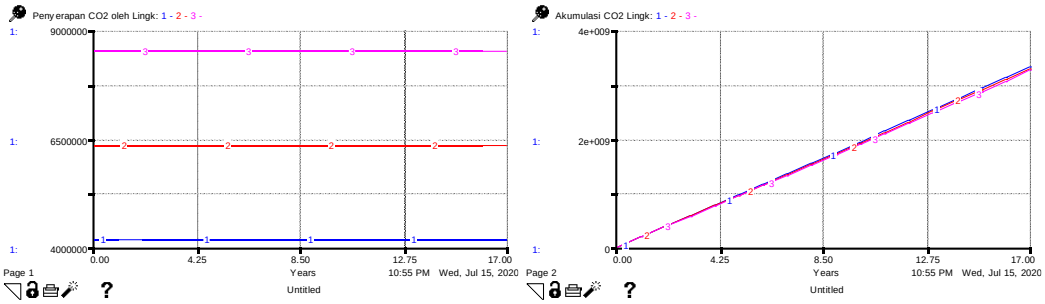
Grafik di atas menunjukkan pengaruh perubahan nilai parameter faktor kompresi pengangkutan sampah terhadap akumulasi jumlah air lindi TPA Benowo dan dampak lingkungan dari air lindi setiap tahunnya. Nilai parameter yang digunakan yaitu: kondisi 1 (3.28%), kondisi 2 (36.4%), dan kondisi 3 (69.6%). Seluruh kondisi menunjukkan perilaku yang sama, yaitu faktor kompresi

berdampak pada peningkatan jumlah produksi air lindi. Sedangkan untuk akumulasi air lindi di TPA tetap 0 karena kapasitas IPAL yang jauh lebih besar.



Gambar 4. 37 Grafik Kondisi Kapasitas Produksi LFG Power Plant

Grafik di atas menunjukkan pengaruh perubahan nilai parameter kapasitas produksi listrik LFG *Power Plant* terhadap hasil listrik yang diproduksi dan akumulasi CH_4 di lingkungan. Nilai parameter yang digunakan yaitu: kondisi 1 (11,000,000 kWh/ tahun), kondisi 2 (21,000,000 kWh/ tahun), dan kondisi 3 (30,000,000 kWh/ tahun). Pada seluruh kondisi menunjukkan bahwa adanya peningkatan jumlah kapasitas produksi LFG Power Plant berdampak pada peningkatan hasil produksi listrik yang dihasilkan dan pengurangan akumulasi gas metan proses penimbunan sampah di TPA Benowo.



Gambar 4. 38 Grafik Kondisi Luasan RTH Surabaya

Grafik di atas menunjukkan pengaruh perubahan nilai parameter luas ruang terbuka hijau Surabaya terhadap total penyerapan dan akumulasi gas karbon dioksida di lingkungan. Nilai parameter yang digunakan yaitu: kondisi 1 (7,291 Ha), kondisi 2 (11,145 Ha), dan kondisi 3 (15,000 Ha). Pada seluruh kondisi menunjukkan bahwa adanya peningkatan jumlah luas RTH akan berdampak pada peningkatan jumlah penyerapan karbon dioksida dan pengurangan jumlah akumulasi karbon dioksida di lingkungan.

4.4.2.5.Uji Perilaku Model

Pengujian perilaku model dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan perilaku model simulasi dengan perilaku sistem nyata. Perbandingan dilakukan dengan membanding hasil simulasi dengan data aktual yang dimiliki, yaitu jumlah produksi sampah, jumlah sampah di TPS, jumlah sampah yang diangkut, dan produksi gas metan selama tahun 2017 hingga 2019. Nilai tingkat kepercayaan sebesar 5% digunakan untuk membandingkan dengan nilai *error* hasil uji perilaku model.

Tabel 4. 21 Perbandingan Jumlah Penduduk Surabaya Aktual dan Simulasi

Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata perbedaan jumlah penduduk simulasi dan aktual, nilai errornya sebesar 1%. Selain itu, juga dilakukan pengujian *paired t-test* untuk menguji ada atau tidaknya perbedaan antara data penduduk hasil simulasi dan aktual.

Tabel 4. 22 Hasil Pengujian Jumlah Penduduk Hasil Simulasi dan Data Aktual dengan *Paired t-test*

Ho yang digunakan yaitu rata-rata jumlah penduduk simulasi sama dengan rata-rata jumlah penduduk aktual, maka dengan *p-value* = 0.516 yang lebih besar dari tingkat kepercayaan yang digunakan yaitu 0.05, maka Ho diterima atau tidak adanya perbedaan antara data aktual dan simulasi jumlah penduduk sampah Surabaya.

Tabel 4. 23 Perbandingan Jumlah Produksi Sampah Surabaya Hasil Simulasi dan Aktual

Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata perbedaan jumlah produksi sampah simulasi dan aktual, nilai *error*nya sebesar 1%. Selain itu, juga dilakukan pengujian *paired t-test* untuk menguji ada atau tidaknya perbedaan antara data produksi jumlah sampah hasil simulasi dan aktual.

Tabel 4. 24 Hasil Pengujian Produksi Sampah Hasil Simulasi dan Data Aktual dengan *Paired t-test*

Ho yang digunakan yaitu rata-rata jumlah produksi sampah simulasi sama dengan rata-rata jumlah produksi sampah aktual, maka dengan *p-value* = 0.979. Nilai *p-value* lebih besar dari tingkat kepercayaan yang digunakan yaitu 0.05, maka Ho diterima atau tidak adanya perbedaan antara data aktual dan simulasi jumlah produksi sampah Surabaya.

Tabel 4. 25 Perbandingan Jumlah Sampah TPS Hasil Simulasi dan Aktual

Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata perbedaan jumlah sampah TPS simulasi dan aktual, nilai errornya sebesar 4.5%. Selain itu, juga dilakukan pengujian *paired t-test* untuk menguji ada atau tidaknya perbedaan antara data jumlah sampah TPS hasil simulasi dan aktual.

Tabel 4. 26 Hasil Pengujian Jumlah Sampah TPS Hasil Simulasi dan Data Aktual dengan *Paired t-test*

Ho yang digunakan yaitu rata-rata jumlah sampah TPS simulasi sama dengan rata-rata jumlah sampah TPS aktual, maka dengan *p-value* = 0.283 yang lebih besar dari tingkat kepercayaan yang digunakan yaitu 0.05. Maka kesimpulannya adalah Ho diterima atau tidak adanya perbedaan antara data aktual dan simulasi jumlah sampah TPS.

Tabel 4. 27 Perbandingan Jumlah CH4 Timbunan Sampah (Ton) Hasil Simulasi dan Perhitungan Excel IPCC GL 2006

Berdasarkan hasil perhitungan rata-rata perbedaan jumlah gas metan timbunan sampah TPA simulasi dan aktual, nilai errornya sangat kecil dan kurang dari 5%.

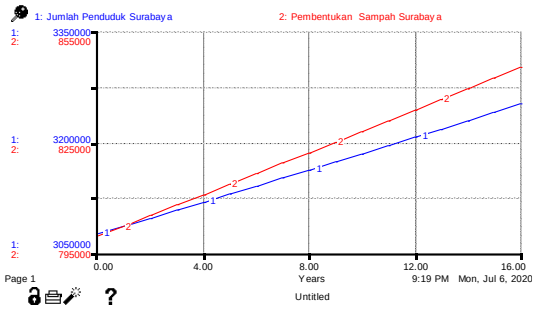
4.5. Analisis Simulasi Model Eksisting Pengelolaan Sampah Surabaya

Pada proses running model simulasi, kurun waktu yang digunakan adalah antara tahun 2017 hingga tahun 2032. Hal ini dikarenakan pelaksanaan program Jakstrada mulai tahun 2017 hingga tahun 2025 serta masa berlaku kontrak antara

PT. Sumber Organik dan Pemerintah Surabaya yaitu hingga tahun 2032. Penelitian ini akan memprediksi performansi kapasitas pengelolaan sampah saat ini untuk mengelola sampah di masa depan hingga tahun 2032.

4.5.1. Submodel Pembentukan Sampah Perkotaan Surabaya

Hasil simulasi submodel pembentukan sampah perkotaan Surabaya menunjukkan adanya peningkatan jumlah produksi sampah sebagai dampak peningkatan jumlah penduduk Surabaya.



Gambar 4. 39 Jumlah Penduduk dan Produksi Sampah Perkotaan Surabaya

Berikut adalah detail proyeksi jumlah penduduk dan jumlah produksi sampah penduduk Surabaya hingga tahun 2032. Data proyeksi ini akan digunakan untuk memprediksi kemampuan pengelolaan sampah saat ini untuk mengolah potensi peningkatan jumlah sampah hingga tahun 2032.

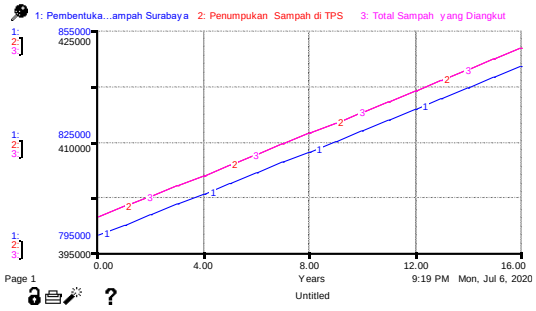
Tabel 4. 28 Jumlah Penduduk dan Produksi Sampah Surabaya Tahun 2017 - 2032

Dari total produksi sampah tersebut akan berakhir di fasilitas TPS, TPS 3R/ TPS terpadu, bank sampah, atau sampah liar. Dalam penelitian ini hanya akan dibahas sampah Surabaya yang berakhir di TPS dengan proporsi sebesar 50% dari total sampah.

4.5.2. Submodel Penumpukan Sampah di TPS

Hasil simulasi submodel penumpukan sampah pada 267 TPS yang dikelola oleh Surabaya menunjukkan terjadinya peningkatan jumlah sampah di TPS setiap tahunnya hingga akhir tahun 2032. Peningkatan terjadi disebabkan oleh peningkatan jumlah produksi sampah Surabaya seperti pada Gambar 4.40, dimana

50% sampah tersebut berakhir pada 267 TPS sepanjang tahunnya. Sedangkan pengurangan jumlah penumpukan sampah di TPS dipengaruhi oleh jumlah sampah yang diangkut, dimana jumlah sampah yang diangkut ini bergantung pada kapasitas pengangkutan sampah yang dimiliki oleh Pemerintah Kota Surabaya. Pada grafik di bawah terlihat bahwa total sampah yang diangkut di TPS sesuai dengan jumlah penumpukan sampah yang ada di TPS. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kapasitas pengangkutan yang dimiliki Pemerintah Kota Surabaya saat ini mampu mengatasi peningkatan jumlah sampah hingga tahun 2032 dengan jumlah produksi sampah per penduduk sekitar 0.262 ton per tahun.



Gambar 4. 40 Jumlah Sampah yang Terkumpul di TPS Surabaya

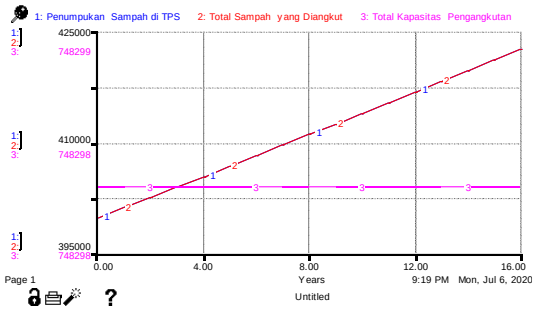
Berikut adalah detail data proyeksi jumlah sampah yang ada di TPS dan total sampah yang terangkut setiap tahunnya.

Tabel 4. 29 Jumlah Sampah di TPS Surabaya Tahun 2017 - 2032

4.5.3. Submodel Pengangkutan Sampah TPS ke TPA Benowo

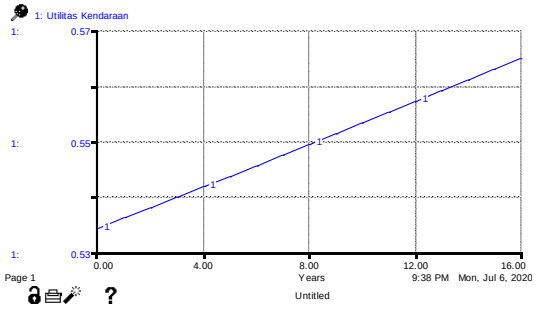
Jumlah sampah TPS yang diangkut ke TPA Benowo dipengaruhi oleh total kapasitas pengangkutan, dimana total kapasitas pengangkutan yang lebih kecil dari jumlah sampah TPS akan berdampak pada peningkatan utilitas kendaraan, penambahan ritase perjalanan kendaraan (perjalanan dari TPS ke TPA Benowo) yang berdampak pada peningkatan konsumsi BBM, atau terjadinya penumpukan sampah di TPS akibat kekurangan kapasitas pengangkutan. Sedangkan untuk total kapasitas pengangkutan yang lebih besar juga akan berdampak pada penurunan utilitas kendaraan, tidak beroperasinya beberapa kendaraan atau sopir, dan dampak positifnya yaitu tidak adanya jumlah sampah yang menumpuk di TPS. Saat ini, dari total unit kendaraan yang beroperasi, data kapasitas kendaraan maksimum untuk

mengangkut sampah, dan jumlah ritase per hari yang diterapkan, total kapasitas pengangkutan sampah mencapai 748,298 ton per tahunnya. Kapasitas ini mampu untuk mengangkut total sampah yang masuk ke TPS setiap tahunnya selama tahun 2017 hingga 2032. Hal ini dapat dilihat pada grafik jumlah sampah TPS dan jumlah sampah pengangkutan yang memiliki nilai yang sama.



Gambar 4. 41 Hasil Running SFD Proses Pengangkutan Sampah Surabaya

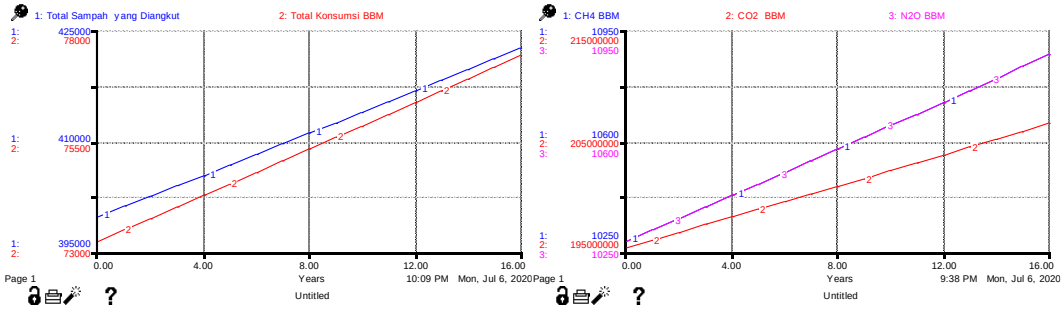
Selain itu, grafik tersebut juga menunjukkan bahwa hingga tahun 2032, jumlah kapasitas pengangkutan masih lebih besar dari jumlah sampah yang diangkut. Hal ini dikarenakan adanya asumsi bahwa setiap ritase perjalanan mengangkut sampah, kendaraan mengangkut sampah sebesar kapasitas maksimumnya. Kondisi ini berdampak pada tidak adanya akumulasi sampah TPS yang belum terangkut, juga berdampak pada utilitas penggunaan kendaraan pengangkutan sampah. Perhitungan utilitas ini dilihat dari perbandingan nilai jumlah sampah yang seharusnya diangkut terhadap batas maksimal jumlah sampah yang bisa diangkut setiap tahunnya. Berdasarkan estimasi pada model, hingga akhir tahun 2032 dengan kapasitas pengangkutan saat ini, utilitas kendaraan adalah sebesar 57%. Pengoptimalan utilitas kendaraan dapat dilakukan dengan me-*lay off* kendaraan pengangkutan yang sudah tua dengan tetap mempertimbangkan batas minimum total kapasitas pengangkutan per tahun yang dibutuhkan.



Gambar 4. 42 Utilitas Kendaraan Pengangkutan Sampah

4.5.4. Submodel Dampak Lingkungan Penggunaan BBM Kendaraan Pengangkutan Sampah

Peningkatan dampak lingkungan penggunaan bahan bakar dipengaruhi oleh faktor dampak lingkungan konsumsi bahan bakar per liternya dan peningkatan jumlah konsumsi bahan bakar. Berdasarkan perhitungan data historis konsumsi bahan bakar kendaraan pengangkutan, konsumsi bahan bakar mencapai 0.1832 liter per ton sampah yang diangkut. Perhitungan dilakukan dengan membagi total konsumsi bahan bakar dengan total sampah yang diangkut selama tahun 2017 hingga tahun 2019. Adanya peningkatan jumlah sampah di TPS akan berdampak pada peningkatan jumlah konsumsi bahan bakar. Hasil simulasi submodel pengangkutan sampah TPS berikut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah dampak lingkungan penggunaan BBM hingga tahun 2032 terjadi sebagai akibat dari peningkatan jumlah sampah yang harus diangkut.



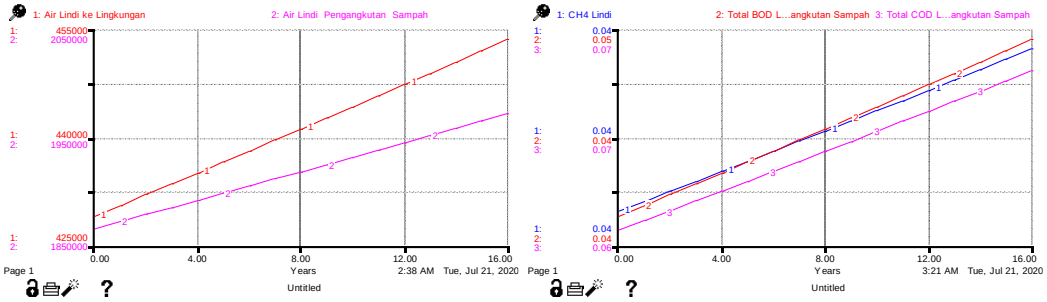
Gambar 4. 43 Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah dari Proses Penggunaan BBM

Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi jumlah konsumsi BBM adalah dengan pengurangan jumlah sampah yang harus diangkut. Upaya ini secara tidak langsung dapat mengurangi jumlah dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses penggunaan BBM. Selain itu, pengaplikasian teknologi yang dapat mengurangi pelepasan emisi pemakaian BBM ke lingkungan juga bisa dilakukan pada kendaraan pengangkutan sampah.

4.5.5. Submodel Dampak Lingkungan Air Lindi Pengangkutan Sampah

Salah satu komponen sampah yang diangkut dari proses pengangkutan adalah air lindi yang bersumber dari kandungan air pada sampah atau tetesan air yang masuk ke sampah. Pada kendaraan tipe *compactor*, terdapat wadah penampung air lindi untuk kemudian dibuang pada fasilitas IPAL. Sedangkan pada

kendaraan tipe *armroll*, tidak terdapat wadah penampung sehingga berpotensi tercecer di jalan selama proses pengangkutan dan mencemari lingkungan.



Gambar 4. 44 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan dari Produksi Air Lindi pada Proses Pengangkutan Sampah

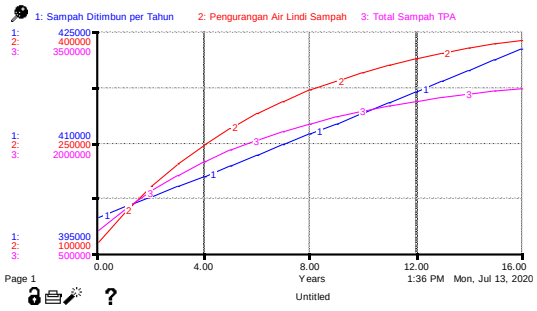
Dengan menggunakan data estimasi air lindi sebesar 142.22 liter per ton sampah, faktor kompresi sebesar 3.28%, dan estimasi proporsi air lindi yang tercecer di lingkungan, berikut adalah proyeksi produksi air lindi pengangkutan sampah hingga tahun 2032. Grafik di atas menunjukkan bahwa terjadi peningkatan jumlah produksi air lindi pengangkutan sampah setiap tahunnya, dimana air lindi dapat mencemari udara akibat gas metan yang dikeluarkan oleh kandungan BOD dan COD pada air lindi. Pengurangan produksi air lindi hanya dapat dilakukan dengan upaya pengurangan jumlah sampah. Sedangkan upaya pengurangan dampak lingkungannya dapat dilakukan dengan pengolahan air lindi pada fasilitas IPAL.

4.5.6. Submodel Penimbunan Sampah di TPA Benowo

Grafik berikut adalah grafik akumulasi timbunan sampah di TPA dalam ton. Akumulasi timbunan sampah ini meningkat setiap tahunnya seiring dengan adanya peningkatan jumlah timbunan sampah yang masuk ke TPA, yang salah satunya bersumber dari TPS. Pada timbunan sampah juga terdapat kandungan air (air lindi) yang berasal dari sampah itu sendiri (sampah minuman yang masih ada isinya), tetesan air hujan yang masuk di antara timbunan sampah, dan atau cairan obat yang disemprotkan ke timbunan sampah. Pengurangan jumlah timbunan sampah (ton) terjadi karena pengurangan jumlah air lindi untuk diolah pada fasilitas pengolahan air limbah. Estimasi jumlah air lindi yang diolah per tahun ini dengan menggunakan

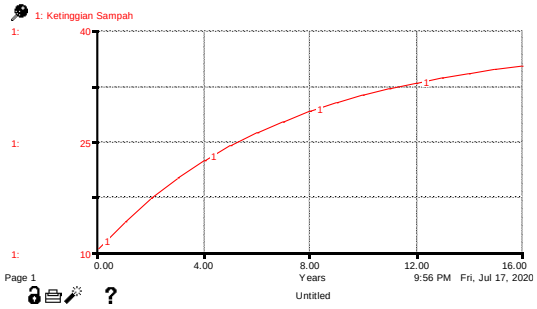
data produksi air lindi per ton sampah, data intensitas curah hujan yang tertampung di TPA, dan data jumlah cairan yang disemprotkan ke sampah selama satu tahun.

Pengurangan jumlah tonase timbunan sampah di TPA oleh air lindi ini masih menyisakan jumlah timbunan sampah, dimana peningkatan jumlah sampah berbeda tiap tahunnya bergantung pada jumlah pengurangan air lindi. Selain itu, besar air lindi yang diproduksi juga bergantung pada jumlah timbunan sampah, dimana semakin banyak jumlah timbunan sampah maka produksi jumlah air lindi juga semakin besar (*closed loop*).



Gambar 4. 45 Akumulasi Jumlah Timbunan Sampah di TPA Benowo

Peningkatan jumlah timbunan sampah berdampak pada peningkatan tinggi sampah dimana ketinggian maksimum timbunan sampah yang diizinkan adalah sebesar 25 m. Dengan upaya pemadatan ketinggian sampah yang dilakukan oleh PT Sumber Organik saat ini, yaitu pemadatan hingga 3.53 ton sampah per m^3, maka diestimasikan ketinggian timbunan sampah pada tahun 2022 mencapai 26.11 m, lebih besar dari pada batas maksimum tinggi timbunan sampah yang diizinkan. Upaya yang bisa dilakukan untuk mengurangi jumlah timbunan sampah tersebut adalah peningkatan proses pemadatan sampah, penambahan luas area penimbunan, dan atau pengurangan jumlah sampah yang masuk ke TPA setiap tahunnya yang diiringi upaya pengurangan jumlah sampah yang ada di TPA.



Gambar 4. 46 Ketinggian Timbunan Sampah di TPA Benowo

4.5.7. Submodel Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah

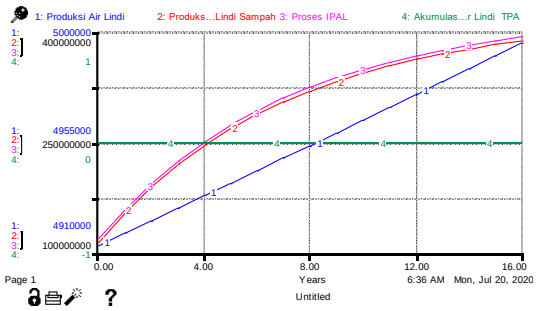
Dampak lingkungan penimbunan sampah meningkat seiring dengan peningkatan jumlah timbunan sampah di TPA Benowo. Salah satu parameter dampak lingkungan terbesar adalah emisi gas metan yang dihasilkan dari proses dekomposisi sampah organik. Hal ini dikarenakan, sebesar 78.73% timbunan sampah TPA merupakan komponen organik yang bisa terdekomposisi dan menghasilkan gas metan, yaitu sebesar 38.77% sampah makanan, 21.08% sampah perkebunan, 2.56% sampah kertas, 1.62% sampah karton, 3.82% sampah kain, dan 10.87% diapers. Pada grafik di bawah, yaitu Gambar 1, dapat diketahui bahwa peningkatan jumlah timbunan sampah berdampak pada peningkatan jumlah produksi gas metan.

Komponen organik yang terakumulasi di TPA setiap tahun mulai terdekomposisi setelah 12 bulan (satu tahun pasca proses penimbunan sampah) dan proses dekomposisi berlansung secara bertahap setiap tahun hingga pada akhirnya sudah tidak ada komponen organik yang bisa terdekomposisi (habis). Dimana besarnya komponen yang terdekomposisi setiap tahunnya dipengaruhi oleh tingkat pembentukan gas metan yang berbeda setiap kategori sampah yang ada. Komponen organik yang belum terdekomposisi akan terakumulasi dan habis akibat proses dekomposisi apabila tidak ada penambahan sampah dengan kandungan komponen organik. Sehingga, penimbunan jumlah sampah di TPA setiap tahunnya dapat berfungsi untuk menjaga keberlanjutan proses produksi gas metan. Pada Gambar 2, dapat diketahui bahwa tingkat produksi CH_4 tidak sama setiap tahunnya, cenderung lebih kecil dari pada tahun sebelumnya yang disebakan oleh tingkat penambahan komponen organik yang terdekomposisi juga mengecil setiap tahunnya. Penurunan tingkat penambahan komponen organik ini terjadi karena jumlah komponen organik yang terdekomposisi lebih besar daripada jumlah komponen organik yang ditimbun setiap tahunnya. Meskipun begitu, jumlah penimbunan sampah atau komponen organik setiap tahunnya hingga tahun 2032, masih menjaga keberlanjutan produksi gas metan.

Gambar 4. 47 Produksi Gas Metan Penimbunan Sampah

4.5.8. Submodel Produksi Air Lindi TPA

Produksi air lindi dipengaruhi oleh air lindi hasil proses pengangkutan dan air lindi timbunan sampah di TPA Benowo. Grafik berikut menunjukkan adanya peningkatan jumlah produksi air lindi setiap tahunnya. Peningkatan jumlah produksi air lindi ini dipengaruhi oleh peningkatan jumlah produksi air lindi pengangkutan sampah dan produksi air lindi timbunan sampah di TPA. Air lindi ini kemudian akan terakumulasi di TPA dan dikurangi atau disterilkan dengan menggunakan fasilitas IPAL. Saat ini fasilitas IPAL mampu mengolah air lindi hingga sebesar 438 juta liter setiap tahunnya. Pengoperasian penuh fasilitas IPAL ini telah mampu mengolah akumulasi air lindi di TPA Benowo.



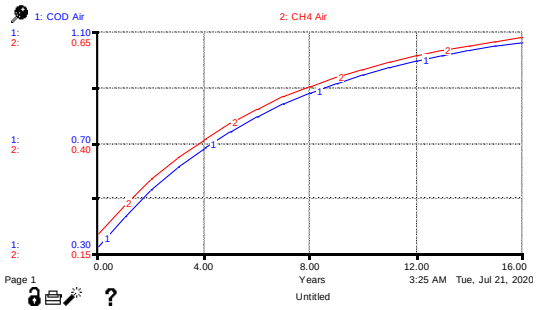
Gambar 4. 48 Hasil Running Proses Produksi Air Lindi di TPA Benowo

Berikut adalah detail proyeksi jumlah produksi air lindi yang terbentuk dan terolah pada fasilitas IPAL TPA Benowo.

Tabel 4. 30 Proyeksi Air Lindi TPA Benowo Tahun 2017 hingga 2032

4.5.9. Submodel Dampak Lingkungan Air Lindi Penimbunan Sampah

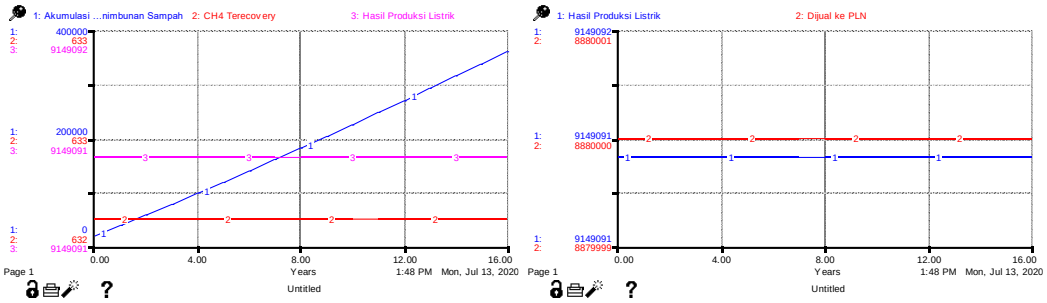
Dampak pencemaran udara air lindi berasal dari kandungan komponen organik seperti BOD dan COD yang bisa terdekomposisi menghasilkan gas metan. Penggunaan teknologi AOP-NF pada fasilitas IPAL yang dipercaya mampu menurunkan kadar COD hingga 98.2% per liter air lindi. Berikut adalah akumulasi COD, dan CH4 yang tersisa pada air yang telah diproses pada IPAL.



Gambar 4. 49 Hasil Perhitungan Dampak Lingkungan dari Produksi Air Lindi TPA Benowo

4.5.10. Submodel LFG Power Plant

LFG *power plant* berfungsi untuk mengonversi gas metan hasil penimbunan sampah menjadi energi listrik yang siap dijual ke PLN atau dikonsumsi sendiri oleh PT Sumber Organik. Hasil energi listrik yang diproduksi saat ini sangat bergantung pada kapasitas pembangkit yaitu sebesar 10,763,636.363 kWh per tahun. Padahal, estimasi jumlah listrik yang terproduksi seharusnya lebih besar oleh karena produksi gas metan yang juga jauh lebih besar seperti pada grafik berikut.



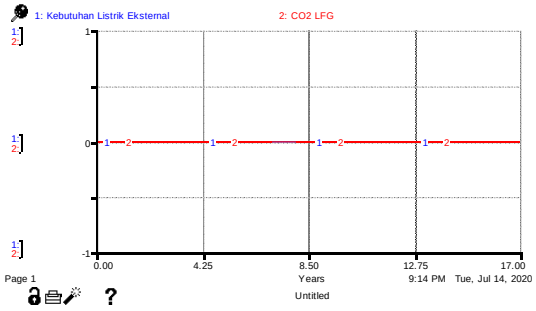
Gambar 4. 50 Hasil Produksi Listrik pada LFG Power Plant TPA Benowo

Upaya peningkatan kapasitas produksi listrik LFG Power Plant dapat dilakukan untuk mengurangi jumlah CH4 yang terakumulasi di lingkungan. Berdasarkan data historis, saat ini sebesar 8,880,000 kWh listrik telah dijual ke PLN setiap tahunnya dan sisa produksi listrik digunakan untuk operasional LFG Power Plant. Apabila peningkatan kapasitas produksi ini diiringi dengan peningkatan jumlah listrik yang dijual ke PLN, maka selain berdampak pada pengurangan dampak gas metan ke lingkungan, juga akan berdampak pada potensi peningkatan jumlah pendapatan yang bisa diperoleh. Berikut adalah detail nilai potensi gas metan di TPA Benowo dan yang telah terolah dengan pembangkit yang ada sekarang.

Tabel 4. 31 Proyeksi Gas Metan TPA Benowo Tahun 2017 hingga 2032 (Ton)

4.5.11. Submodel Dampak Lingkungan LFG Power Plant

Dalam proses pengolahan gas metan menjadi listrik juga dibutuhkan energi listrik, dimana penggunaan energi listrik dapat memberikan dampak ke lingkungan yang bersumber dari proses pengolahan listrik, seperti misalnya emisi proses pembakaran batu bara. Kebutuhan energi listrik pada pembangkit ini sepenuhnya menggunakan energi listrik hasil pengolahan gas metan sampah, sehingga dampak lingkungan tidak dihasilkan dari proses penggunaan listrik. Namun, apabila terdapat kekurangan pasokan listrik yang membutuhkan listrik dari pihak eksternal, maka terdapat perhitungan nilai emisi dampak penggunaan energi listrik tersebut.



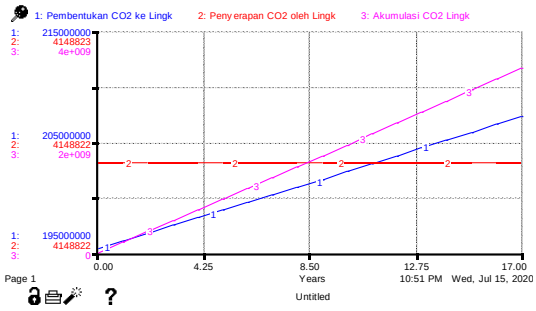
Gambar 4. 51 Hasil Produksi Gas CO2 dari Penggunaan Listrik Operasional LFG Power Plant

4.5.12. Submodel Daya Dukung Lingkungan terhadap Pengelolaan Sampah

Daya dukung lingkungan digunakan untuk mengukur kemampuan lingkungan dalam mendukung kegiatan masyarakat yang tinggal dalam lingkungan tersebut. Dalam hal pengelolaan sampah, daya dukung lingkungan digunakan untuk mengukur kemampuan lingkungan untuk mendukung aktivitas pengelolaan sampah, seperti misalnya kemampuan lingkungan dalam menyediakan lahan dan air yang dibutuhkan untuk mengelola sampah atau kemampuan lingkungan untuk menetralisir dampak lingkungan pengelolaan sampah.

Dalam penelitian ini, daya dukung lingkungan digambarkan dalam bentuk kemampuan lingkungan untuk menyerap gas karbon dioksida hasil proses pengelolaan sampah. Kemampuan lingkungan ini diukur dari jumlah maksimum CO_2 yang bisa diserap oleh ruang terbuka hijau (RTH) yang dimiliki Surabaya saat ini. Grafik berikut menunjukkan bahwa kemampuan penyerapan CO_2 RTH Surabaya saat ini sebesar 57,854 ton per tahun. Kemampuan penyerapan ini lebih

kecil dari pada jumlah CO_2 yang terbentuk dari proses pengelolaan sampah setiap tahunnya. Hal ini berdampak pada terakumulasinya CO_2 yang terbentuk di lingkungan.

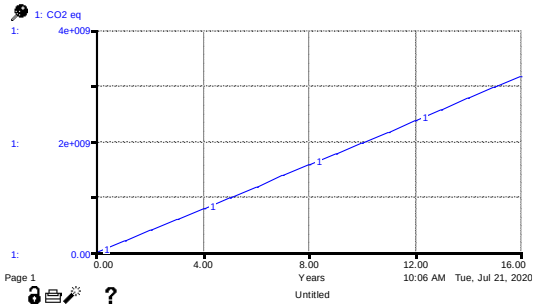


Gambar 4. 52 Proyeksi Nilai Penyerapan CO_2 oleh Lingkungan dibandingkan dengan Nilai Pembentukan C_{O2} ke Lingkungan

Upaya yang dapat dilakukan dalam rangka mengurangi jumlah akumulasi CO_2 di lingkungan adalah melalui peningkatan jumlah RTH atau mengurangi jumlah timbunan sampah sehingga proses pengolahan sampah yang menghasilkan emisi gas karbon dioksida dapat dikurangi.

4.5.13. Submodel Paramater Dampak Lingkungan

Berikut adalah hasil penilaian kategori dampak lingkungan berupa akumulasi CO_2eq (emisi gas rumah kaca) penyebab pemanasan global. Grafik berikut menunjukkan adanya peningkatan parameter dampak seiring dengan peningkatan jumlah produksi sampah penduduk setiap tahunnya.



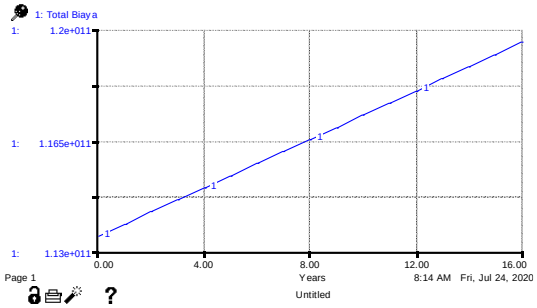
Gambar 4. 53 Proyeksi Peningkatan Nilai CO_2eq

4.5.14. Submodel Dampak Ekonomi dan Sosial Pengelolaan Sampah Surabaya Kondisi Eksisting

Dampak ekonomi pengelolaan sampah diperoleh dari potensi biaya harus dikeluarkan dan potensi pendapatan yang diperoleh dari proses pengelolaan sampah

Surabaya saat ini. Potensi biaya yang dikeluarkan yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu biaya operasional pengangkutan sampah (biaya bahan bakar dan gaji sopir pengangkutan sampah), biaya sewa pengelolaan sampah yang harus dibayarkan kepada pengelola TPA, biaya operasional IPAL (biaya listrik dan H_2O_2), dan biaya operasional pembangkit listrik gas metan (biaya listrik, dan biaya pekerja). Sedangkan potensi pendapat yang diperoleh yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu pendapatan hasil penjualan listrik ke PLN.

Peningkatan jumlah sampah yang harus dikelola dan kapasitas pengelolaan sampah berdampak pada peningkatan jumlah biaya yang harus dikeluarkan, seperti peningkatan jumlah timbunan sampah TPS yang berdampak pada peningkatan biaya operasional pengangkutan sampah. Selain itu, peningkatan jumlah produksi listrik dapat meningkatkan potensi pendapatan yang bisa diperoleh dari hasil penjualan listrik tersebut. Berikut adalah hasil estimasi total kebutuhan biaya dan potensi pendapatan pengelolaan sampah kondisi eksisting hingga tahun 2032.

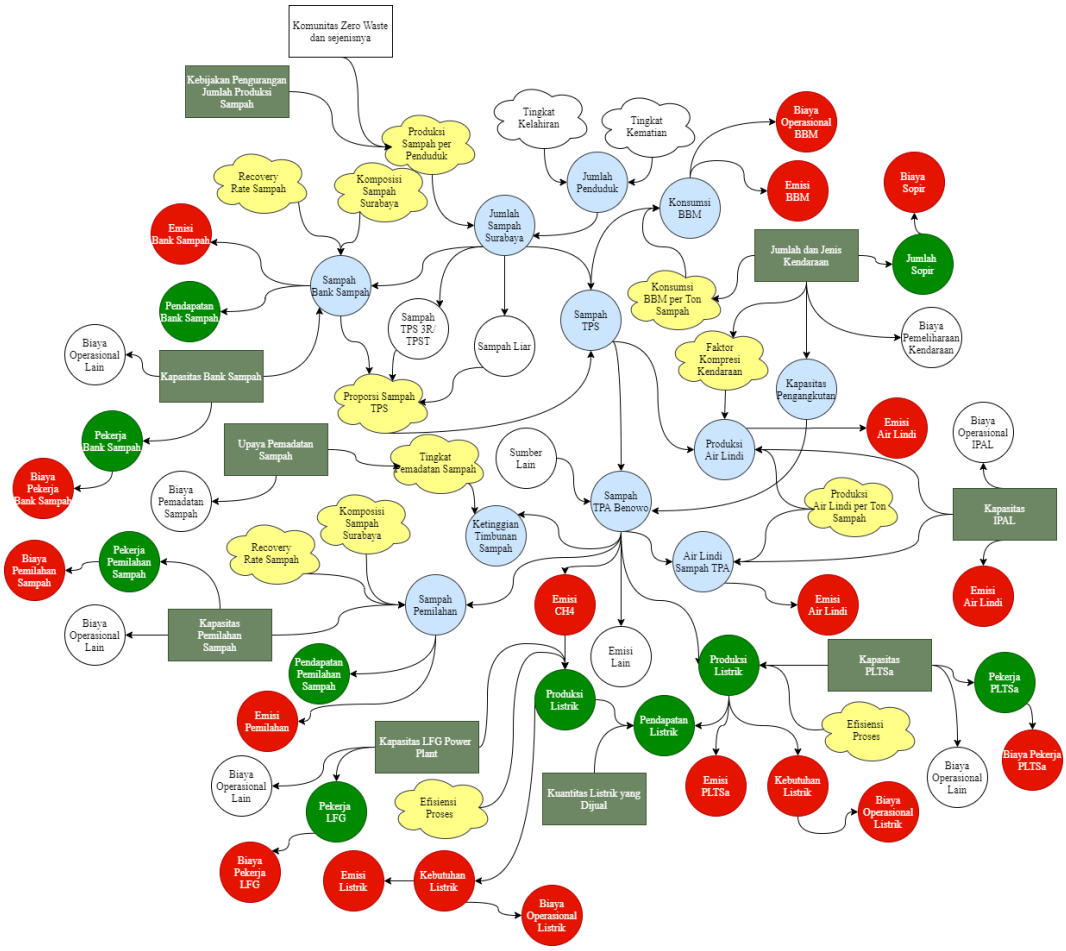


Gambar 4. 54 Nilai Ekonomi Operasional Pengelolaan Sampah

Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi biaya pengelolaan sampah yaitu dengan mengurangi jumlah sampah yang harus dikelola atau mengefisiensikan proses pengelolaan sampah. Sedangkan upaya yang bisa dilakukan untuk meningkatkan pendapatan yaitu meningkatkan jumlah listrik yang dijual ke PLN atau mencari alternatif pengelolaan sampah lain yang bisa meningkatkan nilai ekonomis sampah seperti proses daur ulang, dan pengomposan sampah.

BAB V
PERANCANGAN SKENARIO PENGELOLAAN SAMPAH SURABAYA

Pada Bab 5 akan dipaparkan mengenai perancangan skenario pengelolaan sampah dalam rangka meningkatkan performansi pengelolaan sampah Surabaya.



Gambar 5. 1 *Influence Diagram* Kondisi Skenario Pengelolaan Sampah Surabaya

Keterangan :

- Dampak Negatif/ Pengeluaran
- Dampak Positif/ Pendapatan
- Ketidakpastian
- Data
- Keputusan/ Kebijakan
- Sub-sistem yang tidak diamati

Skenario ini akan diimplementasikan pada model kondisi eksisting pengelolaan sampah Surabaya, dimana berdasarkan hasil *running* dan analisis model pada Bab 4, dapat disimpulkan bahwa model telah valid dan representatif terhadap kondisi eksisting pengelolaan sampah Surabaya saat ini. Perancangan skenario dilakukan dengan merubah nilai parameter variabel terkontrol atau merubah struktur sistem dengan menambahkan entitas baru. Skenario akan dievaluasi berdasarkan aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial serta pengurangan jumlah timbunan sampah, dan peningkatan jumlah sampah yang tertangani setiap tahunnya. Hal ini sejalan dengan salah satu tujuan penelitian ini yaitu mengukur keberlanjutan pengelolaan sampah Surabaya dan merumuskan alternatif kebijakan yang dapat menjamin keberlanjutan pengelolaan sampah Surabaya di masa depan.

5.1 Perancangan Skenario Perubahan Parameter

Skenario perubahan nilai parameter model dilakukan dengan merubahan nilai pada variabel kontrol, yaitu: (1) Kapasitas LFG *Power Plant*, (2) Luas Ruang Terbuka Hijau, (3) Jumlah Listrik yang Dijual ke PLN, dan (4) Jumlah Kendaraan Pengangkutan Sampah yang Dioperasikan, dan (5) Upaya Pemadatan Sampah.

Tabel 5. 1 Skenario Perubahan Parameter

Peningkatan kapasitas pembangkit listrik gas metan didasari oleh besarnya potensi gas metan yang masih belum dimanfaatkan. Sedangkan penambahan luas RTH dikarenakan tingginya akumulasi CO_2 yang terlepas ke lingkungan yang bisa diatasi oleh penyerapan CO_2 dari vegetasi hijau. Kemudian peningkatan jumlah penjualan listrik dilakukan untuk merespon peningkatan kapasitas listrik yang bisa dihasilkan dan pengurangan jumlah kendaraan jenis *armroll* didasari oleh kendaraan *armroll* yang tidak memiliki alat penampung lindi sehingga lebih berpotensi untuk mencemari lingkungan akibat tetesan air lindi sampah. Sedangkan peningkatan upaya pemadatan sampah dilakukan untuk menjaga agar ketinggian timbunan sampah TPA tidak mencapai batas maksimum tinggi sampah yang diizinkan. Ketujuh variabel kontrol tersebut hanya memiliki satu nilai paramater, sehingga ketiga skenario tersebut langsung dikombinasikan menjadi satu skenario.

Tabel 5. 2 Variabel Kontrol

No	Variabel Kontrol	Nilai
1	Peningkatan Kapasitas LFG Power Plant	32,290,908 kWh/ tahun (200%)
2	Peningkatan Penjualan Listrik ke PLN	200%
3	Peningkatan Luas Ruang Terbuka Hijau	10,000 Ha
4	*Layoff Armroll*	15%
5	Upaya Pemadatan Sampah	5 ton/ m3

Hasil simulasi kombinasi alternatif skenario tersebut akan dianalisis berdasarkan variabel respon yang diamati mulai tahun 2021 hingga 2032. Berikut adalah variabel respon yang digunakan dalam proses evaluasi dan penilaian alternatif skenario.

Tabel 5. 3 Variabel Respon

No	Variabel Respon	No	Variabel Respon
1	Jumlah Sampah TPS	**8**	Utilitas IPAL
2	Akumulasi Sampah TPS	**9**	Akumulasi CO2 Lingkungan
3	Utilitas Kendaraan Pengangkutan	**10**	Nilai CO2eq
4	Akumulasi Sampah TPA	**11**	Total Kebutuhan Biaya
5	Ketinggian Timbunan Sampah	**12**	Total Pendapatan
6	Produksi Air Lindi TPA	**13**	Total Penyerapan Pekerja
7	Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah		

5.1.1 Skenario 1: Peningkatan Kapasitas LFG Power Plant – Peningkatan Hasil Penjualan Listrik – Peningkatan Luas RTH – Layoff Kendaraan Armroll – Peningkatan Upaya Pemadatan Sampah

Skenario ini meningkatkan kapasitas LFG Power Plant menjadi sebesar 32,290,908 kWh/ tahun (2 kali lipat kondisi eksisting), peningkatan penjualan listrik ke PLN sebesar 200% (17,600,000 kWh/ tahun), peningkatan jumlah RTH menjadi 10,000 Ha, dan *layoff* kendaraan jenis *armroll* sebanyak 15% yaitu jumlah *armroll* 6 m^3 menjadi 7 unit, *armroll* 8 m^3 menjadi 15 unit, dan *armroll* 14 m^3 menjadi 40 unit, dan peningkatan upaya pemadatan sampah hingga 5 ton per m^3 Berikut adalah hasil simulasi model skenario 1.

Gambar 5. 2 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 1

Berikut adalah detail perbandingan hasil simulasi berdasarkan nilai rata-rata variabel respon mulai tahun 2021 hingga 2032.

Tabel 5. 4 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 1

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 1	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	414,743.34	0.00%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	0.55	0.66	19.10%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	2,400,200.00	2,400,200.00	0.00%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	30.90666667	21.82	-29.40%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	337,165,070.55	337,165,070.55	0.00%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	1,935,253.46	1,935,253.46	0.00%
Utilitas IPAL	0.79	0.79	0.00%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,046,745,576.98	2,038,266,718.52	-0.41%
Dampak Lingkungan CO2eq	2,064,710,383.27	2,056,156,428.60	-0.41%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	117,503,880,718.39	127,096,971,455.82	8.16%
Total Pendapatan (Rp)	16,655,401,260.00	33,010,705,200.00	98.20%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	166	201	21.08%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.2 Perancangan Skenario Perubahan Struktur

Skenario perubahan struktur adalah penambahan entitas baru atau subsistem baru ke dalam model eksisting yang dilakukan untuk meningkatkan performansi atau pencapaian tujuan sistem. Dalam penelitian ini perancangan skenario perubahan struktur terbagi ke dalam skenario penambahan alternatif pengelolaan sampah di TPA Benowo (subsistem pengolahan sampah dengan teknologi gasifikasi dan subsistem pemilahan sampah terpusat di TPA), dan skenario pengumpulan sampah dari masyarakat (skenario pengembangan kapasitas bank sampah). Penambahan teknologi pengolah sampah di TPA disebabkan oleh belum

adanya upaya mengurangi jumlah timbunan sampah yang ada di TPA. Padahal, setiap harinya terdapat sampah yang masuk ke TPA yang berdampak pada peningkatan jumlah berat dan ketinggian sampah. Selain itu, upaya ini juga diperlukan sebagai upaya menjaga ketinggian sampah di bawah batas maksimum ketinggian sampah yang diizinkan, yaitu 25 meter. Sedangkan skenario pengembangan kapasitas dan teknologi bank sampah dilakukan dalam rangka mengurangi jumlah sampah masyarakat di TPS yang berdampak pada pengurangan jumlah sampah ke TPA. Berikut adalah detail penjelasan dan perubahan model SFD kondisi pengelolaan sampah.

5.3.1 Skenario PLTSa TPA Benowo dengan Proses Gasifikasi

PLTSa Gasifikasi direncanakan dapat mengolah sampah non-organik yang ada di TPA sebesar 1,000 ton per hari dengan output listrik yang dihasilkan yaitu sebesar 5,381,818.182 kWh per bulan, dimana 75% hasil produksi listriknya akan dijual ke PLN (Widarti, 2019). Sampah TPA, selain sampah kaca dan logam, akan digunakan sebagai bahan bakar PLTSa.

Gambar 5. 1 Model SFD Sampah untuk Proses PLTSa Gasifikasi

PLTSa ini direncanakan mampu mempekerjakan sekitar 60 orang untuk kapasitas eksisting *(Widarti, 2019)*. Berikut adalah model SFD yang menampilkan dampak ekonomi dan sosial dari PLTSa yaitu pendapatan hasi penjualan listrik dan penyerapan pekerja PLTSa.

Gambar 5. 2 Model SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Skenario PLTSa Gasifikasi

5.3.1.1 Dampak Lingkungan PLTSa TPA Benowo dengan Proses Gasifikasi

Berikut adalah tahapan proses pengukuran dampak lingkungan dengan metode LCA pada proses gasifikasi.

5.3.1.1.1 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses Termokimia - Gasifikasi

Tujuan dan batasan dari pengukuran dampak lingkungan proses gasifikasi adalah sebagai berikut.

Tabel 5. 5 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses Gasifikasi

Tujuan	Batasan
Untuk mengukur dampak lingkungan dari proses gasifikasi sampah	Unit fungsi yang digunakan adalah untuk mengolah sampah selama tahun 2017 hingga 2032 (ton/tahun)

5.3.1.1.2 Identifikasi Proses Termokimia - Gasifikasi

Berikut adalah gambaran dari *input*, proses, dan *output* proses gasifikasi.

Tabel 5. 6 Identifikasi Proses Gasifikasi

Input	**Proses**	***Output***
Sampah (ton) Energi listrik (kWh)	Gasifikasi	Energi listrik (kWh) Emisi gas (ton)

5.3.1.1.3 Life Cycle Inventory Analysis Proses Termokimia - Gasifikasi

Dalam perhitungan inventori dampak lingkungan proses gasifikasi, akan digunakan data pendukung sebagai berikut.

Tabel 5. 7 Data Pendukung Proses Termokimia – Gasifikasi

Berikut adalah model SFD dampak lingkungan skenario PLTSa Proses Gasifikasi. Nilai dampak lingkungan dipengaruhi oleh jumlah sampah yang diolah untuk menghasilkan listrik.

Gambar 5. 3 Model SFD Dampak Lingkungan Skenario PLTSa Gasifikasi

5.3.1.1.4Life Cycle Impact Assesment Proses Termokimia - Gasifikasi

LCIA dilakukan dengan menggunakan metode IPCC 2013 GWP 500a V1.01, dengan kategori dampak IPCC GWP 500a dalam kgCO_2eq. Metode ini menghasilkan faktor karakterisasi yang digunakan untuk mengklasifikasikan input dan output proses gasifikasi ke dalam satu jenis kategori dampak, yaitu mengklasifikasikan data inventori sebagai penyebab pemanasan global atau penyebab akumulasi gas rumah kaca di lingkungan (IPCC GWP 500a).

Tabel 5. 8 LC Impact Assesment Proses Termokimia – Gasifikasi

5.3.2 Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Komposting di TPA Benowo

Pada penelitian ini akan menggunakan standar fasilitas pemilahan yang telah dibangun di Surabaya dimana setiap pemilahan sebesar 50 ton sampah per hari membutuhkan 60 pekerja pemilahan sampah. Nilai ini mengacu pada nilai kapasitas awal dari super depo pemilahan sampah di Surabaya yang dibangun oleh Pemerintah Jepang yang bekerja sama dengan Pemerintah Kota Surabaya. Selain itu, untuk lokasi pengomposan menggunakan standar kapasitas 20 ton sampah per hari dengan kebutuhan sekitar 5 pekerja pengomposan. Dalam proses pemilahan sampah yang menghasilkan 1 ton sampah diperlukan masukan sampah lebih dari 1 ton begitu juga dengan proses pengomposan. Hal ini disebabkan oleh kondisi sampah di TPA Benowo yang sudah bercampur sehingga sebagian sampah sudah tidak bisa dimanfaatkan lagi. Oleh karena itu, terdapat asumsi nilai *recovery rate* sampah yang menggambarkan estimasi sampah yang masih bisa diolah lebih lanjut. Berikut adalah nilai *recovery rate* untuk proses pemilahan dan pengomposan sampah di TPA Benowo.

Tabel 5. 9 Nilai *Recovery Rate* Sampah TPA Benowo

Dari rencana pengembangan fasilitas pemilahan sampah terpusat ini, dampak ekonomi bisa dilihat dari kebutuhan biaya investasi dan operasional serta pendapatan yang didapatkan dari pemilahan dan pengomposan sampah. Dengan hanya mempertimbangkan biaya operasional pekerja, maka dibutuhkan biaya sebesar Rp 2,100,000 per bulan untuk setiap pekerja. Sedangkan estimasi pendapatan tambahan bagi TPA Benowo yaitu sebesar nilai ekonomi sampah hasil penjualan sampah terpilah dan proses pengomposan. Selain dampak ekonomi, penyerapan tenaga kerja untuk memilah dan mengolah sampah juga dapat meningkatkan dampak sosial dari pengelolaan sampah Surabaya.

Pada model berikut dapat diketahui bahwa jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo terlebih dahulu akan dipilah. Sampah organik (sampah kebun, sampah makanan, dan sampah kayu) akan dikomposting, sedangkan sampah anorganik (sampah plastik, logam, aluminium, kertas, karton, kaca, dsb) yang masih bernilai jual akan dijual ke pengepul. Jumlah sampah yang dikomposting

dipengaruhi oleh jumlah sampah organik yang masuk ke TPA Benowo setiap harinya, kapasitas pengomposan, dan *recovery rate* sampah yang dikomposting. Sedangkan jumlah sampah yang dijual ke pengepul, dipengaruhi oleh jumlah sampah anorganik dari hasil pengangkutan sampah ke TPA Benowo setiap harinya, kapasitas pemilahan sampah, dan *recovery rate* sampah yang dipilah. Sampah yang dipilah di TPA cenderung memiliki kualitas yang lebih rendah dibandingkan apabila dipilah pada sumber sampah yang berdampak pada perolehan pendapatan .

Tabel 5. 10 Tabel Harga Sampah Hasil Pemilahan dan Pengomposan (Rp/ Ton)

Produk kompos dan sampah yang dijual ke pengepul dengan data potensi harga per tonnya, akan menghasilkan potensi pendapatan yang bisa diterima oleh pengelola fasilitas pemilahan. Sedangkan sisa sampah yang tidak terolah atau terjual, akan ditimbun di TPA. Berikut adalah model SFD pemilahan sampah terpusat di TPA Benowo.

Gambar 5. 4 SFD Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

Dalam pengoperasian fasilitas pemilahan ini, juga dibutuhkan biaya berupa biaya operasional pekerja daur ulang dan pekerja pengomposan. Berikut adalah dampak ekonomi dan sosial dari skenario pemilahan sampah terpusat di TPA Benowo.

Gambar 5. 5 Dampak Sosial dan Ekonomi Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

Selain dampak sosial dan ekonomi, adanya pemilahan sampah ini juga mengurangi jumlah sampah yang ditimbun di TPA Benowo. Berikut adalah model yang menampilkan pengurangan jumlah sampah yang ditimbun.

Gambar 5. 6 Dampak Skenario Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan Terhadap Pengurangan Jumlah Sampah yang Ditimbun di TPA Benowo

5.3.2.1 Dampak Lingkungan Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

Berikut adalah tahapan proses pengukuran dampak lingkungan dengan metode LCA.

5.3.2.1.1 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

Berikut adalah tujuan dan batasan dari pengukuran dampak lingkungan proses pemilahan sampah terpusat dan pengomposan di TPA Benowo.

Tabel 5. 11 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses

Tujuan	Batasan
Untuk mengukur dampak lingkungan dari proses pemilahan sampah terpusat di TPA Benowo	Unit fungsi yang digunakan adalah untuk memilah dan mengomposkan sampah dengan jumlah maksimal sesuai kapasitas selama tahun 2017 hingga 2032 (ton/tahun)

5.3.2.1.2 Identifikasi Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

Berikut adalah gambaran dari *input*, proses, dan *output* proses insenerasi.

Tabel 5. 12 Identifikasi Proses

Input	Proses	*Output*
Sampah organik (ton), Sampah anorganik (ton)	Komposting Pemilahan	Produk Kompos (ton), Emisi pengomposan (ton), Sampah siap Jual (ton), Sisa sampah (ton)

5.3.2.1.3 Life Cycle Inventory Analysis Proses Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

Berikut adalah data faktor emisi yang digunakan untuk memprediksi emisi proses pengomposan sampah.

Tabel 5. 13 Data Pendukung Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

5.3.2.1.4Life Cycle Impact Assesment Proses Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan di TPA Benowo

Berikut adalah data kategori dampak IPCC GWP yang digunakan.

Tabel 5. 14 Data LCIA

Proses perhitungan inventori dampak lingkungan dilakukan pada model simulasi seperti berikut. Dimana peningkatan emisi terjadi seiring dengan peningkatan jumlah sampah yang diolah.

Gambar 5. 7 Dampak Lingkungan Pemilahan Sampah Terpusat dan Pengomposan TPA Benowo

5.3.3 Skenario Pengembangan Bank Sampah (Proses Komposting dan Penjualan Sampah ke Pengepul)

Skenario ini mirip dengan pemilahan sampah di TPA Benowo. Skenario ini meningkatkan proses pengolahan sampah di bank sampah yang awalnya hanya menampung dan menjual sampah hasil pemilahan masyarakat, ditingkatkan dengan adanya penambahan fasilitas pengomposan. Pada model berikut dapat diketahui bahwa jumlah sampah yang ada di bank sampah akan dikomposting dan dijual ke pengepul. Jumlah sampah yang dikomposting dipengaruhi oleh jumlah sampah organik (sampah makanan, kebun, dan kayu) yang berasal dari masyarakat, kapasitas pengomposan, dan *recovery rate* sampah yang dikomposting. Sedangkan jumlah sampah yang dijual ke pengepul, dipengaruhi oleh jumlah sampah anorganik yang berasal dari masyarakat, kapasitas penampungan bank sampah, dan *recovery rate* sampah yang dijual. Produk kompos dan sampah yang dijual ke pengepul dengan data potensi harga per tonnya, akan menghasilkan potensi pendapatan yang bisa diterima oleh bank sampah. Sedangkan sisa sampah yang tidak terolah atau terjual, akan dikumpulkan dan diangkut ke TPA.

Gambar 5. 8 SFD Skenario Pengembangan Bank Sampah

Dalam pengoperasian bank sampah ini, juga dibutuhkan biaya berupa biaya operasional pekerja daur ulang dan pekerja pengomposan. Berikut adalah dampak ekonomi dan sosial dari skenario pengembangan bank sampah.

Gambar 5. 9 SFD Dampak Sosial dan Ekonomi Skenario Pengembangan Bank Sampah

5.3.3.1 Dampak Lingkungan Pengembangan Bank Sampah

Berikut adalah tahapan proses pengukuran dampak lingkungan dengan metode LCA.

5.3.3.1.1 Identifikasi Tujuan dan Batasan Skenario Pengembangan Bank Sampah

Berikut adalah tujuan dan batasan dari pengukuran dampak lingkungan skenario pengembangan bank sampah.

Tabel 5. 15 Identifikasi Tujuan dan Batasan Proses

Tujuan	Batasan
Untuk mengukur dampak lingkungan dari pengomposan di bank sampah	Unit fungsi yang digunakan adalah untuk menampung dan mengomposkan sampah dengan jumlah maksimal sesuai kapasitas selama tahun 2017 hingga 2032 (ton/tahun)

5.3.3.1.2 Identifikasi Proses Skenario Pengembangan Bank Sampah

Berikut adalah gambaran dari *input*, proses, dan *output* proses.

Tabel 5. 16 Identifikasi Proses

Input	Proses	*Output*
Sampah organik (ton)	Komposting	Produk Kompos (ton), Emisi pengomposan (ton)

5.3.3.1.3 Life Cycle Inventory Analysis Skenario Pengembangan Bank Sampah

Dalam proses perhitungan inventori dampak lingkungan skenario pengembangan bank sampah, akan digunakan data pendukung sebagai berikut.

Tabel 5. 17 Data Pendukung Proses Koperasi Primer Bank Sampah (Proses Komposting dan Penjualan Sampah ke Pengepul)

Berikut adalah model SFD perhitungan inventori dampak lingkungan skenario pengembangan bank sampah.

Gambar 5. 10 SFD Dampak Lingkungan Skenario Pengembangan Bank Sampah

5.3.3.1.4 Life Cycle Impact Assesment Skenario Pengembangan Sampah

Berikut adalah data kategori dampak yang digunakan untuk mengklasifikasikan dampak proses di bank sampah.

Tabel 5. 18 Data LCIA

Berikut adalah detail skenario perubahan struktur dan nilai parameter yang digunakan.

Tabel 5. 19 Skenario Perubahan Struktur

No	Skenario	Variabel Kontrol	Jenis Skenario
1	Pengoperasian PLTSa Gasifikasi pada tahun 2021	Kapasitas produksi= 1000 ton/hari	Skenario pengolahan sampah di TPA
2	Pengoperasian PLTSa Gasifikasi pada tahun 2022		
3	Pengoperasian PLTSa Gasifikasi pada tahun 2023		
4	Pengembangan fasilitas pemilahan sampah terpisat	Kapasitas produksi= 360 ton/ hari	
5	Peningkatan kapasitas dan teknologi bank sampah	Kapasitas produksi= 1,200 ton/ hari	Skenario bank sampah

Ketiga skenario tersebut (skenario PLTSa Gasifikasi, skenario pemilahan sampah terpusat, dan bank sampah), akan dikombinasikan menjadi delapan skenario. Skenario tersebut yaitu: kombinasi skenario pengoperasian PLTSa pada tahun 2021 dengan skenario pengembangan bank sampah pada tahun 2021, skenario pengoperasian PLTSa pada tahun 2022 dengan pengembangan bank sampah pada tahun 2021, skenario pengoperasian PLTSa pada tahun 2023 dengan bank sampah pada tahun 2021, skenario pengoperasian PLTSa pada tahun 2021

dengan skenario pengembangan bank sampah dan pemilahan sampah terpusat pada tahun 2021, skenario pengoperasian PLTSa pada tahun 2022 dengan skenari pengembangan bank sampah dan pemilahan sampah terpusat pada tahun 2021, serta skenario pengoperasian PLTSa pada tahun 2023 dengan skenario pengembangan bank sampah dan pemilahan sampah terpusat pada tahun 2021. Berikut adalah detail skenario dan hasil penerapan skenario terhadap variabel respon yang diamati.

5.3.4 Skenario 2: Kombinasi Skenario PLTSa Gasifikasi dan Pengembangan Bank Sampah

Skenario ini bertujuan untuk menggabungkan kelebihan implementasi skenario PLTSa, yaitu pengurangan jumlah timbunan sampah di TPA, dan kelebihan skenario bank sampah, yaitu pengurangan jumlah timbunan sampah di TPS. Kapasitas PLTSa sebesar 1,000 ton/ hari dan kapasitas bank sampah sebesar 1,200 ton/ hari dengan total 264 hari beroperasi dalam setahun akan diimplementasikan pada skenario ini. Berikut adalah gambaran keseluruhan variabel respon hasil simulasi skenario 2.

Gambar 5. 3 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 2

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-2.

Tabel 5. 20 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 2

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 2	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	256,343.34	-38.19%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	0.55	0.34	-38.20%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	2,400,200.00	895,048.37	-62.71%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	30.92083333	11.53	-62.71%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	337,165,070.55	134,857,847.02	-60.00%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	1,935,253.46	1,196,135.75	-38.19%

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 2	Persentase Perbedaan
Utilitas IPAL	0.79	0.30	-62.11%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,046,745,576.98	1,622,049,683.25	-20.75%
Parameter Dampak CO2eq	2,064,710,383.15	1,799,272,882.97	-12.86%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	117,503,885,068.62	104,734,091,563.15	-10.87%
Total Pendapatan (Rp)	16,655,401,260.00	393,692,020,102.02	2263.75%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	166	900	441.90%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3.5 Skenario 3: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah untuk Mendukung Pengoperasioan PLTSa pada Tahun 2021

Pada skenario ini akan ditampilkan penyesuaian jumlah kapasitas bank sampah pada skenario 2 yang dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan sampah di PLTSa gasifikasi. Proses iterasi dilakukan untuk menentukan jumlah yang sesuai apabila bank sampah dan PLTSa sama-sama beroperasi mulai tahun 2021. Hasil proses iterasi menunjukkan bahwa penambahan maksimum kapasitas bank sampah untuk mengolah sampah dengan tetap menjaga keberlanjutan PLTSa adalah sebesar 500 ton/ hari. Berikut adalah detail hasil variabel respon penerapan skenario ke 3.

Gambar 5. 4 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 3

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-3.

Tabel 5. 21 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 3

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 3	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	282,743.34	-31.83%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Jumlah Sampah TPS (ton)	0.55	0.38	-31.88%

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 3	Persentase Perbedaan
Akumulasi Sampah TPS (ton)	2,400,200.00	989,120.35	-58.79%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	30.92083333	12.7425	-58.79%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	337,165,070.55	147,502,048.49	-56.25%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	1,935,253.46	1,319,322.03	-31.83%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	0.79	0.33	-58.00%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	2,046,745,576.98	1,693,018,089.67	-17.28%
Utilitas IPAL	2,064,710,383.15	1,843,698,223.79	-10.70%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	117,503,885,068.62	111,415,606,451.84	-5.18%
Parameter Dampak CO2eq	16,655,401,260.00	345,993,857,501.08	1977.37%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	166	787	374.27%
Total Pendapatan (Rp)	414,743.34	282,743.34	-31.83%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	0.00	0.00	0.00%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3.6 Skenario 4: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah untuk Mendukung Pengoperasioan PLTSa pada Tahun 2022

Pada skenario ini akan ditampilkan penyesuaian jumlah kapasitas bank sampah yang dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan sampah di PLTSa gasifikasi. Proses iterasi dilakukan untuk menentukan jumlah bank sampah yang harus ditambah pada tahun 2021 apabila PLTSa baru beroperasi mulai tahun 2022. Hasil proses iterasi menunjukkan bahwa penambahan maksimum kapasitas bank sampah untuk mengolah sampah dengan tetap menjaga keberlanjutan PLTSa adalah sebesar 550 ton/ hari. Berikut adalah detail hasil variabel respon penerapan skenario ke 4.

Gambar 5. 5 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 4

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-4.

Tabel 5. 22 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 4

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 4	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	269,543.34	-35.01%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	0.55	0.36	-34.89%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	2,400,200.00	1,068,065.59	-55.50%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	30.92083333	13.76	-55.50%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	337,165,070.55	159,996,642.50	-52.55%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	1,935,253.46	1,257,728.89	-35.01%
Utilitas IPAL	0.79	0.36	-54.95%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,046,745,576.98	1,657,347,932.66	-19.03%
Parameter Dampak CO2eq	2,064,710,383.15	1,821,299,599.58	-11.79%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	117,503,885,068.62	105,774,095,537.67	-9.98%
Total Pendapatan (Rp)	16,655,401,260.00	362,272,301,865.19	2075.10%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	166	838	405.07%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3.7 Skenario 5: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah untuk Mendukung Pengoperasioan PLTSa pada Tahun 2023

Pada skenario ini akan ditampilkan penyesuaian jumlah kapasitas bank sampah yang dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan sampah di PLTSa gasifikasi. Proses iterasi dilakukan untuk menentukan jumlah bank sampah yang harus ditambah pada tahun 2021 apabila PLTSa baru beroperasi mulai tahun 2023. Hasil proses iterasi menunjukkan bahwa penambahan maksimum kapasitas bank sampah untuk mengolah sampah dengan tetap menjaga keberlanjutan PLTSa adalah

sebesar 1,200 ton/ hari. Berikut adalah detail hasil variabel respon penerapan skenario ke 5.

Gambar 5. 6 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 5

Keterangan : (1) Peningkatan Jumlah Sampah TPS (ton/ tahun), (2) Sisa Akumulasi Sampah TPS (ton/ tahun), (3) Peningkatan Utilitas Kendaraan, (4) Peningkatan Akumulasi Sampah TPA (ton/ tahun), (5) Peningkatan Tinggi Timbunan Sampah (m), (6) Peningkatan Produksi Air Lindi Timbunan Sampah (liter/ tahun), (7) Peningkatan Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter/ tahun), (8) Utilitas IPAL, (9) Peningkatan Akumulasi CO2 Lingkungan (ton/ tahun), (10) Peningkatan Total Kebutuhan Biaya (Rp/ tahun), (11) Peningkatan Total Pendapatan (Rp/ tahun), (12) Peningkatan Total Penyerapan Pekerja (orang), (13) Jumlah CO2eq (ton/ tahun).

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-5.

Tabel 5. 23 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 5

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 5	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	256,343.34	-38.19%
Jumlah Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.55	0.34	-38.20%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	2,400,200.00	1,142,276.38	-52.41%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	30.92083333	14.71583333	-52.41%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	337,165,070.55	171,634,477.31	-49.09%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	1,935,253.46	1,196,135.75	-38.19%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	0.79	0.38	-51.89%
Utilitas IPAL	2,046,745,576.98	1,621,694,701.32	-20.77%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,064,710,383.15	1,798,917,901.03	-12.87%
Parameter Dampak CO2eq	117,503,885,068.62	100,132,219,577.43	-14.78%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	16,655,401,260.00	378,550,746,229.29	2172.84%

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 5	Persentase Perbedaan
Total Pendapatan (Rp)	166	890	435.87%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	414,743.34	256,343.34	-38.19%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3.8 Skenario 6: Pemilahan Sampah Terpusat, Pengembangan Bank Sampah, dan PLTSa Gasifikasi

Skenario ini merupakan kombinasi skenario penerapan pemilahan sampah terpusat, pengembangan bank sampah, dan pengoperasian PLTSa gasifikasi. Adapun kapasitas PLTSa gasifikasi yaitu sebesar 1,000 ton/ hari, kapasitas bank sampah sebesar 1,200 ton/ hari, dan kapasitas pemilahan sampah sebesar 360 ton/ hari. Berikut adalah grafik nilai variabel respon hasil simulasi skenario ke-6.

Gambar 5. 7 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 6

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-6.

Tabel 5. 24 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 6

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 6	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	256,343.34	-38.19%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	0.55	0.34	-38.20%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	2,400,200.00	747,181.85	-68.87%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	30.92083333	9.626666667	-68.87%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	337,165,070.55	115,020,840.60	-65.89%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	1,935,253.46	1,196,135.75	-38.19%
Utilitas IPAL	0.79	0.25	-68.11%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,046,745,576.98	1,622,049,667.76	-20.75%

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 6	Persentase Perbedaan
Parameter Dampak CO2eq	2,064,710,383.15	1,831,900,995.93	-11.28%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	117,503,885,068.62	105,318,353,468.71	-10.37%
Total Pendapatan (Rp)	16,655,401,260.00	443,144,941,014.29	2560.67%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	166	1102	563.62%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3.9 Skenario 7: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah dan Pemilahan Sampah Terpusat pada Skenario 6

Pada skenario ini akan ditampilkan penyesuaian jumlah kapasitas bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah terpusat pada skenario 10 yang dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan sampah di PLTSa gasifikasi. Proses iterasi dilakukan untuk menentukan jumlah yang sesuai apabila bank sampah, pemilahan sampah terpusat, dan PLTSa sama-sama beroperasi mulai tahun 2021. Hasil proses iterasi menunjukkan bahwa penurunan kapasitas bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah menjadi 260 ton/ hari dan 800 ton/ hari pada skenario 6 dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan PLTSa hingga akhir tahun 2032. Berikut adalah detail hasil variabel respon penerapan skenario ke 7.

Gambar 5. 8 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 7

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-7.

Tabel 5. 25 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 7

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 7	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	309,143.34	-25.46%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	0.55	0.41	-25.56%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	2,400,200.00	931,695.59	-61.18%

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 7	Persentase Perbedaan
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	30.92083333	12.0025	-61.18%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	337,165,070.55	139,783,595.42	-58.54%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	1,935,253.46	1,442,508.32	-25.46%
Utilitas IPAL	0.79	0.31	-60.53%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,046,745,576.98	1,763,986,480.11	-13.82%
Parameter Dampak CO2eq	2,064,710,383.15	1,911,687,384.15	-7.41%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	117,503,885,068.62	118,391,904,843.07	0.76%
Total Pendapatan (Rp)	16,655,401,260.00	339,178,623,003.91	1936.45%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	166	821	394.56%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3.10 Skenario 8: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah dan Pemilahan Sampah Terpusat untuk Operasional PLTSa Mulai Tahun 2022

Pada skenario ini akan ditampilkan penyesuaian jumlah kapasitas bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah terpusat yang dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan sampah di PLTSa gasifikasi. Proses iterasi dilakukan untuk menentukan jumlah yang sesuai apabila terdapat penambahan bank sampah, dan pemilahan sampah terpusat mulai tahun 2021 serta PLTSa beroperasi mulai tahun 2022. Hasil proses iterasi menunjukkan bahwa penambahan maksimum kapasitas bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah menjadi 260 ton/ hari dan 900 ton/ hari dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan PLTSa hingga akhir tahun 2032. Berikut adalah detail hasil variabel respon penerapan skenario ke 8.

Gambar 5. 9 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 8

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-8.

Tabel 5. 26 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 8

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 8	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	295,943.34	-28.64%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	0.55	0.40	-28.72%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	2,400,200.00	1,010,640.84	-57.89%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	30.92083333	13.02083333	-57.89%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	337,165,070.55	152,278,189.43	-54.84%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	1,935,253.46	1,380,915.18	-28.64%
Utilitas IPAL	0.79	0.34	-57.26%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,046,745,576.98	1,728,316,323.10	-15.56%
CO2eq	2,064,710,383.15	1,889,288,759.95	-8.50%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	117,503,885,068.62	112,750,393,928.90	-4.05%
Total Pendapatan (Rp)	16,655,401,260.00	355,457,067,368.02	2034.18%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	166	872	425.36%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3.11 Skenario 9: Penyesuaian Kapasitas Bank Sampah dan Pemilahan Sampah Terpusat untuk Operasional PLTSa Mulai Tahun 2023

Pada skenario ini akan ditampilkan penyesuaian jumlah kapasitas bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah terpusat yang dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan sampah di PLTSa gasifikasi. Proses iterasi dilakukan untuk menentukan jumlah yang sesuai apabila terdapat penambahan bank sampah, dan pemilahan sampah terpusat mulai tahun 2021 serta PLTSa beroperasi mulai tahun 2023. Hasil proses iterasi menunjukkan bahwa kapasitas bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah menjadi 280 ton/ hari dan 1,000 ton/ hari dapat menjaga keberlanjutan pengelolaan PLTSa hingga akhir tahun 2032. Berikut adalah detail hasil variabel respon penerapan skenario ke-9.

Gambar 5. 10 Hasil Simulasi Kondisi Skenario 9

Berikut adalah detail nilai variabel respon hasil simulasi pada skenario ke-9.

Tabel 5. 27 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Skenario 9

Variabel Respon	Kondisi Eksisting	Kondisi Skenario 9	Persentase Perbedaan
Jumlah Sampah TPS (ton)	414,743.34	282,743.34	-31.83%
Akumulasi Sampah TPS (ton)	0.00	0.00	0.00%
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	0.55	0.38	-31.88%
Akumulasi Sampah TPA (ton)	2,400,200.00	1,086,939.26	-54.71%
Ketinggian Timbunan Sampah (m)	30.92083333	14.00333333	-54.71%
Produksi Air Lindi TPA (liter)	337,165,070.55	164,234,335.64	-51.29%
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah (liter)	1,935,253.46	1,319,322.03	-31.83%
Utilitas IPAL	0.79	0.36	-54.32%
Akumulasi CO2 Lingkungan (ton)	2,046,745,576.98	1,692,663,092.07	-17.30%
Parameter Dampak CO2eq	2,064,710,383.15	1,868,719,964.45	-9.49%
Total Kebutuhan Biaya (Rp)	117,503,885,068.62	107,132,253,127.75	-8.83%
Total Pendapatan (Rp)	16,655,401,260.00	373,397,938,189.46	2141.90%
Total Penyerapan Pekerja (Orang)	166	934	462.92%

Dampak positif/ pendapatan Dampak negatif/ pengeluaran

5.3 Pemilihan Skenario Perubahan Parameter, Struktur, dan Kombinasi

Berikut adalah tabel rekap keseluruhan skenario perubahan parameter, struktur, dan kombinasi.

Tabel 5. 28 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dengan Seluruh Skenario Perubahan Parameter dan Struktur

Variabel Respon	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	Kondisi Eksisting
Jumlah Sampah TPS	0.00%	-38.19%	-31.83%	-35.01%	-38.19%	-38.19%	-25.46%	-28.64%	-31.83%	413,973.20
Akumulasi Sampah TPS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	19.10%	-38.20%	-31.88%	-34.89%	-38.20%	-38.20%	-25.56%	-28.72%	-31.88%	0.55
Akumulasi Sampah TPA	0.00%	-62.71%	-58.79%	-55.50%	-52.41%	-68.87%	-61.18%	-57.89%	-54.71%	2,399,978.37
Ketinggian Timbunan Sampah	-29.40%	-62.71%	-58.79%	-55.50%	-52.41%	-68.87%	-61.18%	-57.89%	-54.71%	30.90
Produksi Air Lindi TPA	0.00%	-60.00%	-56.25%	-52.55%	-49.09%	-65.89%	-58.54%	-54.84%	-51.29%	337,134,118.60
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah	0.00%	-38.19%	-31.83%	-35.01%	-38.19%	-38.19%	-25.46%	-28.64%	-31.83%	1,489,996.17
Utilitas IPAL	0.00%	-62.11%	-58.00%	-54.95%	-51.89%	-68.11%	-60.53%	-57.26%	-54.32%	0.79
Akumulasi CO2 Lingkungan	-0.41%	-20.75%	-17.28%	-19.03%	-20.77%	-20.75%	-13.82%	-15.56%	-17.30%	2,064,491,423.32
CO2eq	-0.41%	-12.86%	-10.70%	-11.79%	-12.87%	-11.28%	-7.41%	-8.50%	-9.49%	2,064,491,423.32
Total Kebutuhan Biaya	8.16%	-10.87%	-5.18%	-9.98%	-14.78%	-10.37%	0.76%	-4.05%	-8.83%	117,503,880,718.39
Total Pendapatan	98.20%	2263.75%	1977.37%	2075.10%	2172.84%	2560.67%	1936.45%	2034.18%	2141.90%	16,655,401,260.00
Total Penyerapan Pekerja	21.08%	441.90%	374.27%	405.07%	435.87%	563.62%	394.56%	425.36%	462.92%	166.00

Halaman ini sengaja dikosongkan

Gambar 5. 11 Grafik Perbandingan Nilai Variabel Respon Seluruh Skenario

Berdasarkan tabel hasil simulasi semua skenario, penurunan jumlah sampah TPS terjadi pada seluruh skenario pengembangan bank sampah (Skenario 2, 5, dan 6), dimana terdapat penambahan kapasitas bank sampah untuk mengurangi jumlah sampah anorganik di TPS sebesar 600 ton/ hari dan jumlah sampah organik sebesar 600 ton/ hari serta seluruh sampah di TPS berhasil diangkut ke TPA. Sedangkan dampak skenario pada utilitas kendaraan, dapat diketahui bahwa peningkatan utilitas terjadi pada skenario 1 oleh karena skenario *layoff* kendaraan hingga batas maksimum kebutuhan kapasitas pengangkutan sampah. Sedangkan pada skenario yang lain terjadi penurunan utilitas oleh karena adanya upaya penurunan jumlah sampah TPS (dengan skenario pengembangan bank sampah) tanpa diimbangi dengan upaya pengurangan jumlah armada pengangkutan sampah. Sehingga, untuk mengoptimalkan performansi skenario pengurangan jumlah sampah, pengurangan jumlah armada pengangkutan dapat dilakukan untuk meningkatkan utilitas kendaraan. Namun disisi lain, upaya ini juga berdampak pada potensi pemutusan kerja sopir pengangkutan.

Sedangkan untuk akumulasi sampah di TPA, skenario dengan penurunan jumlah sampah terbesar adalah skenario ke-6 dimana terdapat upaya pengurangan jumlah sampah yang masuk ke TPA (skenario pengembangan bank sampah) dan upaya pengurangan sampah yang ada di TPA (skenario PLTSa dan fasilitas pemilahan sampah). Penurunan jumlah akumulasi timbunan sampah ini juga berdampak pada penurunan ketinggian timbunan sampah. Skenario 6 dengan rata-rata penurunan timbunan sampah terbesar juga menghasilkan rata-rata penurunan ketinggian sampah terbesar dibandingkan dengan skenario lainnya. Penurunan jumlah akumulasi timbunan sampah ini juga berdampak pada penurunan produksi air lindi sampah. Skenario 6 dengan rata-rata penurunan timbunan sampah terbesar juga menghasilkan rata-rata penurunan produksi air lindi sampah terbesar dibandingkan dengan skenario lainnya. Terkait dengan produksi air lindi hasil proses pengangkutan sampah, penurunan jumlah sampah TPS yang dapat menurunkan intensitas pengangkutan pastinya berdampak pada penurunan jumlah produksi air lindi. Hal ini dibuktikan pada skenario 2,5,dan 6 dimana terdapat upaya

pengurangan jumlah sampah TPS juga berdampak pada penurunan jumlah produksi air lindi pengangkutan sampah. Penurunan total produksi air lindi sampah, baik air lindi hasil produksi sampah ataupun pengangkutan, berdampak pada penurunan utilitas fasilitas IPAL. Dimana penurunan produksi air lindi terbesar terjadi pada skenario 6 oleh karena penurunan jumlah sampah TPS dan timbunan sampah TPA pada skenario ini terbesar dari pada skenario yang lainnya.

Sedangkan untuk variabel respon akumulasi CO_2 di lingkungan, penurunan terbesar terjadi pada skenario 5. Akumulasi CO_2 sendiri bersumber dari emisi gas karbon dioksida bahan bakar kendaraan, emisi proses gasifikasi, dan emisi penggunaan listrik yang bersumber dari pihak eksternal. Dimana faktor emisi gas karbon dioksida per ton pengolahan sampah terbesar ada pada penggunaan bahan bakar kendaraan. Sehingga penurunan konsumsi bahan bakar memiliki dampak penurunan akumulasi CO_2 yang lebih besar jika dibandingkan dengan penurunan penggunaan listrik atau proses gasifikasi untuk memproses 1 ton sampah. Skenario 5 merupakan skenario dengan upaya penurunan jumlah sampah TPS terbesar. Upaya ini berdampak pada penurunan intensitas pengangkutan sampah dan konsumsi bahan bakar kendaraan. Selain itu, pemunduran operasional gasifikasi juga mencegah produksi emisi karbon dioksida pada awal periode pengelolaan sampah, yang berdampak pada total produksi CO_2.

Selanjutnya adalah nilai emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses pengelolaan sampah. Berdasarkan IPCC GL 2006, terdapat beberapa emisi yang berdampak pada penambahan emisi GRK yang dapat menyebabkan pemanasan global. Hasil pendataan inventori emisi penelitian ini dapat diketahui bahwa terdapat 3 emisi, yaitu: emisi gas metan, gas karbon dioksida, dan gas nitrogen dioksida yang dihasilkan oleh proses pengolahan sampah, yang dapat berdampak pada total emisi GRK (kg CO2eq). Emisi gas metan dihasilkan dari aktivitas pengangkutan sampah, pengolahan air lindi, pengomposan, dan penimbunan sampah. Sedangkan emisi gas karbon dioksida dihasilkan dari aktivitas pengangkutan sampah, proses gasifikasi, dan proses penggunaan listrik eksternal. Kemudian, emisi gas nitrogen dioksida dihasilkan dari aktivitas pengangkutan sampah dan pengomposan. Dari sembilan skenario, penurunan emisi GRK terbesar terjadi pada skenario ke-5, dimana terdapat penurunan emisi pengangkutan sampah

karena upaya pengembangan bank sampah, dan penurunan emisi proses IPAL karena penurunan jumlah produksi air lindi, serta pencegahan emisi proses gasifikasi pada awal periode akibat pemunduruan operasional PLTSa.

Selanjutnya yaitu dampak ekonomi, total kebutuhan biaya, untuk perealisasian skenario pengelolaan sampah. Komponen biaya yang diperhitungkan adalah biaya operasional pengangkutan sampah (biaya sopir dan BBM), biaya sampah (biaya yang harus dibayarkan pemerintah kepada pengelola TPA), biaya operasional proses IPAL (biaya H_2O_2, dan biaya listrik), biaya operasional LFG (biaya listrik dan gaji pegawai), biaya operasional PLTSa (biaya listrik dan gaji pegawai), biaya operasional bank sampah (biaya pegawai), dan biaya operasional fasilitas pemilahan (biaya pegawai). Skenario dengan penurunan total biaya terbesar terjadi pada skenario ke-5, dimana terjadi penurunan biaya operasional pengangkutan sampah karena upaya pengembangan bank sampah lebih besar dari pada penambahan biaya operasional bank sampah. Selain itu, pada biaya pengelolaan sampah di TPA juga terjadi penurunan biaya oleh karena penurunan jumlah sampah yang masuk ke TPA dan pemunduruan pengeluaran biaya operasional PLTSa hingga tahun 2032. Sedangkan pada skenario 1, dan 7 terjadi peningkatan kebutuhan biaya. Peningkatan kebutuhan biaya 1 dipengaruhi oleh penambahan biaya operasional LFG karena peningkatan kapasitas LFG dan penambahan biaya ruang terbuka hijau. Sehingga peningkatan biaya terjadi baik pada pembiayaan dari pemerintah atau dari PT. Sumber Organik. Sedangkan pada skenario 9, terjadi peningkatan biaya oleh karena peningkatan biaya operasional fasilitas pemilahan dan gasifikasi. Peningkatan biaya ini lebih besar dari pada nilai penurunan biaya operasional proses IPAL.

Secara keseluruhan, hanya skenario 1 yang mendatangkan peningkatan total pembiayaan oleh pemerintah, sedangkan sisa kedelapan skenario lainnya mendatangkan penurunan atau minimal sama dengan nilai kondisi eksisting total pembiayaan oleh pemerintah. Hal ini disebabkan oleh upaya pengurangan jumlah sampah yang diangkut ke TPA, yang menurunkan biaya operasional pengangkutan dan biaya sewa pengelolaan sampah yang harus dibayar oleh pemerintah kepada pengelola TPA Benowo. Sedangkan pada total pembiayaan oleh PT. Sumber Organik, pada semua skenario terjadi peningkatan total kebutuhan biaya. Hal ini

disebabkan oleh adanya upaya penambahan kapasitas atau fasilitas pengolahan sampah yang baru, yang berdampak pada peningkatan biaya operasional TPA.

Dampak ekonomi pengelolaan sampah lainnya yaitu potensi pendapatan pengolahan sampah yang bisa diterima, baik pendapatan dari pengolahan sampah menjadi sumber listrik atau bahan baku. Semua skenario yang diterapkan berupaya untuk meningkatkan pendapatan pengolahan sampah, baik melalui upaya peningkatan kapasitas LFG, atau penambahan fasilitas baru seperti PLTSa, pengembangan bank sampah, dan fasilitas pemilahan sampah. Peningkatan pendapatan terbesar terjadi pada skenario ke-7. Skenario ini mendatang pendapatan pengolahan sampah dari fasilitas bank sampah, PLTSa, dan fasilitas pemilahan sampah terpusat. Selanjutnya yaitu dampak sosial pengelolaan sampah, berupa potensi penyerapan pekerja atau pemutusan kerja dari pengelolaan sampah. Secara keseluruhan, seluruh skenario mendatangkan potensi penyerapan pekerja. Hal ini disebabkan oleh adanya penambahan kapasitas atau fasilitas pengolahan sampah baru. Meskipun pada skenario 1 terdapat potensi pemutusan pekerja sopir, namun juga terdapat potensi penyerapan pekerja pada fasilitas LFG.

Kemudian adalah pemilihan skenario terbaik pengelolaan sampah. Penilaian ini didasarkan pada peraturan Jakstrada Pemerintah Kota Surabaya, dimana terdapat target pengurangan sampah, yang salah satu indikatornya adalah peningkatan jumlah sampah terdaur ulang di sumber sampah, dan peningkatan jumlah sampah termanfaatkan kembali di sumber sampah. Target ini akan dilihat dari besar nilai variabel respon pengurangan jumlah akumulasi sampah TPS, yang disebabkan oleh pengurangan jumlah sampah untuk diolah pada bank sampah (dipilah untuk dijual dan dikomposting). Selanjutnya yaitu target penanganan sampah. Indikator pencapaian target ini yaitu penurunan jumlah sampah yang diangkut ke TPA yang diukur melalui variabel respon jumlah penurunan sampah yang diangkut. Selain itu, terdapat indikator lain yaitu penurunan jumlah sampah yang terproses di TPA yang diukur melalui variabel respon jumlah akumulasi sampah TPA. Kemudian, variabel respon total pendapatan juga akan diukur sebagai indikator peningkatan jumlah sampah yang terolah baik menjadi sumber energi atau bahan baku.

Dari tabel 5.28 menunjukkan bahwa terdapat penentuan kapasitas bank sampah dan pemilahan sampah mempengaruhi keberlanjutan produksi listrik PLTSa. Skenario 6 adalah skenario yang unggul dalam mengurangi jumlah timbunan sampah TPS dan TPA. Namun, penerapan skenario ini berdampak pada penurunan produksi listrik PLTSa pada akhir tahun 2031. Sehingga apabila pemerintah Kota Surabaya lebih mengutamakan pencapaian penurunan jumlah sampah TPS dan TPA yang maksimal daripada penjagaan utilitas PLTSa, maka skenario 6 adalah skenario yang bisa diterapkan.

Selanjutnya, apabila pemerintah lebih mengutamakan penjagaan utilitas PLTSa yang optimal, dari enam skenario penyesuaian kapasitas (skenario 3,4,5,7,8, dan 9) skenario 5 adalah skenario yang lebih unggul (menghasilkan penurunan jumlah sampah TPS dan emisi GRK paling besar) dan tetap menjaga keberlanjutan proses PLTSa. Namun skenario 5 merupakan skenario penundaan proses operasional PLTSa hingga tahun 2023. Dari segi dampak lingkungan, penundaan pengoperasian PLTSa memang berdampak pada penurunan dampak lingkungan yang lebih besar oleh karena penundaan proses yang menghasilkan emisi (proses gasifikasi) dan pengurangan proses yang menghasilkan emisi ke udara paling banyak (proses penggunaan emisi BBM, emisi air lindi pengangkutan, dan proses IPAL). Namun dari segi dampak ekonomi, skenario ini mengakibatkan penurunan potensi pendapatan dan berpotensi menimbulkan biaya tambahan seperti biaya pemeliharaan fasilitas yang tidak digunakan, biaya depresiasi bangunan, dst. Serta dari segi dampak sosial, penundaan operasional PLTSa juga akan menunda proses penyerapan pekerja yang seharusnya bisa dilakukan.

Selanjutnya, apabila pemerintah lebih mengutamakan pengoptimalan utilitas PLTSa dan pencegahan pemunduran dimulainya operasional PLTSa, maka dari dua skenario (skenario 3 dan 7), maka skenario yang lebih unggul adalah skenario ke-3. Hal ini karena skenario 3 memberikan penurunan jumlah sampah TPS, produksi air lindi pengangkutan sampah, peningkatan utilitas, penurunan akumulasi CO2, dan emisi GRK, penurunan total kebutuhan biaya, serta peningkatan pendapatan yang lebih tinggi dari pada skenario 7.

5.4 Analisis Sensitivitas pada Kondisi Tidak Pasti

Dalam penerapan skenario kebijakan sebelumnya tersebut terdapat beberapa data tetap yang sama seperti pada tahun 2017, yang digunakan sepanjang tahunnya hingga tahun 2032. Padahal, terdapat kemungkinan penurunan atau peningkatan nilai, seperti misalnya nilai produksi sampah per penduduk, produksi air lindi per ton sampah, faktor kompresi kendaraan, efisiensi proses pengolahan sampah, komposisi sampah, *recovery rate* sampah, konsumsi BBM per ton sampah, dan kapasitas pengangkutan.

Pada penelitian ini, nilai variabel jumlah produksi sampah per penduduk setiap tahunnya dan produksi air lindi per ton sampah akan dirubah dengan dua kondisi ekstrim yaitu penurunan 50% dan peningkatan 100% dari nilai eksisting. Penurunan jumlah sampah dianggap proporsional terhadap komposisi sampah, sehingga penurunan 50% jumlah sampah juga akan berdampak pada penurunan 50% komposisi sampah plastik, sampah makanan, dan lain sebagainya. Selanjutnya yaitu faktor kompresi, faktor kompresi akan ditingkatkan hingga 69.62%, yang berdampak pada peningkatan produksi air lindi. Sedangkan untuk komposisi sampah diasumsikan tetap, karena upaya pengurangan jenis kategori sampah tertentu tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini. Selanjutnya adalah *recovery rate* sampah, nilai variabel ini akan dirubah pada kondisi ekstrim bawah yaitu adanya penurunan *recovery rate* sampah pada bank sampah dan fasilitas pemilahan sebesar 50% dari kondisi eksisting. Sehingga akan terjadi penurunan jumlah sampah yang bisa dijual dan dikomposting. Kemudian, untuk konsumsi BBM per ton sampah, berdasarkan data historis konsumsi BBM tahun 2019, konsumsi bahan bakar per ton sampah terendah sebesar 0.173 liter/ ton dan tertinggi 0.192 liter/ ton. Sedangkan untuk kapasitas pengangkutan, oleh karena kondisi saat ini telah menggunakan kapasitas maksimum, maka pada analisis ini akan menggunakan batas minimum kapasitas. Kemudian untuk efisiensi proses, tidak terjadi perubahan efisiensi selama proses evaluasi. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya pergantian teknologi yang digunakan dan pengaruh umur mesin terhadap efisiensi proses diabaikan. Berikut adalah rekap keseluruhan perubahan nilai variabel.

Tabel 5. 29 Perubahan Nilai Variabel Tidak Pasti

5.4.1. Perubahan Nilai Parameter pada Kondisi 1

Berikut adalah tabel perbandingan nilai variabel respon dengan adanya perubahan nilai paramater (kondisi 1).

Tabel 5. 30 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dan Skenario pada Perubahan Nilai Parameter Kondisi 1

Kondisi Ekstrim 1										
Variabel Respon	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S6**	**S7**	**S8**	**S9**	**Eksisting**
Jumlah Sampah TPS	-50.00%	-74.93%	-71.75%	-73.34%	-74.93%	-74.93%	-68.56%	-70.15%	-71.75%	414,743.34
Akumulasi Sampah TPS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	-10.38%	-60.45%	-55.64%	-57.74%	-60.45%	-60.45%	-50.38%	-52.93%	-55.64%	0.55
Akumulasi Sampah TPA	-8.22%	-71.94%	-70.56%	-65.45%	-60.56%	-75.05%	-72.25%	-67.31%	-68.20%	2,400,200.00
Ketinggian Timbunan Sampah	-35.20%	-71.94%	-70.56%	-65.45%	-60.56%	-75.05%	-72.25%	-67.31%	-68.19%	30.91
Produksi Air Lindi TPA	-54.02%	-84.59%	-83.83%	-81.00%	-78.31%	-86.31%	-84.76%	-82.03%	-82.52%	337,165,070.55
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah	430.64%	166.08%	199.86%	182.97%	166.08%	166.08%	233.64%	216.75%	199.86%	1,935,253.46
Utilitas IPAL	-51.68%	-84.21%	-83.05%	-80.63%	-78.42%	-85.79%	-83.79%	-81.37%	-81.79%	0.79
Akumulasi CO2 Lingkungan	-29.06%	-41.34%	-39.71%	-40.53%	-41.35%	-41.34%	-38.08%	-38.90%	-39.72%	2,046,745,456.20
CO2eq	-29.03%	-33.43%	-33.11%	-33.28%	-33.44%	-31.85%	-31.65%	-31.82%	-31.89%	2,064,709,436.93
Total Kebutuhan Biaya	-38.17%	-48.42%	-44.70%	-47.82%	-50.44%	-50.64%	-42.67%	-45.71%	-47.75%	117,532,447,125.60
Total Pendapatan	102.25%	1907.68%	1706.08%	1782.83%	1866.56%	2129.51%	1668.04%	1746.02%	1857.76%	16,692,913,425.00
Total Penyerapan Pekerja	20.18%	441.90%	374.27%	405.07%	435.87%	563.62%	394.56%	425.36%	465.93%	166.61

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

Gambar 5. 12 Grafik Perbandingan Nilai Variabel Respon Seluruh Skenario Kondisi Ekstrim 1

Berdasarkan kondisi ekstrim 1, terjadi penurunan jumlah produksi sampah per penduduk, penurunan jumlah produksi air lindi per ton sampah, penurunan kapasitas pengangkutan, penurunan *recovery rate* sampah, penurunan jumlah konsumsi BBM per ton sampah, dan peningkatan faktor kompresi kendaraan. Meskipun terjadi penurunan sampah untuk semua kondisi skenario, penurunan sampah TPS terbesar tetap terjadi pada skenario 2,5, dan 6. Dimana pada skenario ini terdapat upaya pengurangan jumlah sampah TPS dengan skenario bank sampah berkapasitas 1,200 ton/ hari. Penurunan ini juga berdampak pada penurunan akumulasi sampah TPS. Selanjutnya yaitu utilitas kendaraan pengangkutan. Skenario 2,5, dan 6 dengan penurunan jumlah sampah terbesar, memberikan dampak penurunan utilitas kendaraan yang paling besar pula.

Pada variabel respon penurunan jumlah akumulasi TPA, skenario 6 juga merupakan skenario dengan penurunan akumulasi sampah terbesar. Hal ini disebabkan oleh adanya penerapan skenario pengembangan bank sampah, fasilitas pemilahan sampah terpusat, dan PLTSa dengan kapasitas maksimum. Selanjutnya yaitu ketinggian sampah. Skenario 6 dengan hasil penurunan jumlah akumulasi sampah TPA terbesar juga berdampak pada penurunan ketinggian sampah yang paling besar dibandingkan dengan skenario yang lainnya. Kemudian yaitu variabel respon produksi air lindi sampah. Penurunan produksi air lindi terbesar juga terjadi pada skenario 6, yang mana pada skenario ini terjadi penurunan jumlah timbunan sampah paling besar dari pada skenario yang lain yang berdampak pada total produksi air lindi sampah di TPA. Berikut adalah detail perbandingan produksi air lindi antar skenario.

Selanjutnya adalah variabel respon produksi air lindi pengangkutan sampah. Peningkatan jumlah produksi air lindi ini disebabkan oleh adanya peningkatan faktor kompresi kendaraan pengangkutan. Peningkatan produksi air lindi terkecil terjadi pada skenario 2,5, dan 6. Hal ini disebabkan oleh skenario ini menghasilkan penurunan jumlah sampah TPS terbesar jika dibandingkan dengan skenario lainnya oleh karena adanya upaya penambahan kapasitas bank sampah. Kemudian yaitu utilitas fasilitas IPAL. Secara keseluruhan, utilitas IPAL mengalami penurunan.

Meskipun terjadi peningkatan produksi air lindi pengangkutan, namun juga terjadi penurunan produksi air lindi timbunan sampah. Dimana porsi air lindi timbunan sampah jauh lebih besar dari pada porsi air lindi pengangkutan sampah. Sehingga kondisi ini berdampak pada penurunan total air lindi yang harus diproses, yang memberikan dampak pada penurunan utilitas IPAL.

Selanjutnya adalah akumulasi CO_2 di lingkungan. Penurunan tertinggi juga terjadi pada skenario 5 yang disebabkan oleh penurunan emisi pengangkutan sampah. Penurunan emisi ini karena adanya skenario bank sampah yang menurunkan jumlah sampah di TPS. Meskipun pada skenario 2 dan 6 juga terjadi penurunan jumlah sampah TPS yang sama besarnya dengan skenario 5, namun pengoperasian PLTSa pada skenario 5 mengalami pengunduran lebih lama sehinga tidak menghasilkan emisi. Kemudian yaitu dampak total emisi GRK pengelolaan sampah yang bersumber dari gas karbon dioksida, gas metan, dan gas nitrogen dioksida. Penggunaan konsumsi BBM kendaraan, yang menghasilkan ketiga emisi GRK, menjadi faktor utama terjadinya penurunan emisi GRK pada skenario ini. Skenario 5 adalah skenario dengan penurunan emisi GRK tertinggi, yang disebabkan oleh pengurangan jumlah konsumsi BBM karena penurunan intensitas pengangkutan. Skenario dengan penambahan fasilitas pemilahan sampah cenderung memiliki nilai emisi GRK yang lebih besar dari pada penambahan fasilitas bank sampah. Hal ini disebabkan pada fasilitas pemilahan terjadi penambahan emisi GRK dari proses pengangkutan dan pengomposan sampah di TPA. Sedangkan pada fasilitas bank sampah, meskipun terjadi penambahan emisi GRK dari proses pengomposan, namun juga terjadi penurunan emisi GRK dari proses pengangkutan.

Selanjutnya yaitu total kebutuhan biaya. Secara keseluruhan total kebutuhan biaya mengalami penurunan yang disebabkan oleh adanya penurunan jumlah produksi sampah penduduk. Penurunan total biaya terbesar terjadi pada skenario ke-6. Kemudian yaitu variabel respon total pendapatan. Total pendapatan paling besar berada pada skenario 6 yaitu pengoperasian fasilitas PLTSa, bank sampah, dan fasilitas pemilahan sampah terpusat. Variabel respon terakhir yaitu total penyerapan pekerja. Penyerapan terbesar terjadi pada skenario 6 dimana pada skenario ini terdapat penambahan kapasitas bank sampah, pemilahan sampah.

5.4.2. Perubahan Nilai Parameter pada Kondisi 2

Berikut adalah tabel perbandingan nilai variabel respon dengan adanya perubahan nilai paramater (kondisi 2).

Tabel 5. 31 Perbandingan Nilai Variabel Respon Kondisi Eksisting dan Skenario pada Perubahan Nilai Parameter Kondisi 2

Variabel Respon	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	Eksisting
Jumlah Sampah TPS	100.00%	71.36%	76.13%	73.74%	71.36%	71.36%	80.90%	78.52%	76.13%	414,743.34
Akumulasi Sampah TPS	223121379.92%	126466531.67%	137356531.67%	131911531.67%	126466531.67%	126466531.67%	148246531.67%	142801531.67%	137356531.67%	0.00
Utilitas Kendaraan Pengangkutan	80.45%	80.45%	80.45%	80.45%	80.45%	80.45%	80.45%	80.45%	80.45%	0.55
Akumulasi Sampah TPA	-33.84%	-55.43%	-55.43%	-52.29%	-49.19%	-60.16%	-58.84%	-55.71%	-55.97%	2,400,200.00
Ketinggian Timbunan Sampah	-53.29%	-55.42%	-55.42%	-52.29%	-49.18%	-60.16%	-58.84%	-55.70%	-55.97%	30.91
Produksi Air Lindi TPA	34.85%	-7.41%	-7.41%	-0.55%	6.22%	-16.66%	-14.09%	-7.23%	-7.74%	337,165,070.55
Produksi Air Lindi Pengangkutan Sampah	4173.67%	4756.44%	4756.44%	4756.44%	4756.44%	4756.44%	4756.44%	4756.44%	4756.44%	1,935,253.46
Utilitas IPAL	26.32%	9.58%	9.58%	15.89%	22.00%	0.32%	2.95%	9.16%	8.74%	0.79
Akumulasi CO2 Lingkungan	2.92%	11.21%	11.21%	11.20%	11.19%	11.21%	11.21%	11.20%	11.20%	2,046,745,456.20
CO2eq	2.91%	19.07%	17.76%	18.41%	19.06%	20.65%	17.59%	18.24%	18.98%	2,064,709,436.93
Total Kebutuhan Biaya	8.80%	37.87%	37.67%	35.81%	33.95%	38.21%	37.72%	35.86%	35.98%	117,532,447,125.60
Total Pendapatan	102.25%	2080.63%	1824.77%	1907.25%	1989.73%	2386.45%	1789.78%	1872.25%	2017.18%	16,692,913,425.00
Total Penyerapan Pekerja	20.18%	441.90%	374.27%	405.07%	435.87%	563.62%	394.56%	425.36%	465.93%	166.61

Halaman ini sengaja dikosongkan

Gambar 5. 13 Grafik Perbandingan Nilai Variabel Respon Seluruh Skenario Kondisi Ekstrim 2

Analisis sensitivitas pada kondisi ekstrim 2 (titik estrim atas) bertujuan untuk menguji ketahanan usulan skenario terhadap potensi peningkatan produksi sampah per penduduk sebesar 100% dari kondisi eksisting, peningkatan produksi air lindi per ton sampah, penurunan kapasitas pengangkutan, peningkatan konsumsi BBM per ton pengangkutan sampah, penurunan *recovery rate* sampah, dan peningkatan kompresi kendaraan yang dapat meningkatan produksi air lindi. Hal penting dari kondisi ini adalah bahwa terjadi kekurangan kapasitas pengangkutan. Sehingga perlu dilakukan penambahan unit kendaraan atau ritase beroperasinya proses pengangkutan. Kemudian, pada variabel respon jumlah sampah TPS, secara keseluruhan pada kesembilan skenario yang diterapkan mengalami peningkatan jumlah sampah TPS. Penambahan terkecil terjadi pada skenario 2,5, dan 6, dimana terdapat upaya pengurangan jumlah sampah TPS dengan peningkatan kapasitas dan teknologi pengolahan sampah di bank sampah. Sedangkan pada skenario 1 tidak terjadi penurunan jumlah sampah TPS yang disebabkan oleh tidak adanya upaya pengurangan jumlah sampah di TPS.

Selanjutnya yaitu variabel respon akumulasi sampah TPS. Peningkatan jumlah produksi sampah per penduduk dan jumlah sampah TPS dengan tanpa diimbangi dengan peningkatan kapasitas pengangkutan sampah berdampak pada sisa jumlah sampah yang terakumulasi di TPS. Sisa akumulasi sampah terbesar terjadi pada skenario 1. Hal ini disebabkan oleh adanya penurunan jumlah kendaraan (*layoff*) pada skenario 1 yang mengakibatkan penurunan kapasitas pengangkutan. Padahal pada kondisi ini kebutuhan kapasitas pengangkutan justru meningkat. Sedangkan peningkatan sisa akumulasi sampah TPS terkecil terjadi pada skenario 2,5, dan 6. Dimana pada skenario ini juga terjadi penurunan sampah TPS paling besar yang disebabkan oleh adanya penambahan kapasitas dan teknologi pengolahan sampah di bank sampah. Selanjutnya yaitu variabel respon utilitas kendaraan pengangkutan. Peningkatan jumlah sampah TPS yang berdampak pada intensitas pengangkutan sampah mengakibatkan adanya peningkatan utilitas kendaraan. Selain itu, semua skenario menunjukkan adanya kelebihan beban

pengangkutan sampah yang ditunjukkan dengan utilitas mencapai 100% dan sisa akumulasi sampah di TPS.

Variabel respon selanjutnya yaitu akumulasi sampah TPA. Seluruh skenario menunjukkan penurunan salah satunya dipengaruhi oleh tidak semua sampah di TPS terangkut ke TPA, yang disebabkan oleh kapasitas pengangkutan sampah yang lebih kecil dari pada total sampah TPS. Adapun penurunan akumulasi sampah terbesar terjadi pada skenario 6, dimana pada skenario ini terdapat penambahan kapasitas dan teknologi pengolahan sampah baru. Pada skenario 7, 8, dan 9, meskipun skenario ini juga mengaplikasikan semua fasilitas pengolahan yang ada pada skenario 6, namun terdapat penurunan kapasitas pengolahan sampah. Selain itu, pada skenario 2 dan 3 menunujukkan adanya kesamaan total pengurangan akumulasi sampah TPA. Hal ini dapat disimpulkan pengoperasian bank sampah sebesar 600 ton/ hari atau 500 ton/ hari pengurangan sampah masih berdampak pada jumlah sampah yang melebihi kapasitas pengangkutan. Sehingga kedua skenario ini menghasilkan jumlah pengangkutan sampah yang sama ke TPA. Selain itu, hal ini juga dipengaruhi oleh kesamaan waktu mulai beroperasinya PLTSa yaitu tahun 2021, dimana jumlah sampah tertimbun di TPA skenario 2 dan 3 sama akibat kekurangan kapasitas pengangkuan.

Selanjutnya yaitu variabel respon ketinggian timbunan sampah di TPA. Skenario ini bergantung pada besar timbunan sampah yang ada di TPA. Skenario 6 dengan nilai akumulasi sampah TPA terkecil juga menghasilkan ketinggian timbunan yang paling rendah jika dibandingkan dengan skenario lainnya. Sedangkan pada skenario 1, pengurangan ketinggian sampah disebabkan oleh nilai sampah yang diangkut kecil dibandingkan skenario yang lainnya. Kemudian adalah variabel respon produksi air lindi sampah TPA. Pada kondisi esktrim ini terjadi peningkatan produksi air lindi tiap ton sampahnya. Skenario 6 dengan penurunan akumulasi sampah TPA menyebabkan penurunan produksi ari lindi sampah TPA yang terbesar pula. Selanjutnya yaitu produksi air lindi pengangkutan sampah. Peningkatan jumlah sampah TPS, produksi air lindi per ton sampah, dan faktor kompresi kendaraan memberikan dampak peningkatan produksi air lindi pada seluruh skenario. Pada skenaroi 2 hingga 9, peningkatan jumlah air lindi pengangkutan bernilai sama yang disebabkan oleh jumlah pengangkutan sampah

yang relatif sama, yaitu sesuai dengan kapasitas maksimum kendaraan. Hal ini terjadi karena pada seluruh skenario mengalami kelebihan jumlah sampah yang harus diangkut. Pada skenario1, memiliki jumlah peningkatan air lindi terkecil yang disebabkan oleh adanya pengurangan jumlah kendaraan. Sehingga jumlah sampah yang diangkut lebih kecil dibandingkan dengan skenario lainnya.

Kemudian yaitu variabel respon utilitas IPAL. Peningkatan utilitas terbesar terjadi pada skenario 1 yang mana pada skenario ini terjadi peningkatan produksi air lindi sampah TPA ataupun produksi air lindi pengangkutan sampah. Skenario ke-6 dengan penurunan produksi air lindi sampah TPA paling tinggi, menyebabkan peningkatan utilitas IPAL paling kecil dibandingkan dengan skenario lainnya. Selanjutnya yaitu variabel respon akumulasi CO_2 di lingkungan. Secara keseluruhan, semua skenario mengalami peningkatan jumlah akumulasi CO_2 di lingkungan. Hal ini disebabkan oleh adanya peningkatan intensitas pengangkutan sampah yang dapat menghasilkan emisi gas karbon dioksida dari proses penggunaan bahan bakar. Sedangkan pada skenario 1 memiliki peningkatan akumulasi CO_2 terkecil, selain karena jumlah pengangkutan yang lebih kecil, juga disebabkan oleh adanya penambahan luas RTH yang meningkatkan jumlah penyerapan CO_2 ke lingkungan. Variabel respon selanjutnya yaitu emisi GRK di lingkungan dengan sumber utamanya adalah emisi gas karbon dioksida, gas metan, dan gas nitrogen dioksida proses pengelolan sampah. Gas nitrogen dioksida memberikan dampak pada pemanasan global yang paling tinggi, yang bersumber dari aktivitas penggunaan bahan bakar dan pengomposan. Sehingga 6 adalah skenario dengan dampak emisi GRK paling tinggi disebabkan oleh adanya penambahan emisi GRK dari proses pengomposan baik dari bank sampah atau fasilitas pemilahan dengan kapasitas paling besar dari pada skenario yang lainnya.

Kemudian yaitu variabel respon total kebutuhan biaya. Peningkatan kebutuhan biaya terjadi padi seluruh skenario yang disebabkan oleh peningkatan jumlah sampah yang harus dikelola. Peningkatan terbesar terjadi pada skenario 6 dengan alternatif pengolahan sampah paling banyak dan paling besar kapasitasnya. Sedangkan peningkatan terkecil terjadi pada skenario 1 dengan alternatif pengolahan sampah paling sedikit dan jumlah sampah paling sedikit pula dipengaruhi oleh pengurangan jumlah sampah yang diangkut ke TPA akibat proses

layoff kendaraan. Selanjutnya yaitu variabel respon total pendapatan pengelolaan sampah. Peningkatan pendapatan paling besar terjadi pada skenario 6, oleh karena adanya tambahan pendapatan selain listrik PLTSa yaitu penjualan produk kompos dan sampah terpilah dari aktivitas bank sampah dan pemilahan sampah dengan kapasitas paling besar.Variabel respon yang terakhir yaitu total penyerapan pekerja. Skenario 6 dengan alternatif pengolahan sampah paling banyak dan kapasitas paling besar berdampak pada potensi penyerapan pekerja paling besar pula dibandingkan dengan skenario lainnya.

5.5 Pemilihan Skenario berdasarkan Semua Kondisi

Pada subbab ini akan dilakukan penilaian skenario berdasarkan ketiga kondisi, yaitu: kondisi eksisting, kondisi ekstrim 1, dan kondisi ekstrim 2. Penilaian didasarkan pada peraturan Jakstrada Pemerintah Surabaya, dimana terdapat target pengurangan sampah, yang salah satu indikatornya adalah peningkatan jumlah sampah terdaur ulang di sumber sampah, dan peningkatan jumlah sampah termanfaatkan kembali di sumber sampah. Target ini akan dilihat dari besar nilai variabel respon pengurangan jumlah akumulasi sampah TPS, yang disebabkan oleh pengurangan jumlah sampah untuk diolah pada bank sampah (dipilah untuk dijual dan dikompsting). Selanjutnya yaitu target penanganan sampah. Indikator pencapaian target ini yaitu penurunan jumlah sampah yang diangkut ke TPA yang diukur melalui variabel respon jumlah penurunan sampah yang diangkut. Selain itu, terdapat indikator lain yaitu penurunan jumlah sampah yang terproses di TPA yang diukur melalui variabel respon jumlah akumulasi sampah TPA. Selain itu, variabel respon total pendapatan juga akan diukur sebagai indikator peningkatan jumlah sampah yang terolah baik menjadi sumber energi atau bahan baku.

Berdasarkan kondisi eksisting, skenario 6 adalah skenario dengan penurunan jumlah sampah TPS dan TPA, penurunan terbesar jumlah sampah yang diangkut ke TPA, dan peningkatan total sampah menjadi sumber daya terbesar. Namun, skenario ini mendatangkan kemungkinan penurunan produksi listrik PLTSa pada akhir tahun 2031 pada kondisi esktrim 1 dan kondisi esksisting. Sedangkan pada kondisi ekstrim 2, tidak terjadi penurunan produksi listrik karena peningkatan jumlah produksi sampah. Selain itu, skenario ini juga berdampak pada

penurunan utilitas kendaraan dan utilitas IPAL oleh karena pengurangan jumlah sampah. Pengoptimalan skenario ini dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu: 1) pengoptimalan peran bank sampah melalui program penyuluhan peran penting bank sampah dalam mengurangi dampak negatif sampah kepada masyarakat atau pembentukan tim khusus yang berfungsi mengontrol dan mengingatkan masyarakat untuk memilah sampah serta mengumpulkannya ke bank sampah, (2) pengoptimalan utilitas PLTSa melalui proses impor sampah dari daerah lain pada akhir tahun 2032, (3) pengoptimalan utilitas kendaraan melalui proses pengurangan jumlah kendaraan pada kondisi adanya penurunan jumlah produksi sampah masyarakat, dan penambahan jumlah kendaraan pada kondisi adanya peningkatan jumlah produksi sampah masyarakat, (4) pengoptimalan utilitas IPAL melalui penerimaan jasa pengolahan air limbah, dan (5) program penyuluhan atau pembentukan tim khusus untuk meningkatkan kedasaran masyarakat terkait pentingnya 3R dari rumah.

Selanjutnya, skenario penyesuaian kapasitas bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah terpusat dalam rangka menjaga utilitas fasilitas PLTSa akan dibandingkan sebagai perbaikan performansi skenario 6. Skenario penyesuaian ini mengakibatkan kestabilan pasokan sampah untuk PLTSa, sehingga tidak diperlukan proses impor sampah dari daerah lain. Dari skenario penyesuaian yang ada, pada kondisi eksisting, dari enam skenario penyesuaian kapasitas (skenario 3,4,5,7,8, dan 9), skenario 5 adalah skenario yang lebih unggul dan tetap menjaga keberlanjutan proses PLTSa. Pada kondisi eskstrim 1, skenario 5 juga merupakan skenario yang unggul dari pada keenam skenario yang lainnya. Namun, pemilihan skenario 5 berdampak pada pengunduran waktu mulai PLTSa beroperasi hingga tahun 2023, demi menjaga pasokan sampah yang stabil hingga akhir tahun 2032, dan juga mengakibatkan penurunan utilitas kendaraan dan utilitas IPAL pada kondisi saat ini dan ekstrim 1. Pengoptimalan performansi skenario 5 ini dapat dilakukan melalui berbagai cara yaitu: 1) pengoptimalan peran bank sampah melalui program penyuluhan peran penting bank sampah dalam mengurangi dampak negatif sampah kepada masyarakat atau pembentukan tim khusus yang berfungsi mengontrol dan mengingatkan masyarakat untuk memilah sampah serta mengumpulkannya ke bank sampah, (2) pengoptimalan utilitas PLTSa melalui

proses impor sampah dari daerah lain pada akhir tahun 2032, (3) pengoptimalan utilitas kendaraan melalui proses pengurangan jumlah kendaraan pada kondisi adanya penurunan jumlah produksi sampah masyarakat, dan penambahan jumlah kendaraan pada kondisi adanya peningkatan jumlah produksi sampah masyarakat, (4) pengoptimalan utilitas IPAL melalui penerimaan jasa pengolahan air limbah, dan (5) program penyuluhan atau pembentukan tim khusus untuk meningkatkan kedasaran masyarakat terkait pentingnya 3R dari rumah. Namun, meskipun pengoptimalan skenario telah dilakukan, pemunduran operasional PLTSa menghasilkan dampak negatif yang tidak bisa dihindari seperti misalnya biaya depresiasi bangunan dan mesin PLTSa.

Kemudian, pada kondisi pemerintah lebih mengutamakan pengoptimalan utilitas PLTSa dan pencegahan pemunduran dimulainya operasional PLTSa, maka dari dua skenario (skenario 3 dan 7), skenario 3 adalah skenario yang lebih unggul dari skenario 7 pada kondisi eksisting dan ekstrim bawah. Skenario 3 lebih unggul dalam penurunan jumlah sampah TPS, penurunan emisi GRK, dan peningkatan total pendapatan sampah. Sedangkan pada kondisi ekstrim atas, skenario 3 dan skenario 7 sama-sama unggul pada dua indikator yang berbeda. Skenario 3 unggul pada penurunan jumlah sampah TPS dan peningkatan total pendapatan sampah. Sedangkan skenario 7 unggul pada penurunan jumlah timbunan sampah TPA dan emisi GRK pengelolaan sampah. Meskipun begitu, skenario ini berdampak pada penurunan utilitas kendaraan dan IPAL oleh karena pengurangan jumlah timbunan sampah. Pengoptimalan performansi skenario 3 atau 7 ini dapat dilakukan melalui bererapa cara yaitu: 1) pengoptimalan peran bank sampah melalui program penyuluhan peran penting bank sampah dalam mengurangi dampak negatif sampah kepada masyarakat atau pembentukan tim khusus yang berfungsi mengontrol dan mengingatkan masyarakat untuk memilah sampah serta mengumpulkannya ke bank sampah, (2) pengoptimalan utilitas kendaraan melalui proses pengurangan jumlah kendaraan pada kondisi adanya penurunan jumlah produksi sampah masyarakat, dan penambahan jumlah kendaraan pada kondisi adanya peningkatan jumlah produksi sampah masyarakat, (3) pengoptimalan utilitas IPAL melalui penerimaan jasa pengolahan air limbah, dan (4) program penyuluhan atau pembentukan tim khusus untuk meningkatkan kedasaran masyarakat terkait pentingnya 3R .

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dipaparkan mengenai kesimpulan dari hasil penelitian dan saran yang diberikan terhadap *stakeholder* terkait.

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis model eksisting dan skenario yang telah dilakukan oleh peneliti, berikut adalah kesimpulan yang bisa ditarik dari penelitian ini:

1. Berdasarkan pemodelan di dalam penelitian ini, diketahui bahwa sistem pengelolaan sampah perkotaan, khususnya pengelolaan sampah di Kota Surabaya, terdiri atas beberapa submodel yaitu: (a). submodel produksi sampah penduduk, (b) submodel fasilitas TPS, (c) submodel fasilitas bank sampah, (d) submodel pengangkutan sampah, (e) submodel penimbunan sampah, (f) submodel LFG *Power Plant*, (g) submodel fasilitas pemilahan sampah, dan (h) submodel PLTSa gasifikasi. Selain itu, dalam pemodelan analisis keberlanjutan, juga dimasukkan submodel aspek sosial, aspek ekonomi, dan aspek lingkungan dalam model utama pengelolaan sampah Surabaya.
2. a). Submodel yang krusial untuk mendukung keberlanjutan pengelolaan sampah adalah submodel bank sampah dan fasilitas pemilahan sampah di TPA. Hal ini disebabkan oleh peran penting bank sampah atau fasilitas pemilahan sampah dalam mengurangi jumlah timbunan sampah di TPA. Penentuan kapasitas bank sampah yang sesuai dapat membantu agar fasilitas pengolahan sampah di TPA terutilisasi dengan optimal.

   b). Peningkatan jumlah sampah yang tertimbun di TPA hingga akhir tahun 2032, meningkatkan total pembiayaan oleh Pemerintah Kota Surabaya dan meningkatkan potensi pendapatan sampah oleh PT. Sumber Organik. Hal ini disebabkan oleh adanya biaya sewa pengelolaan sampah di TPA setiap tonnya yang harus dibayarkan oleh pemerintah kepada pengelola fasilitas TPA.

c). Penambahan fasilitas pengolahan sampah di luar dan di dalam TPA diperlukan untuk mendukung keberlanjutan pengelolaan sampah yaitu: penurunan dampak lingkungan sampah, peningkatan pendapatan dari pengolahan sampah, dan potensi penyerapan pekerja dari pengelolaan yang mendukung pencapaian target upaya pengurangan jumlah timbunan sampah dan penurunan emisi pengolahan sampah di Surabaya. Penambahan fasilitas di luar TPA akan menurunkan total kebutuhan biaya oleh pemerintah dan potensi penurunan pendapatan pengelolaan sampah di TPA. Sedangkan penambahan fasilitas di dalam TPA akan meningkatkan total kebutuhan biaya oleh pemerintah namun meningkatkan potensi pendapatan pengelolaan sampah di TPA. Penentuan kapasitas dan fasilitas yang sesuai dapat membantu pengoptimalan pengolahan sampah dari sumber sampah atau fasilitas pengolahan akhir.

3. a). Setiap skenario kebijakan memiliki kelemahan dan kelebihan pada tiap variabel respon yang diamati. Apabila pemerintah lebih mengutamakan pengurangan jumlah sampah TPS dan TPA maka skenario 6 (Pengembangan Fasilitas Bank Sampah, Pemilahan Sampah Terpusat, dan PLTSa) merupakan alternatif kebijakan yang paling baik. Sedangkan apabila pemerintah lebih mengutamakan pengoptimalan utilitas PLTSa, skenario 5 (Pengembangan Fasilitas Bank Sampah pada Tahun 2021 dan Pengoperasian PLTSa pada Tahun 2023). Namun, apabila pemerintah lebih mengutamakan pengoptimalan utilitas PLTSa dan pencegahan pemunduran operasional PLTSa, maka skenario 3 (Pengembangan Fasilitas Bank Sampah dan Pengoperasian PLTSa pada Tahun 2021) adalah alternatif kebijakan yang paling baik.

   b). Perubahan kemungkinan kondisi pengelolaan sampah tetap menyimpulkan bahwa skenario 6 (Pengembangan Fasilitas Bank Sampah, Pemilahan Sampah Terpusat, dan PLTSa) merupakan alternatif kebijakan yang paling baik pada pengutamaan pengurangan jumlah sampah TPS dan TPA. Skenario 5 (Pengembangan Fasilitas Bank Sampah pada Tahun 2021 dan Pengoperasian PLTSa pada Tahun 2023) juga tetap menjadi alternatif kebijakan yang paling baik pada upaya penjagaan utilitas PLTSa.

Kemudian, pada pengutamaan upaya pengoptimalan utilitas PLTSa dan pencegahan pemunduran operasional PLTSa, Skenario 3 (Pengembangan Fasilitas Bank Sampah dan Pengoperasian PLTSa pada Tahun 2021) juga merupakan alternatif kebijakan yang paling baik. Meskipun, pada kondisi ekstrim atas, skenario 3 dan skenario 7 (Pengoperasian Bank Sampah, Fasilitas Pemilahan Sampah Terpusat, dan PLTSa pada tahun 2021) merupakan skenario yang sama-sama unggul.

6.2. Saran

Berikut adalah saran yang diberikan untuk *stakeholder* terkait dan untuk penelitian selanjutnya.

1. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas batasan sistem yang diamati seperti yang telah tercantum pada *influence diagram* (pemodelan yang tidak meninjau sampah dari sumber sampah (*point source*), subsistem TPST/ TPS-3R, kondisi bank sampah eksisting, dan sumber sampah lainnya) dan menghilangkan asumsi yang digunakan (asumsi konsumsi BBM sama untuk semua jenis kendaraan dan asumsi efisiensi proses yang tetap). Sehingga dapat diperoleh pengembangan skenario kebijakan pengelolaan sampah Surabaya yang mempertimbangkan semua kemungkinan kondisi.
2. Penentuan skenario kebijakan dengan memperhatikan parameter kelayakan pengoperasian skenario secara ekonomi seperti nilai parameter *Net Present Value* (NPV), *Interest Rate of Return* (IRR), *Payback Period*, dsb.
3. Analisis lebih lanjut terkait pemilihan skenario terbaik dengan mempertimbangkan preferensi Pemerintah Kota Surabaya, PT. Sumber Organik, dan masyarakat.
4. Pemerintah Surabaya dapat meningkatkan kerjasama dengan pemerintah desa atau kelurahan, atau komunitas lokal terkait kampanye pengurangan jumlah produksi sampah, dan pengoptimalan peran bank sampah dalam pengelolaan sampah Surabaya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Advertorial - Detik News, 2019. *Sampah di Surabaya Diolah Jadi Energi Listrik di TPA Benowo.* [Online] Available at: https://news.detik.com/adv-nhl-detikcom/d-4701187/sampah-di-surabaya-diolah-jadi-energi-listrik-di-tpa-benowo
[Diakses 12 April 2020].

Agbaeze, Onwuka, I. O. & Agbo, 2014. Impact of Sustainable Solid Waste Management on Economic Development – Lessons from Enugu State Nigeria. *Economics and Sustainable Development,* 5(9), pp. 130-140.

Agustia, Y. P., 2014. *MODEL SISTEM DINAMIK PADA PENGEMBANGAN PENGELOLAAN SAMPAH KECAMATAN GUBENG, KOTA SURABAYA* , Surabaya: ITS.

Al Hakim, B., 2016. *STUDI AWAL POTENSI LIMBAH CAIR SAMPAH (LINDI) SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF BIOGAS DI TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR (TPA) KEPUTIH SURABAYA.* [Online] Available at: https://www.researchgate.net/publication/291184571_STUDI_AWAL_POTENSI_LIMBAH_CAIR_SAMPAH_LINDI_SEBAGAI_SUMBER_ENERGI_ALTERNATIF_BIOGAS_DI_TEMPAT_PEMBUANGAN_AKHIR_TPA_KEPUTIH_SURABAYA
[Diakses 9 July 2020].

An, B., Cahya W, L. M. & Fudhla, A. F., 2013. *Analisis Potensi Utilisasi Sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kota Metropolis: Suatu Pendekatan Model Berbasis Sistem Dinamik (Study Kasus: TPA Kota Surabaya).* Surabaya, Proceedings 7th National Industrial Engineering Conference .

Andina, E., 2019. Analisis Perilaku Pemilahan Sampah di Kota Surabaya. *Jurnal Masalah-Masalah Sosial* , Volume 10, pp. 119-138.

Babalola, M. A., 2019. A System Dynamics-Based Approach to Help Understand the Role of Food and Biodegradable Waste Management in Respect of Municipal Waste Management Systems. *Sustainability,* pp. 11, 3456.

Babalola, M. A., 2019. A System Dynamics-Based Approach to Help Understand the Role of Food and Biodegradable Waste Management in Respect of Municipal Waste Management Systems. *Sustainability,* Volume 11, pp. 1-20.

Babu, S. S. et al., 2010. Studies on environmental quality in and around municipal solid waste dumpsite. *Resources Conservation and Recycling,* pp. 55, 129-134.

Barlas, Y., 1996. Format Aspects of Model Validity and Validation on System Dynamics. *System Dynamics Review,* pp. 183-210.

Bartl, A., 2014. Moving from recycling to waste prevention: a review of barriers and enables. *Waste Management & Research,* 32(9), pp. 3-18.

Basiago, 1999. Economic, social, and environmental sustainability in. *The Environmentalist,* Volume 19, pp. 145-161.

Berg, N., 2011. *CITYLAB.* [Online] Available at: https://www.citylab.com/design/2011/09/defining-cities-metropolitan-world/102/

Bing, X. et al., 2016. Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Manag,* pp. 48, 584–592.

Bogner, J. & Matthews, E., 2003. Global Methane Emissions From and Fills: New Methodology and Annual Estimates 1980-1996. *Global Biogeochemical Cycles Journal,* pp. Vol 17: 34-18.

Boucher, O., Friedlingstein, P., Collins, B. & Shine, K. P., 2009. The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation. *Environmental Research Letters,* pp. 4, 0440077.

Bove, R. & Launghi, P., 2006. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy Conversion and Management,* 47(11-12), pp. 1391-1401.

Brunner & Rechberger, 2014. Waste to energy – key element for sustainable waste management. *Waste Management,* Volume 1, pp. 1-10.

Byun, Y., Cho, M., Hwang, S.-M. & Chung, J., 2014. *Thermal Plasma Gasification of Municipal Solid Waste (MSW),* Korea: InTech.

Cahya, W. I., 2017. *Kajian Aspek Teknis dan Finansial Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Gunung Bahagia, Kota Balikpapan,* Surabaya: ITS.

Chatzisymeon, E., Foteinis, S., Mantzavinos, D. & Tsoutsos, T., 2013. Life Cycle Assessment of Advanced Oxidation Processes for Olive Mill Wastewater Treatment. *Cleaner Production,* Volume 54, pp. 229-234.

Climate Transparency, 2018. *BROWN TO GREEN: TRANSISI G20 MENUJU EKONOMI RENDAH KARBON,* 2018: Climate Transparency.

Daellenbach, H. G. & McNickle, D. C., 2005. *Management science Decision making through systems thinking.* New York: PALGRAVE MACMILLAN.

Demoral, A. A., Gunay, C. J. C. & Malayao, V. T., 2018. *Energy Use in Municipal Services,* s.l.: Researchgate.net.

Department for Environment Food and Rural Affairs from UK, 2014. *Advanced Biological Treatment of Municipal Solid Waste.* [Online] Available at: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/284612/pb14130-energy-waste-201402.pdf
[Diakses 18 March 2020].

Deus, R. M., Mele, F. D., Bezerra, B. S. & Battistelle, R. A. G., 2019. A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assesment and Identification of best management practices. *Cleaner Production,* Volume 252, pp. 1-14.

Development, I. I. f. S., 2016. *Sustainable Development.* [Online] Available at: https://www.iisd.org/topic/sustainable-development

Ding, Z. et al., 2018. A system dynamics-based environmental benefit assesment model of cinstruction waste reduction management at the design and construction stages. *Cleaner Production,* Volume 176, pp. 676-692.

Direktorat PLP, Ditjen Cipta Karya, Departemen PU, 1992. *Persampahan Petunjuk Perencanaan Teknis dan Manajemen,* Jakarat: Direktorat PLP, Ditjen Cipta Karya, Departemen PU.

DKRTH, 2020. *Pengangkutan Sampah Surabaya* [Wawancara] (1 1 2020).

EESI Environmental and Energy Study Institute, 2017. *Fact Sheet - Biogas: Converting Waste to Energy.* [Online] Available at: https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-biogasconverting-waste-to-energy
[Diakses 12 April 2020].

El-Maghraby, A. et al., 2014. BENEFICIAL REUSE OF WASTE PRODUCTS. Dalam: *Handbook of Environment and Waste Management.* Egypt: WSPC, pp. 425-489.

Ferronato, N. et al., 2019. Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. *Environ. Manag,* pp. 230, 366–378.

Ferronato, N. & Torretta, V., 2019. Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* pp. 16,1060.

Ford, A., 2010. *Modeling the Environment, 2nd ed.* Washington, DC, USA: Island Press.

Forrester, J. & Senge, P., 1980. Tests for Building Confidence in System Dynamics Models. *TIME Studies in the Management Science,* Issue 14, pp. 209-228.

Gaol, M. L., 2017. *LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) PENGELOLAAN SAMPAH PADA TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA) SAMPAH (STUDI KASUS: TPA JABON, KABUPATEN SIDOARJO)* , Surabaya: ITS.

Ghanimeh, Fadel, E. & Saikaly, 2012. Mixing effect on thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology,* Volume 117, pp. 63-71.

GIZ, 2017. *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A guide for Decision Maker in Developing and Emerging Countries.* [Online] Available at: https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf [Diakses 17 3 2020].

Grant, M., 2020. *Sustainability.* [Online] Available at: https://www.investopedia.com/terms/s/sustainability.asp [Diakses 18 April 2020].

Gupta, N., Yadav, K. K. & Kumar, V., 2015. A review on current status of municipal solid waste management in India. *J. Environ. Sci. (China),* p. 206–217.

Halkos, George, Petrou & Natalia, K., 2016. *Efficient waste management practices: A review,* Volos, Yunani: Munich Personal RePEc Archive.

Ilhamsah, H. A., Prasetyo, T. & Mustajib, I., 2017. An Integrated Framework of System Dynamics and Life Cycle Assessment for Managing Sustainable Creative Industries. *Applied Engineering Research,* 12(23), pp. 13482-13487.

Indonesia, 2008. *Undang Undang RI No 18 Tahun 2008.* Indonesia: s.n.

International Ecocity Framework & Standards (IEFS) Advisory Team, 2010. Vancouver, Canada: s.n.

IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, s.l.: IPCC.

J.W, Forrester, 1969. *Urban Dynamics.* Cambridge: M.I.T. Press.

Jaisyullah, U. A., 2017. *PROGRAM PENGELOLAAN EMISI GAS RUMAH KACA DI TPA BENOWO* , Surabaya: ITS.

Jang, H.-H., Seo, G.-T. & Jeong, D.-W., 2018. Advanced Oxidation Processes and Nanofiltration to Reduce the Color and Chemical Oxygen Demand of Waste Soy Sauce. *Sustainability,* 10(2929), pp. 1-12.

Jassim, A. K., 2017. Sustainable Solid Waste Recycling. Dalam: *Skills Development for Sustainable Manufacturing.* China: InTech, pp. 1-15.

Karak, T. et al., 2013. Non-segregated municipal solid waste in an open dumping ground: A potential contaminant in relation to environmental health. *International Journal Environment Science and Technology,* pp. 10, 503-518.

Khatib, I., 2011. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries: Future Challenges and Possible Opportunities. Dalam: M. S. Kumar, penyunt. *Integrated Waste Management – Volume II.* Cina: InTech, pp. 35-48.

KLH, 2016. *Standar Baku Mutu Air Lindi,* Indonesia: Kementerian Lingkungan Hidup.

KLHK, 2019. *ADIPURA 2025,* Indonesia: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Kolekar, K. A., Hazra, T. & Chakrabarty, S. N., 2016. A Review on Prediction of Municipal Solid Waste Generation Models. *Environmental Sciences*, pp. 238-244.

Maftuhah, D. I., 2013. *Analisis Kebijakan Budidaya Mangrove Berbasis Komunitas di Kawasan Terdampak Lumpur Sidoarjo dengan Memanfaatkan Konsep Green Economy.* Surabaya: ITS Library.

Malabay, 2008. *Pendekatan Sistem Model Causal Loop Diagram (CLD) dalam Memahami Permasalahan Penerimaan Kuantitas Mahasiswa Baru di Perguruan Tinggi Swasta.* Depok: s.n.

Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. H. & Scharff, H., 2009. Landfilling of waste: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research 27th Edition,* pp. 825-846.

Morecroft, J., 2007. *Strategic Modeling and Business Dynamics: A Feedback Systems Approach.* Chichester, UK: John Wiley.

Moya, D., Aldas, C., Lopez, G. & Kaparaju, P., 2017. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-ToEnergy Technologies. *Energy Procedia,* 5-7 July, pp. 286-295.

Moya, D., Aldas, C., Lopez, G. & Kaparaju, P., 2017. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. *Energy Procedia,* pp. 286-295.

Muhammadi, A. E. & Soesilo, B., 2001. *Analisis Sistem Dinamis: Lingkungan Hhidup, Sosial, Ekonomi, Manajemen.* Jakarta: UMJ Press.

Mulyadin, R. & Gusti, R., 2015. Analisis kebutuhan luasan area hijau berdasarkan daya serap CO2 di Kabupaten Karanganyar Jawa Tengah. *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan,* 10(4), pp. 264-273.

Mulyati, T., Mutawaqqil, M., Ilyas & Sastra, H., 2019. Planning A Village Waste Management System using System Dynamics Modelling and Simulation: TPS 3R Case Study in Aceh, Indonesia. *International Conference od Science and Innovated Engineering,* pp. 1-9.

Munoz, I., Rodriguez, A., Rosal, R. & Fernandez-Alba, A. R., 2009. Life Cycle Assesment of Urban Wastewater Reuse with Ozonation as Tertiary Treatment. *Science of The Total Environment,* Volume 407, pp. 1245-256.

Onat, N. C., Kucukvar, M., Tatari, O. & Egilmez, G., 2016. Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: a case for electric vehicles. *Life Cycle Assess.*

Patil, A. A., Kulkarni, A. A. & Patil, B. B., 2014. Waste To Energy by Inceneration. *Journal of Computing Technologies,* 3(6), pp. 12-15.

Pemerintah Republik Indonesia, 1999. *Peraturan Pemerintah No 18 Tahun 1999.* Indonesia: s.n.

Pemerintah Republik Indonesia, 2012. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 81 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Rumah Tangga.* Indonesia: s.n.

Pemerintah Republik Indonesia, 2013. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2013 Tentang Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan Dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga,* Jakarta: s.n.

Peraturan Presiden, 2017. *Peraturan Presiden (PERPRES) tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga.* Indonesia: Pemerintah Pusat.

Perrot, J.-F. & Subiantoro, A., 2018. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand. *Sustainability,* Volume 10, pp. 1-12.

Pinto, J. T. M., Sverdrup, H. U. & Diemer, A., 2019. Integrating life cycle analysis into system dynamics: the case of steel in Europe. *Environmental Systems Research,* 8(15), pp. 1-21.

Pitaloka, D. A., 2019. *Bagaimana Surabaya Mengubah Sampah Jadi Listrik.* [Online]
Available at: https://jatimnet.com/bagaimana-surabaya-mengubah-sampah-jadi-listrik
[Diakses 12 April 2020].

Poltekkes Makassar, 2009. *Sistem Penanganan Sampah di Site Benowo Surabaya.* [Online]
Available at: https://keslingmks.wordpress.com/2009/05/26/sistem-penanganan-sampah-di-site-benowo-surabaya/
[Diakses 9 July 2020].

Premakumara, D., Abe, M. & Maeda, T., 2011. Reducing municipal waste through promoting. *Ecosystems and Sustainable Development,* Volume VIII, pp. 457-467.

Rachim, T. A., 2017. *LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) PENGOLAHAN SAMPAH SECARA TERMAL (STUDI KASUS: TPA BENOWO, KOTA SURABAYA)* , Surabaya: ITS.

Ramachandra, T. V., Bharath, H. A., Kulkarni, G. & Han, S. S., 2018. Municipal solid waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 82nd Edition,* pp. 1122-1136.

Rukmananda, N., 2017. *Kota Surabaya Raih Penghargaan 'Global Green City' PBB.* [Online] Available at: https://www.voaindonesia. com/a/kota-surabaya-raih-penghargaan-globalgreen-city-pbb/4095316.html

Saari, A., 2017. *THE BENEFITS OF EFFICIENT WASTE MANAGEMENT FOR ORGANIZATIONS* , Finland: Aalto University.

Sanneh, E. S., Hu, A. H., Chang, Y. M. & Sanyang, E., 2011. Introduction of a recycling system for sustainable municipal solid waste management: A case study on the greater Banjul area of the Gambia. *Environ. Dev. Sustain,* pp. 13, 1065-1080.

Siswosudarmo, M., Aminullah, E. & Soesilo, B., 2001. *Analisis Sitem Dinamis Lingkungan Hidup, Sosial, Ekonomi, Manajemen.* Jakarta: UMJ Press.

Souza, M. A. B. B. S., Oliveira, M. B., Araujo, A. d. S. F. & de Castro, J. A., 2014. Analyze of the Density and Viscosity of Landfill Leachate in Different Temperatures. *Environmental Engineering,* 4(4), pp. 71-74.

Statistik, B. P., 2019. *Indikator Kesejahteraan Rakyat Kota Surabaya,* Kota Surabaya: s.n.

Sterman, J., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for A Complex World.* Boston, MA, USA: Irwin McGraw-Hill.

Sterman, J., 2004. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World.* 1 penyunt. Boston: Mc Graw Hill Inc.

Sterman, J. D., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for A Complex World.* Boston, MA, USA: Irwin McGraw-Hill .

Suprapto, 2016. PERAN DAUR ULANG UNTUK MENINGKATKAN PENGELOLAAN SAMPAH TERPADU DI KOTA SURABAYA. 9(2), pp. 127-142.

Syafirudin, 2012. *Analisa Manfaat dan Biaya Pembangkit Listrik Tenaga Sampah untuk di Desa Terpencil Indragiri Hilir,* Depok: s.n.

System Dynamics Society, 2019. *System Dynamics Society.* [Online] Available at: https://www.systemdynamics.org/what-is-sd [Diakses 22 February 2020].

Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S., 1993. *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues.* United States: Mc-Graw Hill.

The World Bank, 2012. *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management,* USA: The World Bank: Washington, DC.

The World Bank, 2020. *Trends in Solid Waste Management.* [Online] Available at: https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html [Diakses 12 April 2020].

Themelis, N. J. & Ulloa, P. A., 2007. Methane generation in landfills. *Renewable Energy,* pp. 32, 1243-1257.

Tonini, D., Albizzati, P. F. & Astrup, T. F., 2018. Environmental impacts of food waste: learnings and challenges from a case study on UK. *Waste Management,* Volume 76, pp. 744-766.

Torretta, V. et al., 2017. Novel and conventional technologies for landfill leachates treatment: A review.. *Sustainain,* pp. 9,9.

Trang, P. T. T. et al., 2017. The Effects of Socio-economic Factors on Household Solid Waste Generation and Composition: A Case Study in Thu Dau Mot, Vietnam. *Energy Procedia,* Volume 107, pp. 253-258.

Tseng, C.-H., Hsu, Y.-C. & Chen, Y.-C., 2019. System Dynamics modeling of waste management, greenhouse gas emissions, and environmental cost from convenience stores. *Cleaner Production,* Volume 239, pp. 1-8.

Undang Undang Republik Indonesia, 2008. *Undang Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008,* Indonesia: s.n.

United Nations Environment Programme, 2015. *Global Waste Management Outlook,* Vienna, Austria: International Solid Waste Association (ISWA).

US Department of Energy, 2019. *Waste-to-Energy from Municipal Solid Wastes* , US: US Department of Energy.

Vedeng, 2018. *Syria: A New Study To Generate Electricity And Gas From Garbage.* [Online]
Available at: http://www.en.vedeng.co/2018/09/10/syria-a-new-study-to-generate-electricity-and-gas-from-garbage/
[Diakses 12 April 2020].

Vinodh, S., R, B. & Asokan, P., 2015. Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: a case study. *Clean Technology Environment Policy - Springer.*

Walikota Surabaya, 2014. *Peraturan Daerah Kota Surabaya Nomor 5 Tahun 2014.* Surabaya: s.n.

Walikota Surabaya, 2018. *Peraturan Walikota Surabaya Nomor 64 Tahun 2018.* Surabaya: s.n.

Walikota Surabaya, 2018. *PERATURAN WALIKOTA SURABAYA NOMOR 64 TAHUN 2018* , Surabaya: Walikota Surabaya.

Wati, T., 2015. *Kajian Evaporasi Pulau Jawa dan Bali Berdasarkan Data Pengamatan 1975-2013,* Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Widarti, P., 2019. *Benowo Pabrik Listrik dari Sampah Terbesar di Indonesia.* [Online]
Available at: https://surabaya.bisnis.com/read/20191119/532/1171869/benowo-pabrik-listrik-dari-sampah-terbesar-di-indonesia
[Diakses 9 July 2020].

Wiedinmyer, C., Yokelson, R. J. & Gullett, B. K., 2014. Global emissions of trace gases, particulate matter, and hazardous air pollutants from open burning of domestic wastE. *Environ. Sci. Technol,* pp. 48, 9523–9530.

World Resources Institute, 2016. *MENGINTERPRETASIKAN INDC: MENILAI TRANSPARANSI TARGET EMISI GAS RUMAH KACA PASCA-2020 DARI 8 NEGARA PENYUMBANG EMISI TERBESAR,* Washington, DC: World Resources Institute.

X, L. et al., 2015. A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing. *Energy Policy,* Volume 85, pp. 253-270.

Yao, L. et al., 2018. An integrated method of life-cycle assesment and system dynamics for waste mobile phone management and recycling in China. *Cleaner Production,* Volume 187, pp. 852-862.

Yearworth, D. M., 2014. *A Brief Introduction to System Dynamics Modelling,* s.l.: University of Bristol.

Zafar, S., 2019. *Waste to Energy Conversion Routes. BioEnergy Consult.* [Online] Available at: https://www.bioenergyconsult.com/waste-to-energy-pathways/ [Diakses 18 3 2020].

Zefa Valindo Jaya, 2015. *Sukses implementasi AOP-Nano Teknologi di IPAL TPA Benowo-Surabaya.* [Online] Available at: https://zefanya.co.id/2015/08/18/sukses-implementasi-aop-nano/ [Diakses 9 7 2020].

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

Biodata Penulis

Penulis bernama lengkap Danis Mandasari, lahir di Tulungagung, 25 Mei 1999. Pendidikan formal yang ditempuh penulis diawali dengan pendidikan sekolah dasar di SD Negeri 02 Sumberingin Kulon. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 01 Ngunut. Setelah lulus, penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 01 Boyolangu program akselerasi dan melanjutkan pendidikan perguruan tinggi S1 di Departemen Teknik dan Sistem Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan baik akademik maupun non akademik. Penulis aktif sebagai staf dan kabinet Departemen Keprofesian, Kajian, dan Keilmiahan Himpunan Mahasiswa Teknik Industri ITS dan memimpin beberapa program kerja dalam departemen tersebut. Dalam 4 semester terakhir, penulis aktif sebagai asisten laboratorium Quantitative Modeling and Industrial Policy Analysis. Selain itu, penulis juga aktif mengikuti perlombaan tingkat nasional terkait kompetisi penyelesaian kasus bisnis *(bisnis case competition.* Untuk informasi lebih lanjut, penulis dapat dihubungi melalui email: danismanda@outlook.co.id.