TUGAS AKHIR – TI 184833

SKENARIO PENGEMBANGAN TEMPAT PENGELOLAAN SAMPAH *REDUCE*, *REUSE*, DAN *RECYCLE* (TPS 3R) SEBAGAI PENUNJANG TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR (TPA) (STUDI KASUS PERSAMPAHAN KOTA SURABAYA)

ROCHMAT AGUNG FEBRILIANTO
NRP. 02411640000147

DOSEN PEMBIMBING:
Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng
NIP. 195503081979031001

Dosen Ko-pembimbing:
Diesta Iva Maftuhah, S.T., M.T.
NIP. 199005302015042002

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM DAN INDUSTRI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

FINAL PROJECT – TI 184833

DEVELOPMENT SCENARIO OF REDUCE, REUSE, AND RECYCLE (3R) WASTE MANAGEMENT SITE FOR SUPPORTING FINAL DISPOSAL SITE (CASE STUDY: SURABAYA WASTE MANAGEMENT)

ROCHMAT AGUNG FEBRILIANTO
NRP. 02411640000147

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

Co-supervisor:
Diesta Iva Maftuhah, S.T., M.T.
NIP. 199005302015042002

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL SYSTEM AND ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEMS ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

LEMBAR PENGESAHAN

SKENARIO PENGEMBANGAN TEMPAT PENGELOLAAN SAMPAH *REDUCE*, *REUSE*, DAN *RECYCLE* (TPS 3R) SEBAGAI PENUNJANG TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR (TPA) (STUDI KASUS PERSAMPAHAN KOTA SURABAYA)

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem dan Industri
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut
Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia

Oleh:

ROCHMAT AGUNG FEBRILIANTO

NRP 02411640000147

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing Tugas Akhir	Dosen Ko-pembimbing Tugas Akhir
Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng	**Diesta Iva Maftuhah, S.T., M.T.**
NIP. 195503081979031001	**NIP. 199005302015042002**

SURABAYA, AGUSTUS 2020

SKENARIO PENGEMBANGAN TEMPAT PENGELOLAAN SAMPAH *REUSE*, *REDUCE*, DAN *RECYCLE* (TPS 3R) SEBAGAI PENUNJANG TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR (TPA) (STUDI KASUS: PERSAMPAHAN KOTA SURABAYA)

Nama	: Rochmat Agung Febrilianto
NRP	: 02411640000147
Pembimbing	: Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng
Ko-pembimbing	: Diesta Iva Maftuhah, S.T., M.T.

ABSTRAK

TPA Benowo setiap hari menerima sampah sekitar 1.600 ton dimana kapasitas sampah yang dapat diolah TPA tersebut hanya sebesar 1.400 ton. Hal ini mengindikasikan bahwa TPA Benowo mengalami penumpukan sampah sebanyak 200 ton setiap harinya. Salah satu upaya pemerintah untuk mengurangi sampah adalah dengan program pengolahan sampah berbasis masyarakat melalui TPS 3R yakni dengan mengolah sampah pada TPS 3R terlebih dahulu sehingga TPA Benowo hanya akan menerima residu sampah. Namun, penyebaran TPS 3R di Surabaya yang belum merata serta pengolahan sampah yang belum efektif menyebabkan masih banyaknya sampah diangkut ke TPA Benowo. Berdasarkan kondisi tersebut, dilakukan simulasi sistem dinamik untuk mengoptimalkan persampahan pada TPS 3R sehingga dapat mengurangi volume sampah yang masuk ke TPA Benowo. Terdapat empat skenario yang digunakan untuk mereduksi sampah yakni (1) skenario peningkatan radius cakupan TPS 3R, (2) penambahan jumlah TPS 3R, (3) peningkatan kapasitas komposter, serta (4) skenario kombinasi antara penambahan jumlah TPS dan peningkatan kapasitas komposter. Didapatkan bahwa skenario terbaik untuk mereduksi sampah adalah skenario keempat dengan reduksi sampah paling besar yakni hingga 1.200 – 1.300 ton sampah per hari namun memiliki nilai dampak lingkungan tidak sebaik skenario kedua sehingga terdapat *trade-off* antara skenario kedua dan skenario keempat. Disimpulkan bahwa DKP Surabaya disarankan untuk meningkatkan jumlah TPS 3R sehingga seluruh area di Surabaya tercakup oleh TPS 3R tersebut serta meningkatkan kapasitas pengomposan menjadi 3 ton per TPS 3R.

Kata kunci: sistem dinamik, pengelolaan sampah, reduksi volume sampah, *life cycle assessment* (LCA)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DEVELOPMENT SCENARIO OF REDUCE, REUSE, AND RECYCLE (3R) WASTE MANAGEMENT SITE FOR SUPPORTING FINAL DISPOSAL SITE (CASE STUDY: SURABAYA WASTE MANAGEMENT)

Name	: Rochmat Agung Febrilianto
NRP	: 02411640000147
Supervisor	: Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng
Co-supervisor	: Diesta Iva Maftuhah, S.T., M.T.

ABSTRACT

Benowo landfill receiving 1.600 tons of solid waste daily which can only process 1.400 tons daily. This indicates that Benowo landfill stock around 200 tons of solid waste daily. One of the governments of Surabaya's policy to reduce waste is through a community-based waste management program through TPS 3R by processing solid waste at TPS 3R first so that Benowo landfill will only receive waste residues. However, the location of TPS 3R is not evenly distributed in the area of Surabaya and the unefectiveness of solid waste treatment causes a large amount of solid waste to be transported to the Benowo landfill. Under these conditions, a system dynamic simulation is used to optimize solid waste management at TPS 3R to reduce the volume of solid waste that received by Benowo landfill. Four scenarios is designed to solve these problems, there are (1) increasing the radius of TPS 3R's coverage, (2) increasing the number of TPS 3R, (3) increasing the composter capacity, and (4) combined scenario of increasing number of TPS 3R and composter capacity simultaneously. From this research, its known that the best scenario to reduce waste is the fourth scenario with the largest waste reduction up to 1.200 – 1.300 tons of waste per day but this scenario released bigger GHG emissions rather than second scenario which has the lowest environmental impact. Thus, there is a trade-off situation between second and fourth scenario. It was concluded that DKP Surabaya is suggested to increase the number of TPS 3R increase the composting capacity to 3 tons per TPS.

Keyword: system dynamics, solid waste management, reducing waste, life cycle assessment (LCA)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena karunia dan anugerah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Skenario Pengembangan Tempat Pengelolaan Sampah *Reduce, Reuse,* dan *Recycle* (TPS 3R) sebagai Penunjang Tempat Pembuangan Akhir (TPA) (Studi Kasus Persampahan Kota Surabaya) sebagai salah satu persyaratan dalam meraih gelar sarjana Teknik Sistem dan Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas akan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian tugas akhir penulis sebagai berikut.

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M. Eng selaku dosen pembimbing tugas akhir serta Ibu Diesta Iva Maftuhah, S.T, M.T selaku dosen ko-pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan arahan, masukan, nasehat, beserta kesabaran dalam membimbing penulis.
2. Berbagai pihak dari Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) serta Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau (DKRTH) Kota Surabaya atas availabilitas akses data, *forum group discussion,* dan wawancara yang dapat dilakukan oleh penulis sehingga penulis dapat mencukupi segala kebutuhan data terkait tugas akhir.
3. Bapak Drs. Sardjianto dan Ibu Dra. Yuliati, M.M. selaku kedua orang tua penulis yang selalu berperan dalam memberikan motivasi, semangat, dan dukungan baik secara moral maupun spiritual.
4. Dian Nurliasari, S.E., M.M. dan Farlian Satrio Nugroho, S.E. selaku kakak kandung penulis yang selalu memberikan dukungan moral serta bantuan akademis selama penulis melakukan penulisan tugas akhir.
5. Danis Mandasari selaku rekan penulis atas dukungan akademis dan pembelajaran yang diberikan terkait dengan topik tugas akhir dan metode penyelesaian masalah yang digunakan oleh penulis.
6. Fawzia Rahmah Gieza Isjwardhani, Natasya Putri Sekar Inayah, Muhammad Rosyid Nur Aziz, Ribagus Pideksa, dan Maulana Taufik Hendrawan selaku

rekan penulis yang tiada henti berperan sebagai *support system* dengan memberikan dukungan moral selama penulis menyelesaikan tugas akhir.

7. Naufal Ghani Ibrahim selaku rekan penulis yang selalu memberikan *support* akademis selama penulis melakukan penulisan tugas akhir maupun selama penulis melakukan studi perkuliahan.
8. Muhammad Adhi Raihanto yang selalu memberikan nasehat dan dukungan moral kepada penulis dalam menyelesaikan masalah apapun khususnya tugas akhir.
9. Seluruh rekan Teknik Sistem dan Industri 32 “Adhigana” yang selalu berbagi kebahagiaan dan keluh kesah selama penyelesaian tugas akhir.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini tidak sempurna dan masih terdapat kekurangan serta keterbatasan, oleh karena itu penulis menerima seluruh kritik dan saran atas Tugas Akhir ini sehingga dapat menjadi evaluasi bagi penulis dalam menyusun laporan ilmiah kedepannya. Akhir kata, penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak yang terkait maupun pihak yang tidak terkait secara langsung serta dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan. Terima kasih.

Surabaya, 29 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK ..... **i**

ABSTRACT ..... **iii**

KATA PENGANTAR ..... **v**

DAFTAR ISI ..... **vii**

DAFTAR GAMBAR ..... **xi**

DAFTAR TABEL ..... **xv**

BAB 1 PENDAHULUAN **1**

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 6

1.3 Tujuan 7

1.4 Manfaat 7

1.5 Ruang Lingkup Penelitian 8

1.5.1 Batasan 8

1.5.2 Asumsi 8

1.6 Sistematika Penulisan Laporan 8

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA **11**

2.1 Penelitian Terdahulu 11

2.2 Persampahan 17

2.2.1 Jenis Sampah 18

2.2.2 Sumber Sampah 19

2.2.3 Pengelolaan Sampah 21

2.2.4 *Sustainable Solid Waste Management* (SSWM) 24

2.2.5 Pengolahan Sampah di Kota Surabaya 28

2.2.6 Pengolahan Sampah di TPS 3R Kota Surabaya 30

2.3 Studi Simulasi Sistem Dinamik dalam Sistem Persampahan 31
2.3.1 Metodologi Sistem Dinamik 32
2.3.2 *Causal Loop Diagram* 34
2.3.3 *Stock and Flow Diagram* 36
2.3.4 Konsep Pengujian Model 38
2.4 *Life Cycle Assessment* (LCA) 40
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 45
3.1 *Life Cycle Assessment* (LCA) 47
3.1.1 Identifikasi Tujuan dan Ruang Lingkup 47
3.1.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) 47
3.1.3 *Life Cycle Inventory Assessment* (LCIA) 48
3.1.4 Interpretasi 48
3.2 Tahap Konseptualisasi Sistem 48
3.2.1 Identifikasi Variabel 48
3.2.2 Konseptualisasi Sistem 49
3.2.3 Validasi Model Konseptual 49
3.2.4 Pengumpulan Data 49
3.3 Tahap Simulasi dan Pengolahan Data 50
3.3.1 Perancangan Model Simulasi 50
3.3.2 *Running* Simulasi Model Awal 50
3.3.3 Validasi Model Simulasi 50
3.3.4 Perancangan Skenario Kebijakan 51
3.3.5 *Running* Simulasi Skenario Kebijakan 51
3.3.6 Komparasi Kondisi Awal dan Skenario Kebijakan 51
3.4 Tahap Analisis dan Penarikan Kesimpulan 52
3.4.1 Analisis dan Interpretasi 52

3.4.2 Penarikan Kesimpulan 52
BAB 4 *LIFE CYCLE ASSESSMENT* (LCA) 53
4.1 Pengukuran Dampak Lingkungan Proses Pengangkutan Sampah 53
4.1.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Proses Pengangkutan Sampah 53
4.1.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Pengangkutan Sampah 54
4.1.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Pengangkutan Sampah 56
4.2 Pengukuran Dampak Lingkungan Proses Pengomposan 57
4.2.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Proses Pengomposan 57
4.2.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Pengomposan 57
4.2.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Pengomposan 60
4.3 Pengukuran Dampak Lingkungan Proses Gasifikasi 60
4.3.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Proses Gasifikasi 60
4.3.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Gasifikasi 61
4.3.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Gasifikasi 65
4.4 Pengukuran Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah Plastik 65
4.4.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Penimbunan Sampah Plastik 65
4.4.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Penimbunan Sampah Plastik 66
4.4.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Penimbunan Sampah Plastik 69
4.5 Rekapitulasi Perhitungan Dampak Lingkungan 70
BAB 5 PERANCANGAN MODEL SIMULASI 73
5.1 Gambaran Umum Kota Surabaya 73
5.1.1 Kondisi Geografis Kota Surabaya 73
5.1.2 Demografi Kota Surabaya 73
5.2 Identifikasi Sistem Persampahan Surabaya 74

5.2.1 Kondisi Eksisting Pengolahan Sampah Surabaya 75
5.2.2 TPS 3R Surabaya 76
5.3 Konseptualisasi Sistem 85
5.3.1 Diagram *Input – Output* 85
5.3.2 *Causal Loop Diagram* (CLD) 88
5.4 *Stock and Flow Diagram* 89
5.4.1 Identifikasi Variabel 89
5.4.2 Model Simulasi 95
5.5 Simulasi Eksisting 104
5.5.1 Verifikasi Model 104
5.5.2 Hasil *Running* Simulasi 106
5.5.3 Validasi Model 120
BAB 6 PERANCANGAN SKENARIO KEBIJAKAN 131
6.1 Penentuan Alternatif Skenario Kebijakan 131
6.1.1 Skenario 1 – Peningkatan Radius Cakupan TPS 3R 132
6.1.2 Skenario 2 – Penambahan Jumlah TPS 3R 136
6.1.3 Skenario 3 – Peningkatan Kapasitas Komposter untuk Seluruh TPS 3R 140
6.1.4 Skenario 4 – Penambahan Jumlah TPS 3R dan Kapasitas Komposter 148
6.2 Perbandingan *Output* Skenario Kebijakan 151
BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN 157
7.1 Kesimpulan 157
7.2 Saran 159
DAFTAR PUSTAKA 161
LAMPIRAN 165

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Jumlah Produksi Sampah di Surabaya 1
Gambar 1.2 Peta Persebaran TPS 3R di Surabaya 3
Gambar 2.1 Proses Pengomposan Aerobik 22
Gambar 2.2 Gambaran Penerapan SSWM 26
Gambar 2.3 Proses Pengomposan Anaerobik 28
Gambar 2.4 Sistem Pengelolaan Sampah Kota Surabaya 29
Gambar 2.5 Mekanisme Pengolahan Sampah pada TPS 3R Kota Surabaya 30
Gambar 2.6 *Causal Loop Diagram* Sistem Persampahan 35
Gambar 2.7 Contoh SFD dalam Sistem Persampahan 36
Gambar 2.8 Fase Implementasi LCA pada Persampahan 41
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian 45
Gambar 4.1 *Material Balance* Pengangkutan Sampah 54
Gambar 4.2 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah 56
Gambar 4.3 *Material Balance* Pengomposan 58
Gambar 4.4 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Pengomposan 60
Gambar 4.5 *Material Balance* Gasifikasi 61
Gambar 4.6 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Gasifikasi 65
Gambar 4.7 *Material Balance* Penimbunan Sampah Plastik 66
Gambar 4.8 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah Plastik 70
Gambar 5.1 Komposisi Sampah TPS 3R 78
Gambar 5.2 Mekanisme Pengomposan di TPS 3R 79
Gambar 5.3 Mekanisme Gasifikasi Sampah di TPS 3R 82
Gambar 5.4 Mekanisme Penyortiran Sampah Plastik di TPS 3R 84
Gambar 5.5 Diagram *Input – Output* 86
Gambar 5.6 *Causal Loop Diagram* Sistem Persampahan TPS 3R 88
Gambar 5.7 Model Utama Sistem 96
Gambar 5.8 Sub-model Timbulan Sampah 97
Gambar 5.9 Sub-model Timbunan Sampah 98
Gambar 5.10 Sub-model Pengangkutan Sampah ke TPS 3R 99

Gambar 5.11 Sub-model Pengomposan 100
Gambar 5.12 Sub-model Gasifikasi 101
Gambar 5.13 Sub-model Penyortiran Sampah Plastik 102
Gambar 5.14 Sub-model Sampah Masuk TPA 103
Gambar 5.15 Sub-model Emisi 104
Gambar 5.16 Verifikasi Unit 105
Gambar 5.17 Verifikasi Struktur 105
Gambar 5.18 Grafik Simulasi Sub-model Timbulan Sampah 107
Gambar 5.19 Grafik Simulasi Sub-model Timbunan Sampah 108
Gambar 5.20 Grafik Simulasi Sub-model Pengangkutan Sampah 109
Gambar 5.21 Grafik Simulasi Sub-model Pengomposan 110
Gambar 5.22 Grafik Simulasi Sub-model Pengomposan Sektor Sisa Sampah Pengomposan 111
Gambar 5.23 Grafik Simulasi Sub-model Gasifikasi 112
Gambar 5.24 Grafik Simulasi Sub-model Gasifikasi Sektor Pembakaran Sampah 112
Gambar 5.25 Grafik Simulasi Sub-model Penyortiran Sampah Plastik 113
Gambar 5.26 Grafik Simulasi Sub-model Sampah Masuk TPA 114
Gambar 5.27 Grafik Simulasi Sub-model Emisi 115
Gambar 5.28 Grafik Jumlah Sampah terhadap Populasi Surabaya 116
Gambar 5.29 Grafik Jumlah Sampah Masuk TPS terhadap Sisa Sampah TPS .. 117
Gambar 5.30 Grafik Sampah Masuk TPA terhadap Jumlah Sampah Surabaya . 117
Gambar 5.31 Uji Parameter Populasi dan Jumlah Sampah Surabaya 121
Gambar 5.32 Uji Parameter Sampah Masuk TPS 3R dan Jumlah Pengangkutan 122
Gambar 5.33 Uji Parameter Sampah Diolah dan Emisi 123
Gambar 5.34 *Extreme Condition Test* Variabel Populasi Surabaya 124
Gambar 5.35 *Extreme Condition Test* Variabel Produksi Sampah Surabaya..... 124
Gambar 5.36 *Extreme Condition Test* Variabel Sampah Masuk TPA Benowo .. 125
Gambar 5.37 Uji Statistik Variabel Populasi Surabaya 128
Gambar 5.38 Uji Statistik Variabel Pembentukan Sampah per Hari 128
Gambar 5.39 Uji Statistik Variabel Sampah Masuk TPS 3R per Hari 128

Gambar 5.40 Uji Statistik Variabel Sisa Sampah TPS 3R 129
Gambar 5.41 Uji Statistik Variabel Sampah Masuk TPA 129
Gambar 6.1 Hasil *Running* Simulasi Skenario 1 133
Gambar 6.2 Hasil *Running* Simulasi Skenario 2 138
Gambar 6.3 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3A 142
Gambar 6.4 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3B 143
Gambar 6.5 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3C 145
Gambar 6.6 Hasil *Running* Simulasi Skenario 4 149
Gambar 6.7 Hasil AHP Skenario Terbaik 156

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Pengolahan Sampah pada TPS 3R Surabaya 4
Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu 16
Tabel 2.2 Sumber Sampah 19
Tabel 2.3 Klasifikasi *Landfill* 23
Tabel 4.1 Data Terkait Pengukuran Nilai Emisi Pengangkutan Sampah 55
Tabel 4.2 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Emisi Pengangkutan Sampah 56
Tabel 4.3 Tetapan Faktor Emisi Pengomposan 59
Tabel 4.4 Tetapan Faktor Emisi CO_2 IPCC 62
Tabel 4.5 Tetapan Faktor Emisi CH_4 IPCC 63
Tabel 4.6 Tetapan Faktor Emisi N_2O IPCC 64
Tabel 4.7 Faktor Oksidasi Emisi CH_4 SWDS 67
Tabel 4.8 DOC untuk setiap Jenis Sampah 67
Tabel 4.9 Faktor Koreksi Metana (MCF) 68
Tabel 4.10 Rekapitulasi Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) TPS 3R ... 70
Tabel 5.1 Rincian Jumlah Penduduk Surabaya 74
Tabel 5.2 Timbulan Sampah Surabaya 75
Tabel 5.3 Rincian Data Pengolahan Sampah TPS 3R Surabaya 77
Tabel 5.4 Data Pengomposan TPS 3R Surabaya 81
Tabel 5.5 Data Gasifikasi TPS 3R Surabaya 83
Tabel 5.6 Data Penyortiran Sampah Plastik TPS 3R Surabaya 85
Tabel 5.7 Identifikasi Variabel Sub-sistem Timbulan Sampah 89
Tabel 5.8 Identifikasi Variabel Sub-sistem Timbunan Sampah di TPS 3R 91
Tabel 5.9 Identifikasi Variabel Sub-sistem Pengangkutan Sampah ke TPS 3R ... 91
Tabel 5.10 Identifikasi Variabel Sub-sistem Penyortiran Sampah Plastik 92
Tabel 5.11 Identifikasi Variabel Sub-sistem Pengomposan 93
Tabel 5.12 Identifikasi Variabel Sub-sistem Gasifikasi 94
Tabel 5.13 Identifikasi Variabel Sub-sistem Sampah Masuk TPA 94
Tabel 5.14 Identifikasi Variabel Sub-sistem Emisi 95
Tabel 5.15 Hasil *Running* Simulasi Sektor Persampahan Kondisi Eksisting per Bulan 118

Tabel 5.16 Hasil *Running* Simulasi Sektor Emisi Kondisi Eksisting per Bulan . 119
Tabel 5.17 *Barlas's Test* Variabel Populasi Surabaya 126
Tabel 5.18 *Barlas's Test* Variabel Pembentukan Sampah per Hari 126
Tabel 5.19 *Barlas's Test* Variabel Sampah Masuk TPS 3R per Hari..... 126
Tabel 5.20 *Barlas's Test* Variabel Sisa Sampah TPS 3R 126
Tabel 5.21 *Barlas's Test* Variabel Sampah Masuk TPA per Hari..... 127
Tabel 6.1 Penentuan Skenario Kebijakan Pengelolaan Sampah di TPS 3R..... 132
Tabel 6.2 Hasil *Running* Simulasi Skenario 1 133
Tabel 6.3 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 1 Sektor Sampah TPS 3R 134
Tabel 6.4 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 1 Sektor TPA dan Emisi 135
Tabel 6.5 Hasil *Running* Simulasi Skenario 2 137
Tabel 6.6 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 2 Sektor Sampah TPS 3R 138
Tabel 6.7 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 2 Sektor TPA dan Emisi 139
Tabel 6.8 Rincian Sub-skenario Ketiga 141
Tabel 6.9 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3A 141
Tabel 6.10 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3B 143
Tabel 6.11 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3C 144
Tabel 6.12 Komparasi Skenario 3 untuk Sektor Persampahan 145
Tabel 6.13 Komparasi Skenario 3 untuk Sektor Emisi 146
Tabel 6.14 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 4 Sektor TPA dan Emisi 147
Tabel 6.15 Hasil *Running* Simulasi Skenario 4 149
Tabel 6.16 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 4 Sektor TPA dan Emisi 150
Tabel 6.17 Komparasi Skenario Kebijakan Sektor Persampahan 151
Tabel 6.18 Komparasi Skenario Kebijakan Sektor Dampak Lingkungan..... 153
Tabel 6.19 Komparasi Urutan Skenario Terbaik 153
Tabel 6.20 Perbandingan Parameter Antar Skenario 155

Tabel 6.21 Skala Saaty 155
Tabel 6.22 Skor Perbandingan Skenario 156

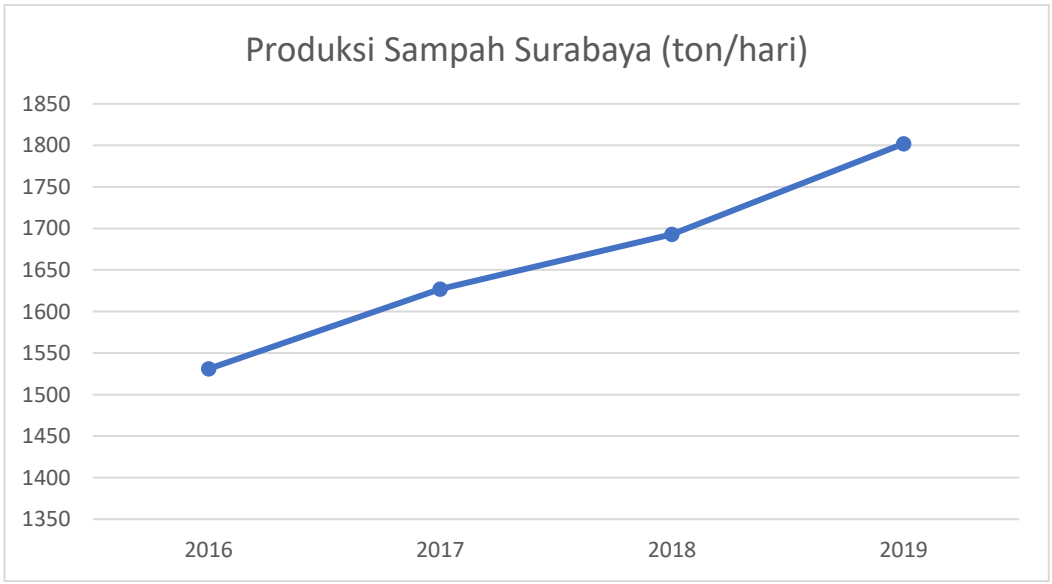
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1
PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai pendahuluan dari penelitian yang dilakukan meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan laporan penelitian.

1.1 Latar Belakang

Surabaya merupakan salah satu kota metropolitan dengan jumlah penduduk mencapai 3,15 juta jiwa (BPS, 2019). Dengan predikat sebagai kota metropolitan, tidak melepaskan Surabaya terhadap permasalahan-permasalahaan dalam manajemen perkotaan seperti sampah. Pada tahun 2019, penduduk Surabaya dapat menghasilkan sekitar 1.800 ton sampah per harinya (DKP Surabaya, 2019) dimana sekitar 79% dari sampah tersebut dihasilkan oleh rumah tangga. Selain itu, di tahun yang sama, pertumbuhan penduduk di Surabaya mencapai 0,49% per tahun (BPS, 2019). Pertumbuhan jumlah penduduk ini memengaruhi jumlah sampah yang ada di Surabaya itu sendiri. Gambar 1.1 berikut merupakan perkembangan jumlah sampah di Surabaya selama empat tahun terakhir.



Gambar 1.1 Jumlah Produksi Sampah di Surabaya
Sumber: (BPS, 2019)

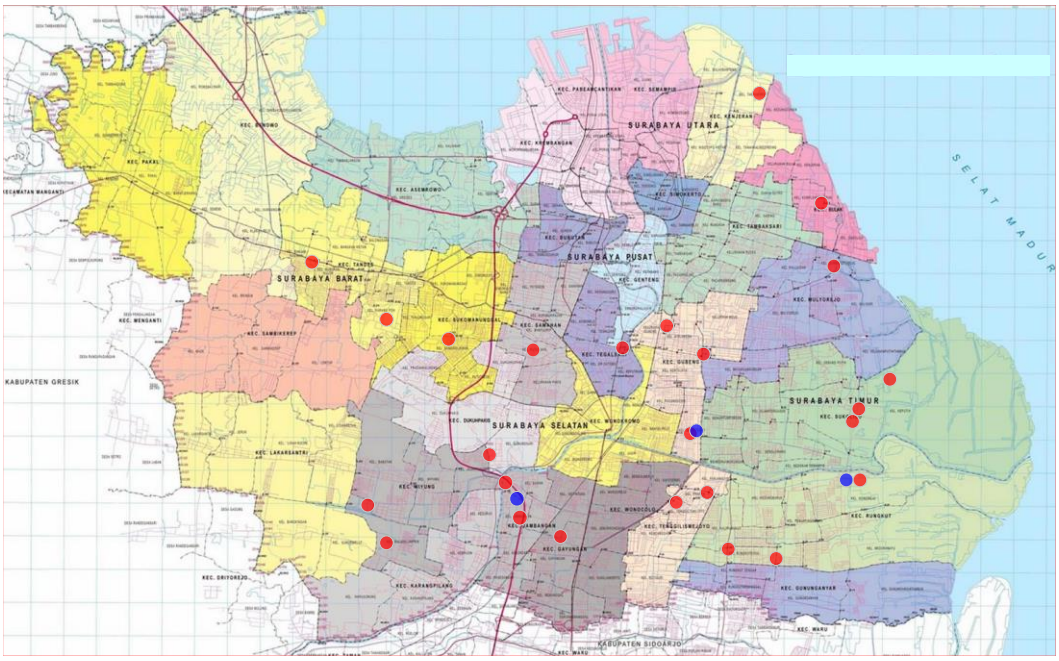
Pada gambar 1.1 tersebut, dapat diketahui bahwa jumlah sampah meningkat setiap tahun. Selanjutnya, dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk di Surabaya setiap tahun, maka dapat diperkirakan akan meningkatkan jumlah timbulan sampah per harinya sehingga permasalah mengenai sampah di Surabaya ini akan semakin besar pula.

Pemerintah Kota Surabaya melalui Peraturan Daerah Kota Surabaya Nomor 1 Tahun 2019 tentang Pengelolaan Sampah dan Kebersihan Kota Surabaya mengatur mengenai pengelolaan sampah dalam rangka mengatasi timbulan sampah di Surabaya. Pengelolaan sampah yang dilakukan oleh Pemerintah Kota Surabaya dibagi ke dalam dua jenis pengolahan yakni pengolahan sampah oleh pemerintah dan pengolahan sampah berbasis masyarakat. Pengolahan sampah oleh pemerintah dilakukan dengan mengolah sampah pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dengan pengelolaan sampah meliputi pengomposan, pembakaran dan pengolahan pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), *landfill*, dan sebagainya. TPA Benowo saat ini menerima sampah sekitar 1.600 ton per harinya dimana kapasitas pengolahan TPA Benowo adalah sekitar 1.400 ton per harinya (DKP Surabaya, 2019). Hal tersebut menunjukkan bahwa TPA Benowo mengalami penumpukan sampah yang berlebih sehingga perlu merekduksi jumlah sampah yang masuk.

Pemerintah Kota Surabaya telah berupaya dalam mengurangi volume sampah yang masuk ke TPA Benowo salah satunya dengan program pengolahan sampah berbasis masyarakat. Pengelolaan sampah berbasis masyarakat tersebut diwujudkan dalam pengelolaan sampah pada Tempat Pengolahan Sampah *Reduce*, *Reuse*, dan *Recycle* (TPS 3R) yang tersebar di beberapa titik di Kota. TPS 3R ini mengolah sampah yang ada pada area sekitar sehingga sampah pada area sekitar TPS 3R tersebut tidak langsung diangkut ke TPA Benowo melainkan akan diolah terlebih dahulu pada TPS 3R melalui beberapa metode pengolahan sampah. Tujuan daripada adanya TPS 3R ini adalah untuk mengurangi volume sampah yang masuk pada TPA Benowo dengan mengolah sampah yang ada pada TPS 3R terlebih dahulu sehingga TPA Benowo hanya akan menerima sampah residu atau sisa pengolahan sampah. Beberapa metode pengolahan sampah pada TPS 3R antara lain pengomposan dengan bahan baku sampah organik seperti daun, kayu, ranting,

kertas, dan sebagainya serta pengelolaan sampah plastik melalui pemilahan dan penjualan sampah plastik ke pengepul.

Surabaya saat ini memiliki 28 TPS 3R yang tersebar di beberapa titik di Surabaya (SIPSN, 2020) dimana pada TPS 3R ini, sampah akan diolah dalam proses pengomposan, gasifikasi, dan pengelolaan sampah plastik. Dari 28 TPS 3R yang dimiliki oleh kota Surabaya, 25 diantaranya hanya melakukan proses pengomposan dan gasifikasi yang disebut juga dengan rumah kompos sedangkan 3 diantaranya dapat melakukan pengolahan sampah meliputi pengomposan, gasifikasi, pemilahan sampah plastik, dan purifikasi air lindi yang disebut juga dengan Pusat Daur Ulang (PDU). Meskipun keseluruhan TPS 3R telah tersebar di beberapa titik di Surabaya, namun TPS 3R tersebut tidak mengakomodasi seluruh area kota. Berikut merupakan peta persebaran TPS 3R di Surabaya.



Gambar 1.2 Peta Persebaran TPS 3R di Surabaya
Sumber: (SIPSN, 2020)

Berdasarkan gambar 1.2, beberapa daerah terutama Surabaya Utara dan Surabaya Barat belum memiliki banyak TPS 3R. Area yang tidak diakomodasi oleh TPS 3R tersebut secara otomatis tidak mendapatkan penganganan sampah oleh TPS 3R sehingga sampah yang terkumpul pada area tersebut langsung dikirimkan ke

TPA Benowo. Hal tersebut akan memengaruhi banyaknya volume sampah yang masuk ke TPA Benowo dimana idealnya volume tersebut dapat dikurangi jika sampah pada area terkait diolah terlebih dahulu pada TPS 3R. Jika keseluruhan area pemukiman di Surabaya dapat dicakup oleh TPS 3R, maka volume sampah yang masuk ke TPA Benowo akan dapat dikurangi. Pada TPS 3R itu sendiri, sampah dipisahkan sesuai dengan jenis sampah yang dapat diolah. Untuk proses pengomposan dan gasifikasi, sampah yang digunakan sebagai bahan dasar adalah sampah organik kering seperti daun, ranting, kertas, dsb. dan untuk pemilahan sampah plastik, jenis sampah yang dipilah umumnya botol plastik. Jenis sampah lain yang tidak dapat diolah oleh TPS 3R akan dipisahkan dan dikirimkan ke TPA Benowo. Berdasarkan data dari Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Surabaya (DKP Surabaya, 2019), setiap TPS 3R di Surabaya rata-rata menerima sampah sebanyak 1,2 ton per harinya. Pada PDU, sampah diolah sebanyak 4,5 ton (45%) dimana sisa sampah sebesar 5,5 ton (55%) berupa sampah yang tidak diolah di PDU. Sedangkan untuk pengolahan sampah pada rumah kompos, sampah diolah sebanyak 2,3 ton (23%) dan sampah tidak diolah sebanyak 7,7 ton (77%) berupa sampah yang tidak dapat diolah pada rumah kompos. Untuk penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada tabel 1.1 berikut.

Tabel 1.1 Pengolahan Sampah pada TPS 3R Surabaya

Pengolahan Sampah pada TPS 3R Surabaya		
Jenis TPS 3R	Pusat Daur Ulang (PDU)	Rumah Kompos
Rata-rata sampah masuk	10,2 ton per hari	
Rata-rata sampah diolah	4,59 ton (45%) per hari	3,26 ton (32%) per hari
Rata-rata sampah tidak diolah	5,61 ton (55%) per hari	6,94 ton (67%) per hari
Aktivitas pengolahan sampah	Pengomposan dan gasifikasi, pemilahan sampah plastik	Pengomposan dan gasifikasi
Jenis sampah diolah	Sampah kering organik (daun, ranting, kertas, kayu lapuk, dsb.), sampah plastik berupa botol	Sampah kering organik (daun, ranting, kertas, kayu lapuk, dsb.)
Jenis sampah tidak diolah (diangkut ke TPA Benowo)	Sampah plastik tidak bernilai jual (kemasan produk, kantung plastik, dsb.) dan sampah lain (karet, logam, kaca, dsb.)	Semua jenis sampah selain sampah yang dapat dikomposkan

Sumber: (DKP Surabaya, 2019)

Pada PDU, sebanyak 55% sampah yang masuk tidak dapat diolah oleh PDU dan 67% sampah tidak diolah oleh rumah kompos dimana sampah tersebut umumnya didominasi sampah organik serta sampah plastik. Sampah-sampah tersebut tidak diolah di PDU ataupun rumah kompos karena keterbatasan kapasitas pengolahan sampah terutama kapasitas pengomposan. Jika kapasitas pengomposan dapat ditambahkan, maka dapat diperkirakan akan mengurangi sampah yang diangkut ke TPA Benowo baik dari PDU ataupun rumah kompos.

Setiap proses penanganan sampah akan dihasilkan residu atau senyawa kimia tertentu yang dapat memengaruhi lingkungan. Menurut Jensen dan Pipatti dalam penelitian Addinsyah dan Herumurti (Addinsyah & Herumurti, 2017) proses pengolahan sampah umumnya menghasilkan gas metan (CH_4) dan juga menghasilkan gas karbon dioksida (CO_2) dimana kedua jenis gas ini merupakan kontributor utama dalam emisi global. Kedua gas tersebut merupakan jenis gas rumah kaca (GRK) dimana kedua gas tersebut dapat meningkatkan suhu di permukaan bumi semakin tinggi (pemanasan global). Selain pengomposan, pemilahan dan penimbunan sampah plastik dengan kurun waktu tertentu juga dapat menghasilkan gas metan. Maka dari itu, perlu dianalisa lebih lanjut mengenai dampak emisi dari proses pengolahan sampah pada TPS 3R dimana pada TPS 3R ini dilakukan proses pengomposan dan penimbunan sampah plastik yang akan menghasilkan residua tau senyawa kimia tertentu. Untuk mengetahui kuantifikasi dampak lingkungan dari fasilitas pengelolaan sampah pada TPS 3R dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Life-Cycle Assessment* (LCA) dimana luaran dari LCA ini akan diketahui nilai emisi yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R. Pengelolaan sampah di TPS 3R sendiri dapat menghasilkan emisi GRK sekitar 2.790 ton CO_2 *equivalent* per tahun dimana didominasi oleh emisi gas CO_2 sebesar 57% (Agustia, 2014). Selain itu, pemerintah melalui Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) menargetkan penurunan emisi GRK sebesar 2,5% pada akhir tahun 2025 untuk sektor pengolahan limbah/sampah (BAPPENAS, 2012). Hal ini menunjukkan bahwa perlu dilakukan pengurangan emisi GRK pada TPS 3R sebagai salah satu sektor pengolahan limbah/sampah untuk mewujudkan target RAN-GRK.

Dalam sistem persampahan Surabaya sendiri melibakan banyak keterkaitan antar entitas yang saling berinteraksi dan memiliki interdependensi antar entitas satu sama lain. Adanya interaksi dan interdependensi tersebut menyebabkan suatu perubahan entitas akan merubah kondisi entitas yang lain. Selanjutnya, interaksi antar entitas dalam sistem persampahan sendiri tidak dapat bereaksi secara instan sehingga melibatkan *delay*/penundaan. Sebagai contoh bahwa peningkatan jumlah timbulan sampah Surabaya tidak dapat secara langsung meningkatkan jumlah sampah di TPS 3R ataupun TPA Benowo melainkan terdapat pengaruh faktor lain seperti pengangkutan sampah dan pewadahan sampah dimana pengangkutan sampah dan pewadahan sampah ini merupakan suatu penundaan atau *delay*. Studi simulasi sistem dinamik dapat melihat interdependensi antar variabel atau entitas dengan memertimbangkan *delay*/penundaan antar entitas tersebut. Studi simulasi ini juga dapat digunakan untuk menganalisa sistem persampahan secara keseluruhan dalam beberapa jangka waktu kedepan. Maka dari itu, untuk menyelesaikan permasalahan dalam sistem persampahan di Surabaya ini digunakan studi simulasi sistem dinamik sebagai teknik pencarian solusi ataupun alternatif kebijakan baru dalam pengolahan sampah di Surabaya kedepannya.

Berdasarkan permasalahan yang dijelaskan sebelumnya, perlu adanya suatu model skenario pengembangan pengolahan sampah di TPS 3R untuk mengurangi jumlah sampah yang masuk pada TPA Benowo sehingga penumpukan sampah di Benowo dapat dikurangi. Penelitian ini dilakukan dengan memodelkan proses pengelolaan sampah di TPS 3R dan kemudian melakukan simulasi menggunakan metodologi sistem dinamik untuk mengetahui bagaimana pengelolaan sampah di TPS 3R dapat menunjang pengelolaan sampah pada TPA Benowo dalam hal pengurangan volume sampah masuk pada TPA Benowo namun tetap dengan memerhatikan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses pengelolaan sampah tersebut sehingga target penurunan emisi GRK dapat tercapai.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan latar belakang dapat diketahui bahwa persebaran TPS 3R di Surabaya belum merata sehingga terdapat beberapa area di Surabaya yang langsung mengirimkan sampahnya ke TPA Benowo tanpa pengolahan pada

TPS 3R terlebih dahulu. Kondisi ini menyebabkan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo semakin banyak dan berdampak pada penumpukan sampah. Selain itu, belum terciptanya kondisi pengelolaan sampah yang efektif pada TPS 3R di Surabaya sehingga masih terdapat banyak jenis sampah yang diangkut dari TPS 3R ke TPA Benowo. Jika sampah terlalu banyak diangkut ke TPA Benowo maka akan semakin terjadi penumpukan pada timbunan sampah sedangkan jika sampah diolah terlebih dahulu pada TPS 3R, maka TPA Benowo hanya akan menerima residu sampah sehingga volume sampah yang masuk ke TPA Benowo dapat dikurangi. Maka dari itu, rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimanakah skenario pengembangan TPS 3R dalam melakukan pengelolaan sampah Surabaya yang efektif sehingga dapat mengurangi volume sampah yang masuk ke TPA Benowo dengan tetap memerhatikan dampak lingkungan yang dihasilkan.

1.3 Tujuan

Berikut adalah tujuan yang akan dicapai terkait analisa dampak lingkungan pengolahan sampah berbasis masyarakat.

1. Mengetahui efektivitas pengolahan sampah yang dilakukan TPS 3R dalam hal reduksi jumlah sampah yang diangkut ke TPA Benowo.
2. Merancang skenario untuk pengembangan TPS 3R dalam konteks jumlah dan penyebarannya, serta kapasitas pengolahan sampah untuk mengurangi volume sampah yang masuk ke TPA Benowo.
3. Mengukur dampak lingkungan dari setiap proses pengolahan dan pengangkutan sampah meliputi emisi yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R.

1.4 Manfaat

Berikut manfaat yang didapatkan dari penelitian analisa dampak lingkungan pengolahan sampah berbasis masyarakat.

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi bagi pemerintah kota Surabaya dalam mengembangkan TPS 3R.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai evaluasi terhadap efektivitas fasilitas pengolahan sampah khususnya TPS 3R di Surabaya.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian tugas akhir ini meliputi dua bagian yakni batasan dan asumsi. Berikut batasan dan asumsi yang digunakan.

1.5.1 Batasan

Berikut adalah batasan dari penelitian yang dilakukan.

1. Objek penelitian yang digunakan hanya pengelolaan sampah pada TPS 3R di Surabaya tanpa memerhatikan proses pengolahan sampah pada TPA Benowo.
2. Pengelolaan sampah yang diamati hanya meliputi proses pengumpulan, pengolahan, dan pengangkutan sampah di TPS 3R Surabaya.
3. Penelitian ini tidak menganalisis dampak biaya yang timbul dari pengelolaan sampah ataupun dari skenario kebijakan yang akan dibuat.

1.5.2 Asumsi

Berikut adalah asumsi dari penelitian yang dilakukan.

1. Tidak ada perubahan pengolahan sampah yang dilakukan TPS 3R Surabaya selama penelitian dilakukan. Perubahan yang dimaksud meliputi jumlah TPS 3R, metode pengolahan, mekanisme pengangkutan dan pengumpulan sampah, hingga jumlah kendaraan pengangkut dan mesin pengolahan sampah yang digunakan.
2. Data dampak lingkungan yang digunakan merupakan data sekunder dari beberapa sumber valid yang relevan dengan penelitian ini.

1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai sistematika penulisan laporan yang terdiri dari 6 bab. Berikut merupakan penjelasan singkat mengenai masing-masing bab dalam penulisan laporan penelitian ini.

BAB 1 PENDAHULUAN

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang dari penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat dari penelitian, ruang lingkup penelitian meliputi batasan dan asumsi, serta sistematika penulisan laporan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai studi literatur yang terkait dengan penelitian sebagai landasan teori dalam metodologi penyelesaian penelitian.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai prosedur pelaksanaan penelitian yang dipaparkan dalam diagram alir guna mempermudah dalam penyampaian informasi terkait prosedur penelitian.

BAB 4 *LIFE CYCLE ASSESSMENT*

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai pengukuran dampak lingkungan yang dihasilkan oleh TPS 3R baik untuk sistem pengangkutan sampah dan sistem pengelolaan sampah dengan menggunakan metode *life cycle assessment* (LCA).

BAB 5 PERANCANGAN MODEL SIMULASI

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai perancangan model simulasi dari kondisi eksisting sistem dimana model simulasi tersebut kemudian akan digunakan sebagai acuan dalam pengembangan skenario kebijakan.

BAB 6 PERANCANGAN ALTERNATIF SKENARIO KEBIJAKAN

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai perancangan skenario kebijakan berupa alternatif-alternatif kebijakan baru yang diuji terhadap model simulasi kondisi eksisting sistem. Pada bab ini juga akan dijelaskan mengenai analisa perbandingan antara hasil *running* model simulasi kondisi eksisting dan hasil *running* model simulasi dari beberapa alternatif skenario untuk kemudian diputuskan alternatif kebijakan skenario terbaik.

BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan sesuai dengan tujuan penelitian. Selain itu, dijelaskan

pula mengenai saran yang diberikan baik kepada objek penelitian ataupun kepada peneliti selanjutnya.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai tinjauan pustaka sebagai landasan teori dalam penelitian ini.

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian mengenai simulasi sistem dinamik pada sektor persampahan telah cukup banyak dilakukan dimana umumnya berfokus pada pengurangan penumpukan sampah. Perbedaan paling menonjol dari penelitian yang sudah ada umumnya meliputi sistem yang diamati dan ruang lingkup penelitian. Banyak peneliti yang telah melakukan uji simulasi sistem dinamik pada TPA di berbagai kota di Indonesia dengan fokusan yang sama yakni pengurangan penumpukan sampah. Surjandari, Hidayanto, & Supriatna (2009) melakukan penelitian mengenai sistem persampahan di TPA Bantar Gebang. Tujuan penelitian yang digunakan adalah untuk mengurangi beban penumpukan pada TPA Bantar Gebang dimana hal tersebut dilatarbelakangi oleh ketimpangan antara jumlah sampah yang dapat diolah oleh TPA Bantar Gebang dan jumlah sampah yang masuk di TPA tersebut. Ketimpangan ini menyebabkan banyak sampah yang masuk ke TPA Bantar Gebang tidak diolah dan terjadi penumpukan. Surjandari, Hidayanto, & Supriatna (2009) mengembangkan beberapa model mengenai skenario pengolahan sampah dengan berbagai metode seperti pengomposan, daur ulang, insinerasi, serta kombinasi antar ketiga metode tersebut. Dari pengembangan model tersebut kemudian dapat diketahui metode mana yang dapat mengurangi penumpukan sampah terbesar. Hasil skenario tersebut kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk diperhitungkan faktor sosial dan ekonomi sehingga dapat disimpulkan skenario mana yang memberikan hasil paling sesuai dengan kondisi yang diharapkan. Kelebihan dari penelitian ini yakni skenario yang diusulkan cukup representatif karena melibatkan faktor sosial dan ekonomi pula. Disisi lain, penelitian ini tidak mengakomodasi dampak lingkungan yang ada sehingga skenario yang dapat berdampak lingkungan seperti penambahan kapasitas insinerasi yang relatif besar tetap dipertimbangkan.

Selain itu, penelitian ini hanya melihat jumlah sampah yang masuk dengan tidak memerhatikan dinamika timbulan sampah di Jakarta.

An, Cahya, & Fudhla (2013) melakukan penelitian mengenai potensi utilisasi pengolahan sampah pada TPA Benowo dengan tujuan untuk mengoptimalkan pengolahan sampah dan mengurangi penumpukan. Penelitian ini mengembangkan model pengolahan sampah di TPA Benowo dengan memisah pengolahan sampah berdasarkan kategori jenis sampah yakni pengolahan sampah organik dan anorganik. Dengan model tersebut, An, Cahya, & Fudhla (2013) mengemukakan bahwa setiap pengolahan sampah yang ada di TPA Benowo menghasilkan gas metana (CH_4) yang relatif besar namun tidak dimanfaatkan dengan baik. An, Cahya, & Fudhla melihat gas metana tersebut sebagai potensi pengganti sumber energi fosil yang bersifat tidak terbarukan. Kelebihan dari penelitian ini adalah peneliti telah memerhitungkan aspek dampak lingkungan dalam skenario yang diusulkan dengan mengidentifikasi kuantitas gas metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), nitrogen (N_2), hidrogen (H_2), dan hidrogen sulfida (H_2S) yang dihasilkan. Namun sebaliknya, penelitian ini hanya berfokus pada potensi pemanfaatan gas metana (CH_4) yang dihasilkan dan tidak memberikan skenario secara spesifik mengenai pengurangan penumpukan sampah di TPA Benowo serta analisis dampak lingkungan yang dilakukan tidak menggunakan metode spesifik hanya berdasarkan luaran yang dihasilkan oleh simulasi. Selain itu, kekurangan penelitian ini adalah model yang dibuat hanya berfokus pada TPA Benowo tanpa memerhatikan sumber dan timbulan sampah serta proses pengangkutan sampah.

Sasongko (2008) melakukan penelitian mengenai simulasi sistem dinamik pada pengolahan sampah di Kota Semarang yakni di TPA Jatibarang dengan tujuan untuk mengurangi penumpukan pada TPA tersebut. Penelitian ini dilatarbelakangi kapasitas TPA Jatibarang yang hanya sebesar 2485 m^3/hari tidak dapat mengakomodasi produksi sampah di Kota Semarang yakni sebanyak 3500 m^3/hari. Sasongko (2008) kemudian memodelkan sistem persampahan pada TPA Jatibarang untuk setiap metode pengolahan sampah yang dilakukan sehingga dapat dianalisis lebih lanjut mengenai sistem persampahan terkait. Penelitian ini lebih berfokus pada penambahan fasilitas pengolahan sampah seperti penambahan kapasitas pengomposan dan penambahan kapasitas untuk *landfill*. Hasil yang didapatkan

adalah pengurangan sampah organik seiring dengan peningkatan kapasitas pengomposan. Selain itu, terdapat peningkatan pada hasil biogas berupa gas metana (CH_4) yang dihasilkan seiring dengan peningkatan kapasitas *landfill*. Kelebihan dari penelitian ini adalah model yang dibuat telah meliputi keseluruhan sistem persampahan kota yakni meliputi timbulan dan timbunan sampah, pengangkutan, hingga pengolahan. Namun, kekurangan dari penelitian ini adalah kurangnya memerhitungkan aspek lingkungan. Dalam skenario penambahan kapasitas *landfill*, seharusnya juga diperhitungkan mengenai senyawa lain yang mungkin dihasilkan seperti gas rumah kaca, gas penipisan lapisan ozon, hingga gas penyebab pengasaman/asidifikasi. Penambahan kapasitas *landfill* memang dapat meningkatkan hasil gas metana (CH_4) yang dapat dimanfaatkan sebagai biogas, namun juga dapat memberikan dampak lingkungan seperti peningkatan pemanasan global hingga penipisan lapisan ozon sehingga skenario yang diberikan seharusnya lebih memertimbangkan beberapa aspek tidak hanya berfokus pada pengurangan penumpukan.

Abraham (2017) melakukan penelitian mengenai sistem persampahan *reuse, reduce,* dan *recycling* (3R) di Kota Bogor yang dilatarbelakangi oleh kurangnya kemampuan Kota Bogor dalam mengolah 100% sampah yang ditimbulkan di kota tersebut. Di Kota Bogor sendiri, sampah yang diolah hanya sebanyak 72,07%. Tujuan dari penelitian yang dilakukan Abraham (2017) adalah dengan mengembangkan pengolahan sampah berbasis 3R dengan simulasi sistem dinamik untuk meningkatkan kemampuan pengolahan sampah di Kota Bogor. Skenario yang diusulkan oleh penelitian ini adalah dengan berfokus pada pengembangan pengolahan sampah 3R dengan penambahan unit bank sampah. Dari skenario ini, sampah yang dapat diolah oleh Kota Bogor dapat mencapai 100% dengan mengoptimalkan bank sampah sehingga tidak semua sampah akan diteruskan ke TPA. Kelebihan dari penelitian ini adalah bahwa peneliti telah mampu menunjukkan secara spesifik bahwa pengolahan sampah berbasis 3R dapat meningkatkan pelayanan pengolahan sampah Kota Bogor hingga 100%. Penjelasan mengenai skenario yang diterapkan telah mencakup proses pengolahan dan pengangkutan sampah sehingga hasil yang dicapai dapat representatif. Selain itu, penelitian ini juga memerhatikan aspek ekonomi yakni dengan memertimbangkan

anggaran biaya dari pengolahan sampah di Kota Bogor itu sendiri. Namun, penelitian ini kurang dapat menjelaskan bagaimana skenario penambahan bank sampah yang dilakukan seperti mekanisme penambahan, lokasi penyebaran, aspek lingkungan, dan sebagainya sehingga selanjutnya dapat dilakukan penelitian lebih lanjut yang lebih komprehensif dengan memerhatikan hal tersebut.

Agustia (2014) melakukan pengembangan model sistem dinamis dalam sistem pengelolaan sampah pada Kecamatan Gubeng, Kota Surabaya. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kemampuan reduksi sampah di Kecamatan Gubeng yang relatif kecil yakni hanya 5,17% dimana target yang ditentukan oleh Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Surabaya adalah sebesar 20% pada tahun 2020. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan reduksi sampah sehingga target yang ditetapkan oleh DKP Kota Surabaya dapat tercapai. Peneliti mengusulkan tiga jenis skenario yakni skenario peningkatan daur ulang, skenario peningkatan bank sampah, dan skenario pengalihan proses pengolahan sampah pada TPA Benowo. Pada penelitian ini juga diperhitungkan dampak lingkungan yang dihasilkan berupa perhitungan nilai emisi yang dilepaskan oleh setiap proses pengolahan sampah dengan menggunakan formulasi dari Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Nilai emisi yang diidentifikasi berupa emisi karbon dioksida (CO_2) dan emisi gas metana (CH_4) dimana kedua gas tersebut merupakan unsur gas rumah kaca yang dapat menyebabkan peningkatan pemanasan global. Dari simulasi yang dilakukan, skenario terbaik yang dapat diterapkan pada pengelolaan sampah di Kecamatan Gubeng adalah skenario peningkatan daur ulang dimana pada skenario ini, sampah akan lebih banyak dikirimkan ke Pusat Daur Ulang (PDU) untuk diolah terlebih dahulu. Pada skenario ini, reduksi sampah yang dihasilkan meningkat sebesar 6,22% sehingga total reduksi sampah yang dapat dilakukan oleh Kecamatan Gubeng adalah sebesar 11,39%. Meskipun tidak mencapai target yang ditetapkan oleh DKP Surabaya, namun peningkatan ini dapat mengurangi timbunan sampah yang relatif besar pada beberapa Tempat Pembuangan Sementara (TPS) di Kecamatan Gubeng. Selain peningkatan reduksi sampah, pada skenario ini juga berhasil mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 4,52% dari kondisi awal. Kelebihan dari penelitian ini adalah telah memodelkan pengelolaan sampah secara komprehensif hingga meliputi proses pengolahan sampah oleh pemulung serta telah

memerhitungkan timbulan dan pengangkutan sampah. Namun, dampak lingkungan yang diperhatikan pada penelitian ini hanya sebatas emisi gas rumah kaca (GRK) dan hanya meliputi gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) tanpa memerhitungkan dampak lingkungan lain. Maka dari itu, selanjutnya dapat dikembangkan penelitian lain yang juga memerhatikan dampak lingkungan lain seperti penipisan lapisan ozon, asidifikasi, eutrofikasi, dan sebagainya.

Berdasarkan pemaparan penelitian terdahulu yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa belum adanya penelitian mengenai dinamika pengolahan sampah dengan menganalisis dampak lingkungan secara komprehensif dimana dampak lingkungan yang diperhatikan tidak hanya emisi gas rumah kaca namun juga emisi lain yang mungkin timbul. Maka dari itu, penulis melakukan penelitian mengenai studi simulasi sistem dinamik pada pengolahan sampah di TPS 3R dengan memertimbangkan dampak lingkungan yang dihasilkan. Metodologi sistem dinamik digunakan untuk mengetahui dinamika kuantitas sampah pada sistem TPS 3R meliputi pewadahan, pengangkutan, dan pengolahan sampah. Dampak lingkungan diukur menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk diketahui potensi yang dapat terjadi akibat proses yang dilakukan oleh TPS 3R tersebut. beberapa dampak lingkungan yang akan diamati meliputi pemanasan global, penipisan lapisan ozon, asidifikasi, dan sebagainya. Sebagai penjelasan pendukung, berikut merupakan komparasi antar penelitian terdahulu yang akan dijelaskan pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Tujuan Penelitian	Metode				Output			
			Reduksi Sampah		Perhitungan Emisi		Reduksi Penumpukan Sampah	Minimasi Biaya	Skenario Pengembangan Fasilitas	Pengukuran Emisi
			Sistem Dinamik	AHP	IPCC Formulation	LCA				
1	Surjandari, Hidayanto, Supriatna (2009)	Mengurangi beban penumpukan sampah pada TPA Bantar Gebang	✓	✓			✓	✓		
2	An, Cahya, Fudhla (2013)	Peningkatan potensi pengolahan sampah di TPA Benowo	✓				✓		✓	✓
3	Sasongko (2008)	Mengurangi penumpukan sampah pada TPA Jatibarang	✓				✓			
4	Abraham (2017)	Pengembangan skenario pengelolaan sampah berbasis 3R	✓				✓		✓	
5	Agustia (2014)	Peningkatan kemampuan reduksi sampah dan pengurangan emisi gas rumah kaca	✓		✓		✓			✓
6	Febrilianto (2020)	Pengembangan skenario pengolahan sampah berbasis 3R dengan memerhatikan dampak lingkungan	✓			✓	✓		✓	✓

Berdasarkan pemaparan perbandingan penelitian terdahulu pada tabel 2.1, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai reduksi sampah dan analisis dampak lingkungan telah dilakukan oleh beberapa penulis namun analisis dampak lingkungan yang dilakukan umumnya hanya menggunakan formulasi perhitungan emisi secara manual sehingga tingkat akurasi nilai emisi yang didapatkan pun kurang. Selain itu, penelitian terdahulu umumnya hanya menganalisis emisi gas rumah kaca (GRK) seperti gas metan (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) tanpa memerhitungkan emisi lain yang mungkin timbul seperti penipisan lapisan ozon, asidifikasi, hingga eutrofikasi secara komprehensif. Faktanya, penelitian yang menganasilis reduksi sampah dan dampak lingkungan secara komprehensif masih jarang dilakukan. Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian mengenai reduksi sampah dengan menggunakan metodologi sistem dinamik dengan analisis dampak lingkungan menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA) pada TPS 3R agar dapat menganalisis dampak lingkungan yang dilepaskan oleh TPS 3R secara komprehensif.

2.2 Persampahan

Menurut *World Health Organization* (WHO, 2017) mendefinisikan sampah sebagai sesuatu yang tidak digunakan, tidak diperlukan, atau sesuatu yang dibuang dimana berasal dari dari kegiatan manusia dan tidak terjadi secara alamiah. Selain itu, menurut SNI 19-2545-2002 (BSNI, 2002) menjelaskan bahwa sampah adalah limbah yang bersifat padat dimana terdiri dari bahan organik dan non-organik yang dianggap tidak memiliki nilai guna dan harus dikelola sehingga tidak membahayakan lingkungan. Definisi sampah tersebut menunjukkan bahwa di Indonesia, sampah harus dikelola untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan potensi negatif yang timbul akibat sampah tersebut. Sampah sendiri dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis bergantung pada perspektif pengklasifikasian sampah tersebut baik dari segi jenis sampah hingga sumber timbulan sampah. Selain itu, sampah dapat menimbulkan potensi negatif maupun potensi positif. Potensi negatif yang signifikan dari adanya sampah adalah pencemaran lingkungan berubah pencemaran udara, tanah, dan air, sedangkan potensi positif dari adanya sampah adalah potensi pemanfaatan sampah menjadi

sesuatu yang berguna dengan prinsip 3R (*reuse, reduce, recycle*). Beberapa potensi positif yang mungkin timbul antara lain pemanfaatan sampah sebagai pembangkit listrik, pupuk kompos, dan sebagainya. Potensi yang timbul baik negatif ataupun positif dari adanya sampah tersebut dipengaruhi oleh jenis sampah yang ada (Chandra, 2006).

2.2.1 Jenis Sampah

Sampah sendiri dapat diklasifikasikan berdasarkan jenisnya yakni sampah organik dan sampah non-organik (Sucipto, 2012) dengan penjelasan sebagai berikut.

- Sampah Organik

Sampah organik merupakan sampah yang dapat mengalami proses dekomposisi dan terurai secara alami dalam kurung waktu tertentu menjadi substansi yang bersifat lebih kecil dan tidak menimbulkan bau. Pada dasarnya, sampah organik ini berasal dari limbah makhluk hidup dan sampah organik adalah sampah yang mengangung senyawa organik seperti Karbon (C), Hidrogen (H), Oksigen (O), Nitrogen (N) dan umumnya dapat terurai menjadi karbon dioksida (CO_2), gas metana (CH_4) dan molekul organik lainnya. Terdapat dua jenis sampah organik yakni (1) *wet organic waste* – sampah organik yang memiliki kandungan air relatif tinggi seperti sisa makanan, limbah sayur dan buah, dan sebagainya, serta (2) *dry organic waste* – sampah organik yang memiliki kandungan air relatif sedikit seperti sampah pepohonan (daun, kayu, ranting), kertas, kain, dan sebagainya.

- Sampah Non-organik

Sampah non-organik merupakan sampah yang relatif sulit mengalami proses dekomposisi secara alami sehingga sampah tersebut akan memakan waktu lama untuk terurai. Umumnya sampah non-organik berasal dari sumber daya alam yang tidak terbarukan seperti mineral hingga limbah industri. Sampah non-organik sendiri diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan sumbernya yakni (1) *mineral waste* yaitu sampah non-organik yang berasal dari pengolahan mineral seperti logam, kaca, dan sebagainya, serta (2) *industrial process* yaitu sampah non-organik yang berasal dari limbah industri seperti plastik, alat elektronik, dan sebagainya.

2.2.2 Sumber Sampah

Sampah umumnya dihasilkan dari aktivitas manusia yang berkaitan dengan tata guna lahan suatu wilayah seperti pemukiman, pertokoan, area industri, dan sebagainya (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Pada buku yang sama, Tchobanoglous dan Kreith (2002) mengklasifikasikan sumber sampah menjadi beberapa sumber seperti pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.2 Sumber Sampah

Sumber Sampah	**Fasilitas, aktivitas, lokasi sampah**	**Tipe Sampah**
Rumah tangga (*household*/*residence*)	Keluarga kecil atau keluarga tinggal bersama, apartemen, perumahan, dan sebagainya.	Organik: sampah makanan, kertas, kardus, kayu, daun, kain, kulit Non-organik: plastik, kaca, logam, sampah elektronik
Komersil (*commercial*)	Toko, restoran, pasar, kantor, hotel, kantor pelayanan, dan sebagainya.	Kertas, kardus, plastik, kayu, sampah makanan, kaca, logam, dsb.
Institusi (*institutional*)	Sekolah, rumah sakit, penjara, pusat pelayanan pemerintahan, dan sebagainya.	Sama seperti sampah komersil
Konstruksi (*construction*)	Area konstruksi bangunan, industri manufaktur, dan sebagainya.	Kayu, baja, beton, plastik, bahan kimia, dsb.
Pengolahan sampah kota (*municipal service*)	Pembersihan jalan, saluran air, ruang terbuka hijau, dan sebagainya	Plastik, daun, ranting, kayu, dsb.

Sumber: (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

Selain itu, di Indonesia timbulan sampah umumnya dihasilkan oleh beberapa sumber sebagai berikut (Chandra, 2006).

1. Sampah rumah tangga – merupakan sampah yang dihasilkan oleh aktivitas pemukiman penduduk seperti kompleks perumahan, apartemen, dan sebagainya. Sampah yang dihasilkan dari aktivitas rumah tangga ini sangat beragam dan hampir meliputi seluruh jenis sampah.

2. Sampah kantor – merupakan sampah yang dihasilkan dari aktivitas perkantoran. Umumnya jenis sampah yang dihasilkan didominasi oleh kertas, kardus, dan plastik.
3. Sampah pasar tradisional – merupakan sampah yang ditimbulkan oleh adanya aktivitas perdagangan pasar. Sampah yang dihasilkan berupa makanan basah, sayur dan buah, serta bahan makanan lain.
4. Sampah pusat perniagaan – merupakan sampah yang ditimbulkan oleh adanya pusat perbelanjaan atau pusat perdagangan. Sampah yang dihasilkan relatif beragam dari bahan makanan hingga sampak non-organik seperti plastik.
5. Sampah fasilitas publik – merupakan sampah yang ditimbulkan oleh adanya fasilitas pelayanan masyarakat oleh pemerintah seperti rumah sakit, puskesmas, sekolah, dan sebagainya. Sampah yang dihasilkan berbeda-beda bergantung pada jenis fasilitas pelayanan yang ada.
6. Sampah kawasan – merupakan sampah yang ditimbulkan oleh adanya suatu distrik/kawasan bisnis tertentu dimana umumnya adalah kawasan industri. Sampah jenis ini umumnya memiliki kuantitas yang relatif besar dan merupakan sampah sisa pengolahan industri hingga sampah bahan kimia.
7. Timbulan sampah lain – merupakan sampah yang dihasilkan dari aktivitas lain seperti pertanian, perkebunan, konstruksi, pertambangan, dan sebagainya.

Kemudian, Kementerian Pekerjaan Umum (2010) juga menjelaskan bahwa sampah perkotaan dapat dikategorikan dalam empat kelompok utama sebagai berikut.

1. Sampah rumah tangga – merupakan sampah yang dihasilkan oleh aktivitas rumah tangga dan pemukiman. Umumnya sampah yang bersumber dari rumah tangga memiliki jenis sampah yang beragam termasuk organik dan non-organik.
2. Sampah sejenis rumah tangga – merupakan sampah yang memiliki karakteristik jenis sampah seperti sampah rumah tangga namun dihasilkan bukan dari rumah tangga melainkan dari fasilitas umum seperti pasar, jalan raya, tempat ibadah, dan sebagainya.

3. Sampah komersil – merupakan sampah yang dihasilkan oleh aktivitas komersial seperti restoran, pusat perbelanjaan, hotel, dan sebagainya. Jenis sampah terbesar yang dihasilkan sumber sampah ini umumnya adalah sampah organik berupa sisa makanan.
4. Sampah spesifik – merupakan sumber sampah yang menghasilkan jenis sampah tertentu dan mungkin membutuhkan perlakuan khusus terhadap sampah terkait. Sumber sampah dalam kategori ini umumnya adalah rumah sakit, konstruksi, pertambangan, dan sebagainya.

2.2.3 Pengelolaan Sampah

Pengelolaan sampah adalah kegiatan yang dilakukan untuk mengolah sampah dari awal sampah tersebut timbul hingga ke tempat pembuangan akhir (TPA) (Chandra, 2006). Pengelolaan sampah sendiri meliputi pengendalian timbulan sampah, pengumpulan sampah, pengangkutan, pengolahan dan pembuangan akhir. Umumnya sampah dikelola dalam tiga tahapan yakni tahap pengumpulan, tahap pengangkutan, dan tahap pemusnahan (Chandra, 2006) dengan rincian sebagai berikut.

1. Tahap pengumpulan dan penyimpanan

Tahap ini umumnya adalah tahapan pengumpulan sampah dari tempat sampah pada area sumber sampah tertentu untuk kemudian dikumpulkan dalam tempat pembuangan sementara.

2. Tahap pengangkutan

Tahap ini merupakan proses pemindahan sampah dari tempat pembuangan sementara menuju tempat pembuangan akhir atau tempat pengolahan sampah lain bergantung pada kebijakan masing-masing pemerintahan.

3. Tahap pemusnahan atau pengolahan

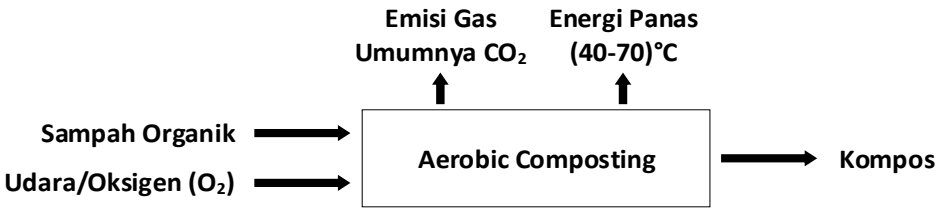
Tahap ini dilakukan di tempat pembuangan akhir atau tempat pengolahan sampah khusus dimana pada tahap ini, sampah akan diproses secara fisik, kimia, maupun biologis. Perlakuan pada tahapan ini berbeda-beda untuk setiap jenis sampah karena karakteristik sampah yang berbeda-beda pula. Beberapa proses pemusnahan dan pengolahan sampah menurut Hoornweg dan Bhada-Tata (2012) dijelaskan sebagai berikut.

- Daur ulang (*recycle*)

  Prinsip dasar dari proses daur ulang adalah dengan mengurangi kuantitas sampah yang akan dibuang (*dumping*) dengan mengembalikan fungsi material sampah dalam suatu nilai ekonomis tertentu. Tujuan dari daur ulang ini adalah untuk meminimasi emisi gas rumah kaca (GRK) akibat pembuangan (*dumping*). Elagroudy, *et al* (2016) menambahkan bahwa sistem daur ulang yang baik membutuhkan pertimbangan yang baik dalam menentukan biaya dari proses daur ulang tersebut serta potensi pasar dari produk daur ulang yang mungkin akan dijual. Salah satu contoh dasar dalam proses daur ulang sampah adalah mengubah sampah plastik menjadi bijih plastik yang dapat dipasarkan kembali.

- Pengomposan secara aerobik

  Pengomposan merupakan sebuah proses pengolahan sampah organik (umumnya daun dan kertas) menjadi pupuk kompos. Proses ini melibatkan bakteri mikroba untuk melakukan fermentasi terhadap sampah organik dengan bantuan oksigen dan uap air sehingga sampah terurai menjadi karbon dioksida (CO_2) dan padatan pupuk kompos. Proses pengomposan yang paling umum dilakukan adalah dengan metode aerobik yakni dengan melibatkan oksigen (O_2). Pengomposan secara aerobik ini bertujuan agar ketika proses fermentasi terjadi, sampah tidak menghasilkan gas metana (CH_4) yang dapat mencemari lingkungan. Secara umum, proses pengomposan secara aerobik seperti pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Proses Pengomposan Aerobik
Sumber: (Lin, et al, 2018)

Produk hasil pengomposan yakni padatan pupuk kompos memiliki nilai ekonomis dan dapat dijual kembali. Elagroudy, *et al* (2016) menambahkan

bahwa pengolahan sampah dengan metode pengomposan ini dapat mengurangi sampah organik yang relatif banyak dan mengurangi potensi adanya polusi udara akibat sampah organik tersebut, menghancurkan patogen (parasit) dengan menghasilkan produk yang dapat diperdagangkan.

- *Incineration* (pembakaran)

  Pembakaran sampah atau insinerasi merupakan pengelolaan sampah yang paling efektif dimana proses ini dapat mengurangi sampah hingga 90%. Proses insinerasi ini dapat dilakukan untuk hampir seluruh jenis sampah baik organik maupu non-organik. Perlakuan yang dilakukan cukup sederhana yakni mengumpulkan sampah dalam satu area tertentu dan dilakukan pembakaran hingga menjadi abu. Namun disamping tingkat efektivitas yang tinggi, proses insinerasi ini menghasilkan polusi yang relatif besar dimana umumnya emisi terbesar yang dihasilkan adalah emisi karbon. Proses insinerasi pada area terbuka (*open-burning incineration*) sangat tidak dianjurkan karena akan menghasilkan polusi udara yang relatif besar meskipun dengan pembakaran suhu rendah sekalipun.

- *Landfill*

  Landfill merupakan salah satu metode pemusnahan sampah dengan cara menimbun sampah dengan tanah yang dilakukan selapis demi selapis. Dengan penimbunan tersebut, sampah akan terurai dengan bantuan mikroorganisme di dalam tanah sehingga sampah akan lebih cepat terurai dan tidak lagi menimbulkan polusi, parasit dan patogen, ataupun bau. Proses *landfill* sendiri umumnya menghasilkan *landfill gasses* (LFG) berupa gas metana (CH_4) yang dapat mencemari udara jika gas tersebut tidak dikelola. Hoornweg dan Bhada-Tata (2012) mengklasifikasikan *landfill* ke dalam empat jenis seperti ditampilkan dalam tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.3 Klasifikasi *Landfill*

Jenis *Landfill*	Operasional	Pengolahan Air Lindi	Pengolahan LFG
Semi-controlled dumps	Penempatan sampah yang tidak sepenuhnya diatur; tidak ada analisis pengukuran terhadap sampah	Tidak ada pemilahan terhadap sampah yang mungkin terkontaminasi	Tidak ada pengolahan LFG

Tabel 2.3 Klasifikasi *Landfill* (Lanjutan)

Jenis Landfill	Operasional	Pengolahan Air Lindi	Pengolahan LFG
Controlled dumps	Penempatan sampah secara teratur; pemantauan air lindi yang dihasilkan; tidak ada analisis pengukuran terhadap sampah	Tidak ada pemilahan terhadap sampah yang mungkin terkontaminasi	Tidak ada pengolahan LFG
Controlled landfill	Penempatan sampah secara teratur; lapisan sampah ditutup secara rutin; pemantauan air lindi yang dihasilkan	Pengurangan jumlah air lindi yang dihasilkan dengan memberi penutup berupa tanah pada *landfill*	LFG dialirkan pada satu ventilasi tertentu namun secara pasif (ventilasi hanya berfungsi untuk mengalirkan LFG)
Sanitary landfill	Penempatan sampah secara teratur; lapisan sampah ditutup secara rutin; pengukuran lapisan penutup sampah secara tepat; pemantauan air lindi yang dihasilkan	Pengolahan air lindi secara biologis, fisik, dan kimia	LFG dialirkan untuk proses pembuatan energi lain (misal: energi listrik)

Sumber: (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012)

2.2.4 *Sustainable Solid Waste Management* (SSWM)

El-Haggar (2007) menjelaskan bahwa *sustainable solid waste management* (SSWM) merupakan sebuah konsep pengelolaan sampah yang melibatkan satu jenis atau kombinasi dari beberapa jenis metode pengelolaan sampah yang bertujuan untuk melestarikan sumber daya alam dengan mengurangi dampak lingkungan dari metode pengelolaan sampah terkait, umumnya konsep yang digunakan dalam SSWM adalah mengurangi sampah (*reduce*), pemakaian kembali (*reuse*), dan daur ulang sampah (*recycle*) atau lebih dikenal dengan metode 3R. Selain itu, Elagroudy, *et al* (2016) juga menjelaskan bahwa SSWM merupakan salah satu konsep *green economy* dimana berfokus pada pengolahan limbah padat yang menghasilkan emisi karbon dan zat berbahaya lainnya seminimal mungkin dengan tujuan untuk menghindari kerusakan lingkungan dan ancaman terhadap kesehatan manusia. Secara keseluruhan, SSWM merupakan sebuah konsep pengolahan sampah atau limbah padat yang menghasilkan emisi dan dampak lingkungan seminim mungkin untuk menghindari kerusakan lingkungan dan kesehatan manusia. Beberapa manfaat dari penerapan SSWM menurut Elagroudy, *et al* (2016) adalah sebagai berikut.

- *Public health* (kesehatan masyarakat) – dengan penerapan SSWM, maka pencemaran tanah dapat sangat diminimasi sehingga masyarakat lebih memungkinkan untuk mendapatkan akses air yang lebih bersih serta lingkungan pemukiman yang lebih bersih pula. Hal ini kemudian dapat menurunkan tingkat mortalitas seluruh komunitas di dalamnya.
- *Air quality* (kualitas udara) – penerapan SSWM tidak menerapkan proses penanganan sampah yang dapat menghasilkan emisi karbon dan gas lain sehingga pencemaran udara dapat dikurangi.
- *Poverty reduction* (pengurangan kemiskinan) – di beberapa negara berkembang, sangat umum ditemui komunitas yang mengumpulkan sampah (pemulung) dengan tujuan untuk dijual kembali. Penerapan SSWM seperti *sanitary landfill* akan menjamin pengurangan emisi terhadap lingkungan sehingga pemulung dapat melakukan pekerjaan mereka dengan ancaman penyakit yang berkurang. Hal tersebut akan meningkatkan taraf ekonomi kehidupan pemulung dengan mengurangi kemungkinan adanya penyakit.
- *Social justice* (keadilan sosial) – penanganan sampah secara umum merupakan hal yang dapat dilihat oleh masyarakat secara langsung. Penerapan konsep SSWM yang mengimbangi antara penanganan sampah yang baik, efisiensi biaya, dan pertimbangan dampak lingkungan akan menimbulkan kepercayaan dari masyarakat terhadap pemerintahan dalam penanganan kesehatan masyarakat.

Selanjutnya, Elagroudy, *et al* (2016) menambahkan bahwa SSWM berkontribusi terhadap tiga pilar dalam sebuah komunitas bermasyarakat yakni ekonomi, sosial, dan lingkungan yang berkelanjutan. Secara umum, UNEP (2009) menggambarkan bahwa konsekuensi yang didapatkan dalam penerapan SSWM dijelaskan pada gambar 2.2 berikut.

Gambar 2.2 Gambaran Penerapan SSWM
Sumber: (UNEP, 2009)

Berdasarkan gambar 2.2, beberapa metode dalam konsep SSWM yang dapat diterapkan antara lain seperti mengolah residu sampah, mengubah sampah menjadi energi tertentu, daur ulang sampah, penggunaan kembali sampah ataupun material tak terpakai, hingga pencegahan adanya timbulan sampah baru. Konsekuensi dari penerapan ini antara lain seperti peningkatan kesehatan dan keamanan sosial, perlindungan terhadap kerusakan lingkungan, emisi karbon yang rendah, hingga peningkatan ekonomi berkelanjutan.

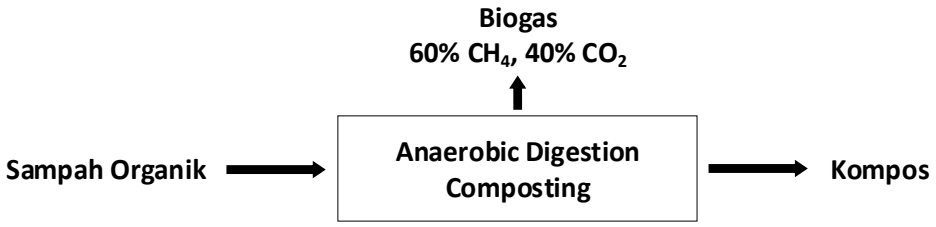
Elagroudy, *et al* (2016) kemudian menjelaskan bahwa terdapat lima metode pengelolaan sampah yang dapat dilakukan dalam konsep SSWM meliputi pengurangan sampah (*waste reduction*), pemakaian kembali dan daur ulang (*reuse* & *recycling*), pengolahan sampah menjadi energi (*energy recovery*), *zero waste treatment*, dan pengolahan residu sampah (*residual waste management*).

- Pengurangan sampah (*waste reduction*) – metode ini melibatkan pemangku jabatan pemerintahan untuk memberikan suatu kebijakan tertentu dalam pengurangan timbulan sampah. Pengurangan timbulan sampah dilakukan pada fase pra-konsumsi dimana dapat dicapai dengan mengoptimalkan penggunaan bahan baku sehingga limbah (*scrap* atau *waste*) dapat sangat diminimasi. Metode pengurangan sampah ini umumnya diterapkan dalam

konsep "*zero waste*" dimana konsep ini mengoptimalkan desain suatu produk beserta proses produksinya agar menghindari adanya sampah yang dihasilkan. Apabila sampah tetap dihasilkan, maka industri terkait harus mengolah limbah produksi tersebut menjadi produk lain sehingga material yang digunakan dalam proses produksi 100% terpakai.

- Pemakaian kembali dan daur ulang sampah (*reuse* & *recycle*) – metode ini umumnya diterapkan dalam fase pra-konsumsi ataupun pada fase konsumsi. Pada fase pra-konsumsi, industri menyiapkan skema daur ulang atau pemakaian kembali dari limbah industri (*scrap* ataupun *waste*) menjadi produk tertentu sedangkan pada fase konsumsi hal yang dapat dilakukan adalah memakai kembali sampah yang mungkin dapat difungsikan lain. Elagroudy, *et al* (2016) menjelaskan bahwa sistem daur ulang yang baik membutuhkan pertimbangan yang baik dalam menentukan biaya dari proses daur ulang tersebut serta potensi pasar dari produk daur ulang yang mungkin akan dijual.
- Pengolahan sampah menjadi energi (*energy recovery*) – hampir seluruh jenis sampah dapat menghasilkan substansi kimia seperti karbon dimana karbon itu sendiri dapat digunakan sebagai sumber energi tertentu. Sampah (baik organik maupun non-organik) yang diberi perlakuan tertentu dapat menghasilkan suatu biogas dimana biogas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai energi. Biogas tersebut dapat diperoleh dari beberapa proses seperti pengolahan sampah berbasis panas (*thermal treatment technology*) berupa pembakaran/insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis), *anaerobic digestion*, dan *torrefaction*. Biogas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar hingga dapat digunakan sebagai sumber energi dalam pembangkit listrik.
- *Zero waste treatment* – pengolahan sampah tanpa menghasilkan residu sampah, salah satu contoh yang paling umum adalah [engomposan anaerobik (*composting and anaerobic digestion*). Pengomposan ini dilakukan dengan metode anaerobik dimana tidak melibatkan oksigen dalam proses fermentasinya. Perbedaan paling mendasar antara pengomposan aerobik dan anaerobik adalah pada proses fermentasinya. Fermentasi pada pengomposan

anaerobik dilakukan secara tertutup tanpa tersentuh oksigen sedangkan pengomposan aerobik dilakukan dengan secara terbuka dan melibatkan oksigen. Gambar 2.3 berikut menjelaskan bagaimana proses pengomposan secara anaerobik.



Gambar 2.3 Proses Pengomposan Anaerobik
Sumber: (Lin, et al, 2018)

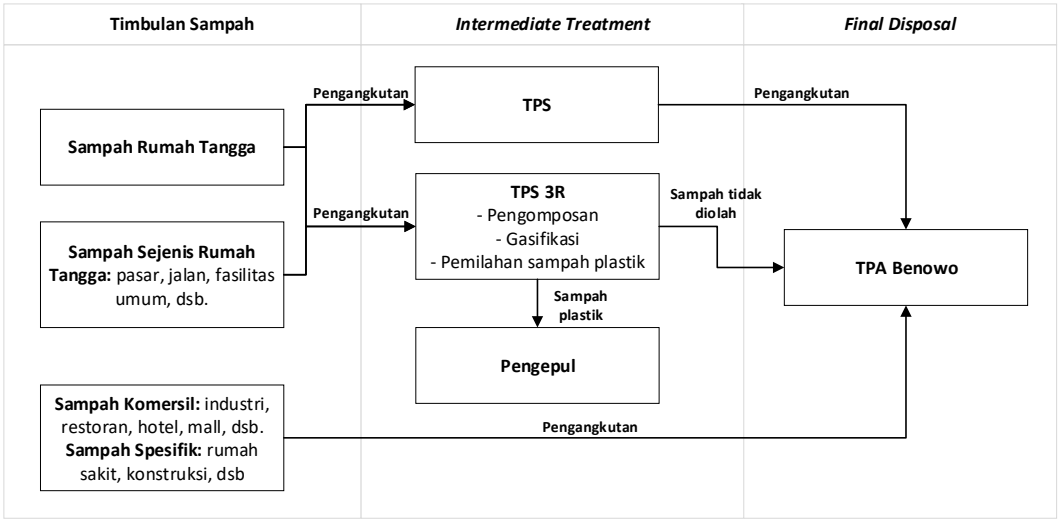
Pengomposan anaerobik tidak hanya menghasilkan kompos, melainkan juga menghasilkan biogas yang dapat digunakan sebagai alternatif bahan bakar tertentu.

- Pengolahan residu sampah (*residual waste management*) – beberapa metode pengolahan sampah seperti *sanitary landfill* atau *controlled landfill* menghasilkan gas metana (CH_4) hingga air lindi. Baik gas metana maupun air lindi tersebut merupakan residu dari sampah yang dapat mencemari lingkungan. Konsep SSWM tidak memperbolehkan adanya dampak negatif terhadap lingkungan dari proses pengelolaan sampah tersebut sehingga residu sampah seperti gas metana dan air lindi harus ditangani dengan baik. Umumnya gas metana dapat digunakan sebagai bahan bakar proses gasifikasi dalam pembangkit listrik sehingga akan dihasilkan energi listrik dari residu gas metana tersebut. Selain itu, air lindi dapat difiltrasi lebih lanjut untuk dihasilkan air bersih yang dapat digunakan kembali. Kedua metode tersebut dapat mengurangi adanya dampak lingkungan dari residu sampah terkait.

2.2.5 Pengolahan Sampah di Kota Surabaya

Kota Surabaya memiliki sistem pengelolaan sampah terpadu yang mengatur mekanisme mulai dari sumber/timbulan sampah hingga sampah dikirim ke TPA

Benowo. Di Surabaya sendiri, terdapat dua jenis pengelolaan sampah yang utama dilakukan yakni pengolahan sampah terpadu melalui TPA Benowo dan pengolahan sampah berbasis masyarakat melalui TPS 3R. Baik TPA dan TPS 3R masing-masing memiliki peran tersendiri dalam melakukan pengolahan sampah meliputi metode pengolahan yang digunakan, sistem pengangkutan sampah, hingga kapasitas pengolahan. Penjelasan lebih lanjut mengenai sistem pengelolaan sampah terpadu kota Surabaya dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut.



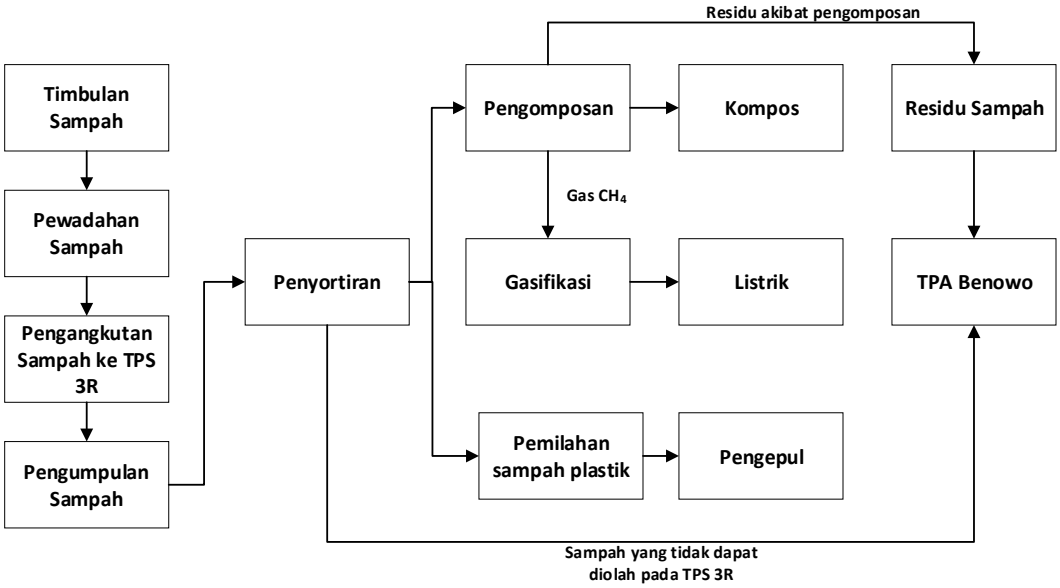
Gambar 2.4 Sistem Pengelolaan Sampah Kota Surabaya
Sumber: diadaptasi dari Kementerian Pekerjaan Umum (2010) dan Suprapto (2016)

Berdasarkan gambar 2.4, diketahui bahwa terdapat empat kategori timbulan sampah yakni sampah rumah tangga, sampah sejenis rumah tangga, sampah komersil, dan sampah spesifik. Untuk sampah rumah tangga dan sampah sejenis rumah tangga sendiri dilakukan pengangkutan ke TPS dan TPS 3R dimana pengangkutan ke TPS 3R hanya dilakukan pada timbulan sampah di area sekitar lokasi TPS 3R sedangkan untuk timbulan sampah yang tidak berada pada area TPS 3R dilakukan pengangkutan ke TPS yang juga tersebar di beberapa titik di Kota Surabaya. Sampah yang diangkut ke TPS kemudian dilakukan pengangkutan ke TPA Benowo untuk dilakukan pengolahan sampah lebih lanjut sedangkan untuk sampah yang diangkut ke TPS 3R dilakukan pengolahan sampah dengan beberapa metode seperti pengomposan, gasifi✓kasi, dan pemilahan sampah plastik.

Selanjutnya sisa sampah yang tidak diolah pada TPS 3R dilakukan pengangkutan ke TPA Benowo untuk dikelola lebih lanjut bersama dengan sampah yang berasal dari TPS. Selanjutnya untuk kategori sampah komersil dan sampah spesifik dilakukan pengangkutan langsung ke TPA Benowo.

2.2.6 Pengolahan Sampah di TPS 3R Kota Surabaya

TPS 3R merupakan tempat pengolahan sampah awal yang disediakan oleh Pemerintah Kota Surabaya dimana pengolahan sampah yang dilakukan pada TPS 3R ini bersifat *intermediate treatment* atau pengolahan sampah tahap awal sebelum pengolahan sampah pada TPA Benowo. Secara umum, mekanisme pengolahan sampah yang dilakukan pada TPS 3R terdapat pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Mekanisme Pengolahan Sampah pada TPS 3R Kota Surabaya
Sumber: (Kementrian Pekerjaan Umum, 2010)

Timbulan sampah atau sumber sampah yang menjadi masukan dalam TPS 3R berasal dari sampah rumah tangga dan sampah sejenis rumah tangga yang berada pada area sekitar TPS 3R. Pemerintah Kota Surabaya melalalui Dinas Kebersihan dan Ruang Tata Hijau (DKRTH) melakukan pewadahan sampah dengan menempatkan tempat sampah yang tersebar di area sekitar TPS 3R. Selanjutnya, petugas TPS 3R akan melakukan pengangkutan sampah secara rutin setiap hari dan

dikumpulkan di TPS 3R untuk kemudian diproses lebih lanjut. Sampah yang terkumpul kemudian disortir berdasarkan jenis sampahnya. Umumnya jenis sampah yang akan diolah di TPS 3R ini terbagi menjadi dua yakni sampah organik yang dapat diolah menjadi kompos seperti daun, ranting, kertas, dsb serta sampah plastik. Untuk sampah yang tidak termasuk ke dalam kedua jenis tersebut seperti sampah logam, kaca, karet, dsb tidak akan diolah di TPS 3R dan akan dilakukan pengangkutan ke TPA Benowo. Sampah plastik yang telah dipisahkan dari jenis sampah lain kemudian diolah pada area sampah plastik namun pengolahan yang dilakukan hanya sebatas penyortiran. Penyortiran dilakukan sesuai jenis sampah plastik seperti botol plastik, plastik kemasan, dsb. Setelah sampah plastik tersebut disortir akan dijual ke pengepul. Selain sampah plastik, TPS 3R juga mengolah sampah organik. Sampah organik yang menjadi bahan baku proses pengomposan akan ditempatkan pada area pengomposan dan dilakukan pengomposan. Teknik pengomposan yang digunakan sendiri terdapat dua jenis yakni pengomposan anaerobik untuk proses pengomposan pada TPS 3R yang memiliki fasilitas gasifikasi dan pengomposan aerobik untuk TPS 3R yang tidak memiliki fasilitas gasifikasi. Pada TPS 3R yang memiliki fasilitas gasifikasi, pengomposan anaerobik dilakukan dengan tujuan agar proses fermentasi sampah menghasilkan gas CH_4 dimana gas tersebut akan digunakan sebagai sumber energi dalam proses gasifikasi dengan hasil akhir listrik. Baik proses pengomposan aerobik ataupun anaerobik sama-sama dapat menghasilkan residu sampah dimana residu sampah ini tidak akan diolah kembali pada TPS 3R melainkan dikirimkan ke TPA Benowo.

2.3 Studi Simulasi Sistem Dinamik dalam Sistem Persampahan

Persampahan merupakan permasalahan yang melibatkan banyak keterkaitan entitas. Keterkaitan tersebut menyebabkan adanya interdependensi antar entitas secara kompleks sehingga terbentuk suatu sistem persampahan. Sistem sendiri merupakan sekumpulan elemen atau komponen (bisa jadi sebuah sub-sistem) dimana yang melakukan sesuatu untuk mencapai suatu tujuan tertentu dimana elemen atau komponen tersebut tidak saling bekerja secara individu melainkan berinteraksi satu sama lain (Daellenbach & McNickle, 2005). Adanya interdependensi antar entitas tersebut menyebabkan perubahan dalam suatu sistem

ketika satu entitas mengalami perubahan pula. Dalam kasus persampahan, suatu jumlah sampah akan meningkat ketika jumlah penduduk juga meningkat. Interdependensi tersebut menunjukkan bahwa suatu sistem bersifat kompleks sehingga perlu dianilisis lebih lanjut dengan menggunakan simulasi. Salah satu teknik analisis dari suatu sistem sendiri adalah simulasi sistem dinamik dimana metode ini dirancang untuk melihat struktur sistem yang kompleks secara komprehensif hingga merancang suatu kebijakan dengan pengaruh yang besar untuk peningkatan berkelanjutan (Sterman, 2000). Konsep dari sistem dinamik sendiri mempelajari sebagian dari keseluruhan sistem namun dengan tidak mengabaikan sistem amatan dan lingkungan sistem. Pendekatan sistem dinamik yang kompleks sendiri memerlukan pengujian model simulasi untuk penentuan peningkatan suatu sistem dengan merancang kebijakan baru (Sterman, 2000).

2.3.1 Metodologi Sistem Dinamik

Seluruh entitas dalam sistem persampahan tidak dapat berdiri sendiri sehingga entitas tersebut saling mendukung satu sama lain. Suatu perubahan nilai entitas dalam suatu sistem persampahan tersebut tidak dapat berjalan secara instan dan terdapat suatu *delay*/penundaan. Sebagai contoh, jumlah timbulan sampah akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah penduduk namun peningkatan penduduk tersebut tidak secara instan akan menambah jumlah timbulan sampah sehingga melibatkan *delay* dalam sistem tersebut seperti adanya tingkat konsumsi masyarakat dimana semakin konsumtif masyarakat maka timbulan sampah akan semakin banyak. Dinamika perubahan entitas yang melibatkan *delay*/penundaan tersebut dapat bersifat kompleks dimana permasalahaan ini dapat dianalisis lebih lanjut dalam studi metodologi sistem dinamik. Studi sistem dinamik sendiri merupakan sebuah metodologi yang digunakan untuk memahami suatu kondisi permasalahan yang bersifat kompleks. Metodologi ini umumnya menitikberatkan pada proses pengambilan kebijakan serta menganalisa bagaimana kebijakan tersebut akan menentukan perilaku (*behavior*) dari entitas yang terpengaruh oleh kebijakan tersebut dan dimodelkan secara dinamik (Richardson & Pugh, 1986). Dalam sistem dinamik, kompleksitas sistem diwujudkan berdasarkan beberapa aspek yakni *delay* antara hubungan kausal antar variabel, adanya *feedback* dari tiap

variabel, dan *stock* sebagai akumulator (Nuhoglu & Nuhoglu, 2007). Terdapat lima tahapan dalam proses pemodelan sistem dinamik (Sterman, 2000) sebagai berikut.

1. *Problem Articulation: Boundary Selection*

Pemodelan sistem dinamik diawali dengan mengidentifikasi masalah dimana dari masalah tersebut diidentifikasi pula variabel-variabel yang terlibat. Selanjutnya ditentukan *time horizon* dari masalah terkait untuk mendefinisikan cakupan masalah yang dibahas. Cakupan ini kemudian digunakan sebagai batasan (*system boundaries*).

2. *Formulation of Dynamic Hypothesis*

Setelah identifikasi masalah dilakukan, dirancang suatu hipotesis dimana perancangan hipotesis ini diikuti dengan melakukan formulasi *dynamic hypothesis* yang menjelaskan sisi dinamis dari sistem terkait dengan struktur timbal-balik (*feedback loop*). Umumnya pada tahap ini dilakukan konseptualisasi sistem dengan melakukan pemetaan pada permasalahan dalam beberapa metode seperti *causal loop diagram* dan *stock and flow diagram*.

3. *Formulation of a Simulation Model*

Pada tahap ini dilakukan formulasi matematis pada model simulasi yang telah dibuat. Hal-hal yang terkait dengan tahapan ini antara lain seperti spesifikasi struktur dan aturan keputusan, estimasi parameter, hubungan antar variabel, dan pengujian antara model dengan tujuan ataupun dengan ruang lingkup penelitian.

4. *Testing*

Tahap ini dilakukan dengan melakukan *running* simulasi dan pengujian model untuk mengetahui apakah model telah merepresentasikan kondisi sistem yang ada. Proses pengujian atau validasi ini dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti analisis sensitivitas, uji kondisi ekstrim, dan sebagainya.

5. *Policy Design and Evaluation*

Model yang telah diuji dan telah dinyatakan valid dapat digunakan sebagai landasan untuk evaluasi dari sistem yang ada. Luaran yang dihasilkan dari proses evaluasi ini umumnya adalah kebijakan baru meliputi perubahan parameter hingga perubahan struktur model sistem eksisting.

2.3.2 *Causal Loop Diagram*

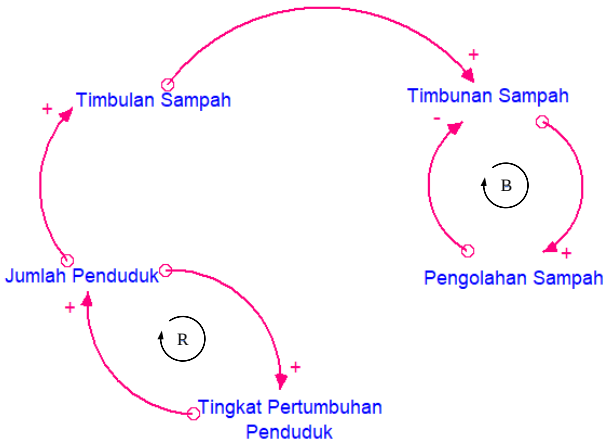
Causal loop diagram (CLD) dikembangkan pada awal tahun 1960-an dan umumnya digunakan untuk memetakan perilaku dinamis dari sistem kompleks yang mungkin mengandung perilaku umpan balik dari elemen sistem terkait (Daellenbach & McNickle, 2005), sedangkan menurut Yuen & Chan (2010), CLD digunakan untuk merekam suatu model yang merepresentasikan keterkaitan dan proses umpan balik dalam suatu sistem. Tujuan utama dari CLD adalah untuk menggambarkan hipotesis kausal sehingga membuat penyajian permasalahan sistem lebih terstruktur (Kiani, Gholamian, Hamzehei, & Hosseini, 2009). Dalam sistem persampahan, CLD dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan kausal antara jumlah timbulan sampah, pengolahan sampah, dan jumlah timbunan sampah sehingga dapat dianalisis lebih lanjut mengenai keterkaitan antar entitas pada sistem persampahan. Menurut Sterman (2000), manfaat dari penggunaan CLD itu sendiri adalah sebagai berikut.

1. Memberikan gambaran hipotesis dari dinamika sistem secara cepat.
2. Menggamparkan model baik untuk variabel secara individu ataupun secara grup.
3. Menggambarkan umpan balik yang kredibel terhadap masalah yang diidentifikasi.

CLD sendiri terdiri dari variabel-variabel yang dihubungkan dengan tanda panah (konektor) untuk menunjukkan hubungan kausal dari variabel-variabel terkait. Masing-masing hubungan kausal memiliki nilai/polaritas yang bersifat positif (+) dan negatif (–) dimana nilai/polaritas tersebut mengindikasikan bagaimana perubahan satu variabel dapat memengaruhi variabel lain. Penjelasan dari hubungan polaritas antar variabel tersebut dijelaskan sebagai berikut.

1. Hubungan positif (+) – yakni suatu kondisi dimana suatu variabel A memberikan pengaruh positif pada variabel B sehingga peningkatan nilai pada variabel A akan meningkatkan nilai pada variabel B.
2. Hubungan negatif (–) – yakni suatu kondisi dimana suatu variabel A memberikan pengaruh negatif pada variabel B sehingga peningkatan nilai pada variabel A akan menurunkan nilai pada variabel B.

Gambar 2.6 berikut merupakan contoh CLD sederhana dalam sistem persampahan.

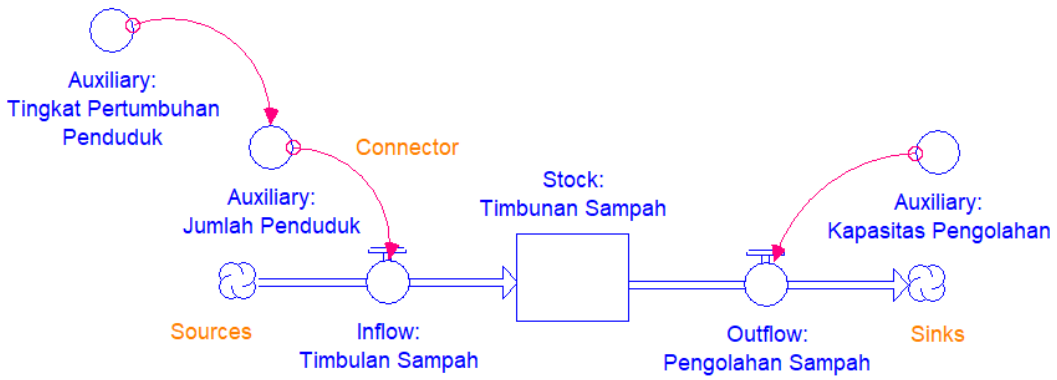


Gambar 2.6 *Causal Loop Diagram* Sistem Persampahan

Gambar 2.6 menunjukkan CLD sederhana dari sistem persampahan dimana jumlah timbulan sampah dipengaruhi oleh jumlah penduduk dan jumlah penduduk itu sendiri dipengaruhi oleh tingkat pertumbuhan penduduk. Selanjutnya, semakin bertambahnya timbulan sampah akan meningkatkan timbunan sampah dan kemudian akan meningkatkan pengolahan sampah pula. Pengolahan sampah itu sendiri akan mengurangi jumlah timbunan sampah. Pada CLD tersebut, terdapat hubungan kausal antar variabel yang tertutup dimana menghasilkan suatu *loop*. Hubungan kausal antara jumlah penduduk dan tingkat pertumbuhan penduduk menyatakan saling menguatkan dimana kedua hubungan kausal baik dari jumlah penduduk ke tingkat pertumbuhan penduduk ataupun sebaliknya memiliki tanda positif sehingga dihasilkan *loop* yang bersifat *reinforcing feedback* (R). Selanjutnya, hubungan antara timbunan sampah dan pengolahan sampah menyatakan saling mengimbangi dimana kedua hubungan kausal baik dari timbunan sampah ke pengolahan sampah memiliki tanda yang berlawanan (positif dan negatif) dengan hubungan kausal dari pengolahan sampah ke timbunan sampah sehingga dihasilkan *loop* yang bersifat *balancing feedback* (B).

2.3.3 *Stock and Flow Diagram*

Stock and flow diagram (SFD) merupakan suatu sistem yang menggambarkan hubungan antar variabel dimana pada dasarnya merupakan transformasi dari CLD. SFD merubah hubungan kausal antar variabel pada CLD menjadi hubungan antar *stock* dan *flow* dari suatu sistem sehingga dapat dimengerti oleh bahasa pemrograman pada *software* simulasi tertentu (Sterman, 2000). Sterman (2000) juga menjelaskan bahwa CLD tidak memuat keseluruhan informasi yang diperlukan dalam proses simulasi seperti formulasi matematis sehingga CLD tidak dapat menjelaskan aliran informasi dan material secara simultan dimana informasi seperti formulasi matematis tersebut dapat ditampilkan dalam SFD. Gambar 2.7 berikut merupakan sebuah gambaran umum dari SFD dalam sistem persampahan.



Gambar 2.7 Contoh SFD dalam Sistem Persampahan

Berikut merupakan penjelasan dari SFD pada gambar 2.7.

- *Stock*

Stock atau juga disebut dengan *level* digambarkan dengan notasi bujur sangkar. *Stock* bersifat sebagai akumulator dan dikarakteristikan sebagai *"the state of the system*" dimana *stock* akan menghasilkan suatu informasi yang akan digunakan sebagai dasar untuk melakukan tindakan dalam pengambilan keputusan. Suatu variabel dapat dinyatakan sebagai *stock* jika variabel tersebut bersifat tidak mudah berubah dimana perubahan variabel tersebut hanya disebabkan oleh perubahan pada *flow* (Sterman, 2000). Pada gambar 2.7, timbunan sampah

dinyatakan sebagai *stock* dimana timbunan sampah ini merupakan akumulasi dari kuantitas sampah yang disimpan/ditimbun.

- *Flow*

Flow merupakan notasi yang menggambarkan suatu aliran material ataupun informasi yang berubah-ubah sesuai dengan fungsi waktu dan proses dimana perubahan tersebut akan memengaruhi nilai pada *stock*. Pada dasarnya, *flow* menggambarkan adanya pergerakan informasi dan materi dalam sistem sehingga *flow* menunjukkan suatu aktivitas dari sistem tersebut (Sterman, 2000). *Flow* sendiri dibedakan menjadi dua jenis sebagai berikut.

1. *Inflows* – digambarkan dengan anak panah menuju *stock* dimana perubahan nilai pada *inflows* tersebut akan menambah nilai *stock*.
2. *Outflows* – digambarkan dengan anak panah keluar dari *stock* dimana perubahan nilai pada *outflows* tersebut akan mengurangi nilai *stock*.

Flow sendiri dinotasikan dengan gambar katup pipa (*valves*) dimana *valve* tersebut mengontrol *flow* (Sterman, 2000). Pada gambar 2.7, yang berperan sebagai *inflow* adalah timbulan sampah dan yang berperan sebagai *outflow* adalah pengolahan sampah.

- *Auxiliary/Converter*

Auxiliary atau *converter* dinotasikan dengan lingkaran dimana berisi informasi berupa persamaan atau formulasi matematis yang dapat memengaruhi nilai *output* dari suatu aktivitas dalam sistem. *Auxiliary* dapat digunakan untuk mengambil suatu informasi dari sistem dan mengubahnya untuk kemudian digunakan oleh variabel lain. Pada gambar 2.7, *auxiliary* yang digunakan adalah tingkat pertumbuhan penduduk, jumlah penduduk, dan kapasitas pengolahan dimana ketiga variabel tersebut mengirimkan suatu formulasi matematis ke variabel lain.

- *Connector*

Connector dinotasikan sebagai anak panah yang menunjukkan hubungan antar variabel dan digunakan untuk mengirimkan informasi dari satu variabel ke variabel lain.

- *Cloud*

Cloud merepresentasikan lingkungan diluar sistem yang diamati dimana dilambangkan dengan notasi berbentuk awan (Sterman, 2000). *Cloud* sendiri dikategorikan menjadi dua jenis sebagai berikut.

1. *Sources* – merepresentasikan suatu aliran dari luar sistem yang masuk ke dalam sistem (dalam hal ini adalah *stock*).
2. *Sinks* – merepresentasikan suatu aliran dari sistem (dalam hal ini adalah *stock*) yang meninggalkan sistem.

Sources dan *sinks* diasumsikan memiliki kapasistas yang tak terhingga dan diasumsikan tidak pernah membatasi aliran informasi atau material pada *flow* ataupun *stock* (Sterman, 2000).

Pada gambar 2.7, sampah bersumber dari timbulan sampah oleh masyarakat berupa *inflow* yang mengirimkan sejumlah sampah ke *stock* timbunan sampah. *Stock* timbunan sampah akan mengakumulasikan jumlah sampah yang dikirim oleh timbulan sampah. Kuantitas pada timbunan sampah akan berkurang ketika pengolahan sampah dilakukan sehingga pengolahan sampah ini dinyatakan sebagai *outflows*. Pada *inflow*, banyaknya timbulan sampah yang dihasilkan oleh masyarakat dipengaruhi oleh jumlah penduduk dan jumlah penduduk itu sendiri dipengaruhi oleh tingkat pertumbuhan penduduk sedangkan pada *outflow*, jumlah sampah yang diolah dipengaruhi oleh kapasitas pengolahan sampah sehingga faktor-faktor yang dapat memengaruhi sistem baik pada *inflow* maupun *outflow* tersebut dinyatakan sebagai *auxiliary*/*converter*.

2.3.4 Konsep Pengujian Model

Secara umum, model tidak pernah dapat menggantikan realitas sistem yang ada sehingga perlu dilakukan penghampiran dari model tersebut supaya model yang dikembangkan dapat merepresentasikan sistem yang diamati. Sterman (2000) menjelaskan bahwa model yang baik adalah model yang merepresentasikan sistem yang ada dimana hal tersebut dapat dilakukan dengan melakukan pengujian terhadap model terkait berupa validasi ataupun verifikasi. Pada buku yang sama, Sterman (2000) juga menjelaskan bahwa pengujian model dirancang untuk menemukan kesalahan pada model sehingga pihak terkait dapat memahami

keterbatasan model dan kemudian memperbaiki model tersebut agar dapat ditentukan model terbaik dalam proses pengambilan keputusan. Selain itu, Forrester (dalam Sterman, 2000) menyebutkan bahwa pengujian model/validasi merupakan proses membangun kepercayaan terhadap model dimana model telah cukup representatif terhadap kondisi sistem yang sebenarnya. Tujuan dari validasi model itu sendiri bukan untuk menunjukkan bahwa model tersebut benar melainkan untuk menunjukkan bahwa model telah sesuai dengan tujuan penelitian dan model telah konsisten terhadap kondisi nyata dari sistem (Richardson & Pugh, 1986). Forester dan Senge (1980) menjelaskan bahwa terdapat dua fokusan dalam melakukan validasi model sebagai berikut.

- *Model structure test*

Model structure test lebih menekankan pengujian pada struktur dan parameter model tanpa melihat hubungan dan perilaku antar variabel. Terdapat beberapa jenis *model structure test* sebagai berikut.

1. *Parameter-verification test* – dilakukan untuk mengetahui konsistensi dari nilai parameter yang ada pada model. Pengujian ini dilakukan dengan menguji perilaku nilai parameter dari hasil simulasi dengan logika hubungan kausal pada model konseptual atau CLD. *Parameter-verification test* dilakukan dalam dua tahapan yakni validasi input dan validasi logika pada hubungan antar variabel. Validasi *input* sendiri dilakukan dengan membandingkan antara data historis dan data yang digunakan dalam model sedangkan validasi logika dilakukan dengan mengecek logika antar variabel pada *input* maupun *output* apakah bersifat *counter-intuitive* atau tidak.
2. *Extreme condition test* – dilakukan untuk mengetahui bagaimana model merespon suatu kondisi ekstrim tertentu. Pengujian ini dapat dilakukan dengan dua cara yakni dilakukan pengecekan secara langsung pada formulasi/*equation* model dan pengecekan melalui simulasi. Pengecekan pada formulasi matematis/*equation* model dilakukan dengan pengecekan terhadap *output* dari formulasi matematis terkait apabila diberikan suatu nilai maksimum dan nilai minimum sehingga dapat disimpulkan apakah *output* yang dihasilkan dari simulasi bersifat masih layah (*feasible*) atau tidak.

- *Model behavior test*

Model behavior test menguji model dengan mengevaluasi kecukupan struktur model melalui analisis perilaku yang dihasilkan oleh struktur/model. Terdapat beberapa jenis *model behavior test* sebagai berikut.

1. *Model behavior Barla's test* – dilakukan dengan membandingkan data aktual dengan rata-rata data hasil simulasi untuk mendapatkan *mean error* dari kedua perbandingan data tersebut dengan formula sebagai berikut.

   $$E = \left|\frac{(S-A)}{A}\right| \quad (2.1)$$

   Dimana,

   A = Data aktual

   S = Data hasil simulasi

   E = *Mean error*

   Model dapat dinyatakan valid jika nilai *mean error* (E) tidak melebihi 10%.

2. *Model behavior statistical test* – dilakukan untuk menentukan apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata dua sampel yang berkaitan (yakni data aktual dan data hasil simulasi) namun memiliki perlakuan yang berbeda. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan prinsip *paired sample t-test method* dengan hipotesis sebagai berikut.

   Ho: tidak terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata data aktual dengan rata-rata data hasil simulasi

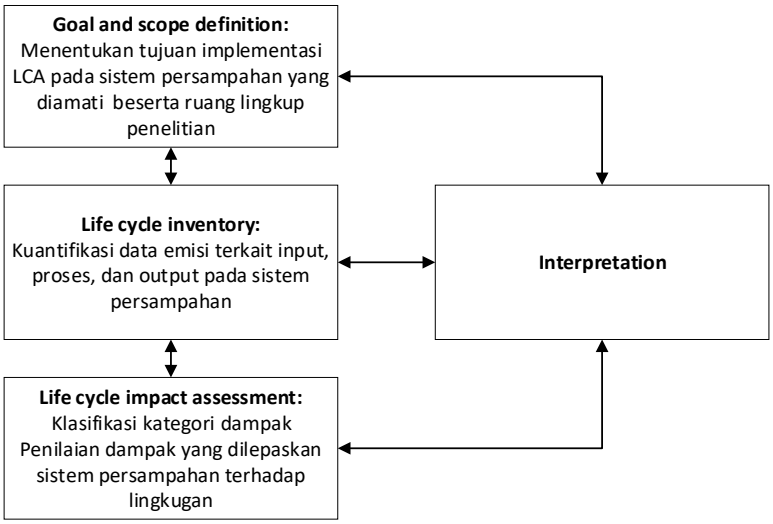
   Ha: terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata data aktual dengan rata-rata data hasil simulasi

   Model dapat dinyatakan valid jika didapatkan nilai *p-value* > 0,05.

2.4 *Life Cycle Assessment* (LCA)

Life cycle assessment atau *life cycle analysis* (LCA) merupakan sebuah metode untuk mengukur dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu aktivitas industri diawali dengan pengumpulan bahan baku dari bumi hingga proses produksi yang menghasilkan residu atau *scrap* yang akan kembali ke bumi pula, proses analisis dalam LCA dikenal pula dengan *cradle-to-grave* (USEPA dalam El-Haggar, 2007). Analisis dari LCA sendiri mencakup keseluruhan dari siklus hidup

produk (Pringgajaya & Ciptomulyono, 2012) dimana LCA digunakan untuk mengetahui dampak lingkungan baik dari produk ataupun fungsi yang diharapkan dari produk tersebut (Tapia, Siebel, van der Helm, Baars, & Gijzen, 2008). Implementasi LCA sendiri dapat dilakukan untuk pengembangan produk, perencanaan strategis, perancangan suatu kebijakan, pemasaran, dan sebagainya. LCA secara umum juga merupakan sebuah metode untuk mengidentifikasi dan kalkulasi penggunaan energi, penggunaan sumber daya alam, pembuangan limbah/sampah pada lingkungan, serta mengevaluasi dan menerapkan kemungkinan perbaikan pada lingkungan (Windrianto, Rachmawati, & Berlianty, 2016). Maka dari itu, LCA dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan untuk meningkatkan kualitas produk dan proses produksinya dalam perspektif lingkungan. ISO (2006) menjelaskan bahwa terdapat empat fase dalam implementasi LCA yang dijelaskan pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Fase Implementasi LCA pada Persampahan
Sumber: (ISO, 2006)

Berikut adalah penjelasan dari setiap fase dalam LCA berdasarkan pada gambar 2.8.

1. *Goal and scope definition*

Pada tahap ini ditentukan tujuan dan ruang lingkup penelitian serta identifikasi variabel yang mungkin terlibat dalam penelitian tersebut. Finnveden,

Johansson, Lind, & Moberg, (2000) menjelaskan bahwa tujuan penerapan dari LCA harus ditentukan dari awal karena berkaitan dengan siapa saja yang akan bertanggung jawab mengenai hasil dari LCA tersebut. Tujuan ditentukan dengan maksud untuk memudahkan penentuan ruang lingkup dari LCA itu sendiri. Umumnya terdapat tiga jenis ruang lingkup dalam LCA yakni (1) *cradle-to-grave* dimana mengukur seluruh fase mulai dari ekstraksi, proses produksi, distribusi, hingga akhir siklus, (2) *cradle-to-gate* dimana hanya mengukur fase ekstraksi hingga produksi, dan (3) *gate-to-gate* dimana hanya mengukur satu proses. Dalam ruang lingkup tersebut, sistem yang diamati dijabarkan secara spesifik penentuan variabel apa saja yang berkaitan dengan sistem terkait, serta penentuan *functional unit* (fu). *Functional unit* ditentukan sebagai sebuah parameter *input* dan *output* dari data yang memungkinkan untuk proses perbandingan antar sistem yang dianalisis (ISO, 2006). Pada sistem TPS 3R, tujuan yang digunakan adalah mengetahui dampak lingkungan yang dilepaskan oleh TPS 3R dengan ruang lingkup meliputi pengangkutan sampah dan pengolahan sampah. *Functional unit* (Fu) yang digunakan adalah 1 ton/km untuk pengukuran proses pengangkutan sampah dan 1 ton sampah untuk pengukuran proses pengolahan sampah.

2. *Life cycle inventory* (LCI)

Life cycle inventory (LCI) merupakan proses pengumpulan dan kalkulasi data untuk mengukur *input* dan *output* yang relevan dari sistem (ISO, 2006). LCI bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengukur aliran bahan dan energi serta kuantitas emisi yang dilepaskan sistem ke lingkungan. Finnveden, Johansson, Lind, & Moberg (2000) kemudian menjelaskan bahwa LCI sendiri dapat dilakukan dalam empat tahap yakni (1) identifikasi keseluruhan proses yang terkait dalam satu siklus produksi, (2) pengumpulan data pada setiap prosesnya, (3) penentuan batasan sistem dalam setiap proses, dan (4) penyesuaian *input* dan *output* dari setiap proses agar berhubungan dengan *functional unit*. Kuantifikasi data yang dilakukan meliputi perhitungan emisi yang dihasilkan baik pada proses pengangkutan sampah dan proses pengolahan sampah pada TPS 3R. Perhitungan emisi yang dilakukan meliputi parameter emisi gas rumah kaca seperti CO_2 dan CH_4, senyawa yang dapat menyebabkan pengasaman seperti SO_2, dan senyawa lain yang dapat berdampak

pada penipisan lapisan ozon. Parameter tersebut ditentukan sesuai dengan metode *Environmental Product Declarations* (EPD) 2007 pada SimaPro.

3. *Life cycle impact assessment* (LCIA)

Life cycle impact assessment (LCIA) merupakan tahap evaluasi dan analisis terkait seberapa signifikan potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari sistem berdasarkan hasil dari pengolahan data dalam LCI (Finnveden, Johansson, Lind, & Moberg, 2000). Tahapan dalam LCIA sendiri terbagi dalam 3 fase sebagai berikut.

- *Classification* – proses ini mengklasifikasikan keseluruhan data sumber daya dalam sistem beserta emisi yang dilepaskan ke lingkungan untuk berbagai kategori dampak lingkungan. Proses klasifikasi yang dilakukan meliputi pengelompokan data kuantifiasi hasil LCI ke dalam beberapa kategori dampak lingkungan seperti pengelompokan gas CO_2 dan CH_4 yang berdampak pada pemanasan global.
- *Characterization* – proses ini menganalisis hasil kuantifikasi emisi dan konsumsi sumber daya dari sistem untuk berbagai kategori dampak lingkungan. Pada sistem TPS 3R, hasil pengelompokan gas rumah kaca akan dikarakterisasi menjadi satu unit nilai dengan satuan gas rumah kaca sesuai dengan metode EDP 2007.
- *Normalization* – proses ini dilakukan dengan penilaian dampak lingkungan berdasarkan karakterisasi nilai emisi sesuai dengan kategori dampak yang dihasilkan. Pada tahap ini akan dapat disimpulkan sebesar apa dampak lingkungan dari sistem yang diamati terhadap lingkungan sistemt tersebut berada.
- *Valuation* atau *weighing* – proses ini dilakukan dengan membandingkan keseluruhan dampak lingkungan yang dilepaskan oleh sistem untuk digunakan sebagai dasar dalam pembuatan keputusan.

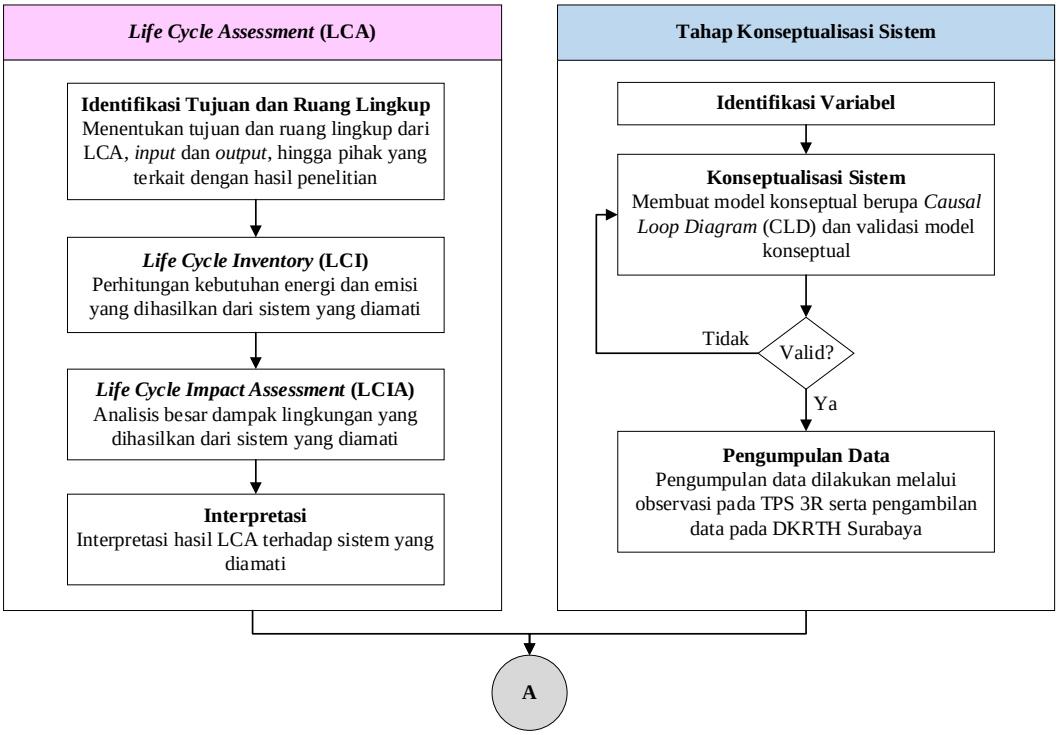
4. *Interpretation*

Tahap interpretasi merupakan proses analisis terhadap hasil LCI dan LCIA yang dikombinasikan untuk menetapkan suatu kesimpulan tertentu. Hasil dari interpretasi ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan.

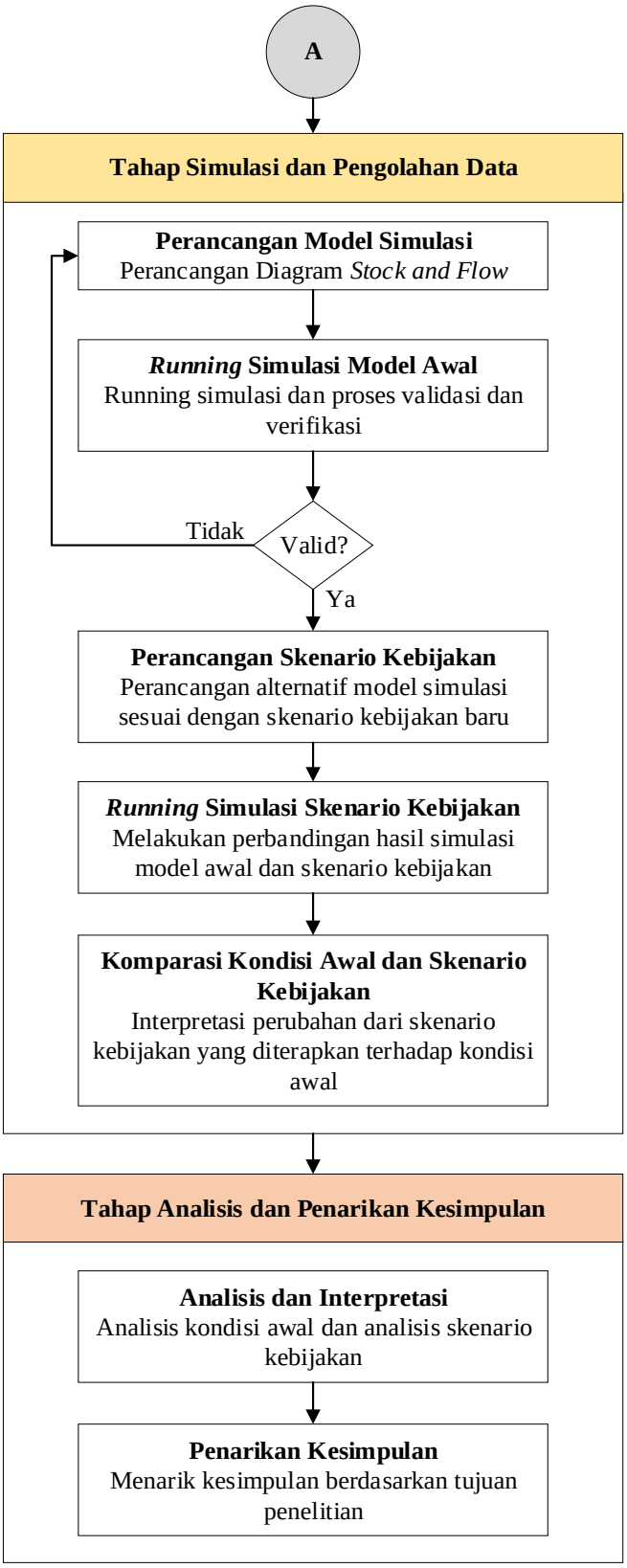
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai tahapan dari penelitian yang dilakukan berupa diagram alir dari prosedur penelitian. Prosedur penelitian yang dilakukan meliptui prosedur dalam melakukan *life cycle assessment* dan simulasi sistem dinamik. Berikut adalah diagram alir dari penelitian yang dilakukan.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (lanjutan)

Berdasarkan diagram alir pada gambar 3.1, berikut adalah penjelasan dari masing-masing tahapan penelitian yang dilakukan.

3.1 *Life Cycle Assessment* (LCA)

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan dan analisis dampak lingkungan dari TPS 3R Kota Surabaya sebagai *input* dalam aspek lingkungan pada model sistem dinamik. Berikut adalah tahapan yang dilakukan dalam LCA.

3.1.1 Identifikasi Tujuan dan Ruang Lingkup

Pada tahap ini akan ditentukan tujuan dari penerapan LCA dimana pada tujuan ini akan dijelaskan juga mengenai alasan penerapan LCA pada TPS 3R dan pihak yang mungkin terlibat dan bertanggung jawab terhadap hasil LCA pada TPS 3R tersebut. Selanjutnya ditetapkan pula ruang lingkup dari LCA ini meliputi batasan yang digunakan dalam penerapan LCA karena batasan tersebut. Batasan yang digunakan dalam LCA pada penelitian ini adalah *gate-to-gate* dimana proses yang diamati hanya pada satu proses yakni proses pengolahan sampah pada TPS 3R dan pengangkutan sampah dari timbulan sampah ke TPS 3R. *Functional unit* (Fu) yang digunakan dalam pengukuran emisi adalah per ton sampah untuk proses pengolahan sampah dan per ton/km untuk proses pengangkutan sampah.

3.1.2 *Life Cycle Inventory* (LCI)

Life cycle inventory (LCI) dilakukan untuk mengkuantifikasi *input*-proses-*output* dari sistem TPS 3R. Proses ini dilakukan dengan menghitung energi dan kebutuhan bahan baku (*input*) hingga emisi yang dihasilkan dari sistem pengolahan sampah pada TPS 3R Kota Surabaya (*output*). Setiap *input*-proses-*output* akan dikuantifikasi yang disesuakan dengan satuan *functional unit* (Fu) yang kemudian data hasil LCI akan dipergunakan dalam proses karakterisasi pada LCIA. *Input*-proses-*output* yang akan dianalisis meliputi proses pengangkutan sampah, pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran sampah plastik. *Functional unit* (Fu) yang digunakan adalah per ton/km untuk pengangkutan sampah dan per ton sampah untuk proses pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran.

3.1.3 *Life Cycle Inventory Assessment* (LCIA)

Life cycle inventory assessment (LCIA) merupakan tahap menilai seberapa besar dampak yang ditimpulkan dari TPS 3R terhadap lingkungan. Penilaian akan dilakukan mengategorikan dampak yang mungkin dilepaskan oleh sistem TPS 3R baik dari pengangkutan sampah ataupun pengolahan sesuai dengan jenis dampak lingkungan. Selanjutnya akan diklasifikasikan data emisi dari LCI sesuai dengan kategori dampak yang telah ditentukan sebelumnya. Metode yang akan digunakan dalam proses LCIA ini adalah *Environmental Product Declaration* (EDP) – 2007 dimana metode ini digunakan karena *database* EDP 2007 sangat relevan dengan jenis unsur/zat yang dilepaskan oleh TPS 3R. Klasifikasi tersebut kemudian digunakan sebagai masukan dalam proses karakterisasi pada *software* SimaPro untuk dinilai seberapa besar dampak yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R baik pengangkutan sampah maupun pengolahan sampah terhadap lingkungan. Data variabel yang dihasilkan oleh LCIA ini akan berupa nilai emisi yang dilepaskan oleh TPS 3R meliputi emisi gas rumah kaca, penipisan lapisan ozon, asidifikasi, dan eutrofikasi dimana data ini kemudian digunakan sebagai masukan dalam simulasi sistem dinamik.

3.1.4 Interpretasi

Pada tahap ini dilakukan interpretasi terhadap dampak yang ditimbulkan oleh sistem terhadap lingkungan untuk kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan.

3.2 Tahap Konseptualisasi Sistem

Pada tahap ini dilakukan permodelan dari sistem pengolahan sampah di TPS 3R Kota Surabaya meliputi identifikasi variabel, perancangan model konseptual, dan pengumpulan data. Tujuan dari tahapan ini adalah untuk memberikan gambaran awal terhadap kondisi eksisting sistem yang diteliti.

3.2.1 Identifikasi Variabel

Identifikasi variabel dilakukan untuk mengetahui keseluruhan variabel yang terkait terhadap proses pengolahan sampah di TPS 3R Kota Surabaya beserta

parameter-parameter variabel tersebut dimana variabel yang diidentifikasi dibatasi oleh ruang lingkup penelitian. Penentuan variabel terkait dilakukan melalui wawancara dengan *stakeholder* terkait, FGD (*Focus Group Discussion*) dengan pihak yang memahami konteks permasalahan dan sistem yang ada, serta dari tinjauan pustaka penelitian terdahulu.

3.2.2 Konseptualisasi Sistem

Tahap ini merupakan tahap perancangan model konseptual dari kondisi sistem TPS 3R Surabaya dan sistem persampahan yang terkait. Model konseptual yang dibuat berupa *causal-loop diagram* (CLD). CLD yang dibuat meliputi keseluruhan sistem persampahan yang terkait dengan TPS 3R mulai dari pengolahan sampah, pengangkutan sampah, hingga dampak lingkungan yang dihasilkan oleh pengolahan sampah terkait. CLD tersebut digunakan untuk menjelaskan hubungan keterkaitan antar variabel yang telah diidentifikasi sebelumnya.

3.2.3 Validasi Model Konseptual

Pada tahap ini, CLD yang telah dibuat akan di validasi. Validasi yang dilakukan berupa *expert judgement* dari pihak yang memahami sistem pesampahan di TPS 3R ataupun sistem persampahan Kota Surabaya serta *expert judgement* dari pihak yang memahami mengenai konsep CLD dan metodologi sistem dinamik.

3.2.4 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan berupa data operasional TPS 3R meliputi pengolahan dan pengangkutan sampah. Data tersebut berupa data sekunder dimana pengumpulan data dilakukan dengan dengan melakukan wawancara dan/atau FGD dengan pihak Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau (DKRTH) atau Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Surabaya serta data statistik historis yang dimiliki oleh pihak ataupun penelitian terkait dimana data yang dikumpulkan adalah data yang sesuai dengan identifikasi variabel yang telah dilakukan sebelumnya.

3.3 Tahap Simulasi dan Pengolahan Data

Tahap ini dilakukan dengan mengolah data untuk menyelesaikan permasalahan yang ada pada kondisi awal/eksisting TPS 3R Surabaya meliputi perancangan model simulai, *running* simulasi kondisi awal, analisis dampak lingkungan, perancangan skenario kebijakan, *running* simulasi skenario kebijakan, dan diakhiri dengan analisis dampak lingkungan pada skenario kebijakan baru.

3.3.1 Perancangan Model Simulasi

Perancangan model simulasi dilakukan dengan pembuatan *stock and flow diagram* kondisi awal TPS 3R Surabaya pada *software* STELLA© dan menentukan formulasi matematis pada model *stock and flow diagram* tersebut. Model simulasi tersebut dibuat berdasarkan model konseptual (CLD) yang telah dibuat sebelumnya.

3.3.2 *Running* Simulasi Model Awal

Running simulasi dilakukan terhadap diagram *stock and flow* yang telah dirancang sebelumnya menggunakan *software* STELLA©. Hasil dari *running* simulasi ini akan dianalisis lebih lanjut mengenai variabel respon dari sistem yang diamati meliputi sampah dari TPS 3R ke TPA Benowo maupun dari sisi dampak lingkungan (emisi) yang dihasilkan. Selanjutnya, hasil analisis tersebut akan digunakan sebagai dasar dari perancangan skenario kebijakan baru.

3.3.3 Validasi Model Simulasi

Pengujian model dilakukan dalam dua fokusan yakni *model structure test* dan *model behavior test* dimana akan dilakukan dua metode pengujian pada masing-masing fokusan. Untuk *model structure test* akan dilakukan pengujian dengan metode *parameter verification test* dan *extreme condition test*, sedangkan untuk *model behavior test* akan diuji dengan dua metode yakni *model behavior Barla's test* dan *model behavior statistical test*. Jika model dapat dinyatakan valid, maka model yang dibuat dapat dinyatakan representatif terhadap kondisi eksisting sistem TPS 3R Surabaya yang diamati.

3.3.4 Perancangan Skenario Kebijakan

Skenario kebijakan baru dibuat dengan menganalisa variabel-variabel yang memengaruhi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo secara signifikan. Pada tahap ini akan dirancang model baru untuk masing-masing perubahan kondisi variabel sesuai dengan kebijakan baru yang ditentukan. Skenario kebijakan yang akan diterapkan dalam penelitian ini dikategorikan menjadi dua jenis yakni skenario perubahan parameter dan skenario perubahan struktur. Untuk skenario parameter sendiri dilakukan dengan mengubah kapasitas pengolahan sampah dengan penambahan alat/mesin terkait. Selanjutnya untuk skenario struktur melibatkan perubahan struktur pada sistem ataupun pada model. Skenario struktur yang diajukan akan terkait dengan variabel keputusan yang ditetapkan yakni penyebaran TPS 3R yang tidak merata di area Surabaya sehingga dibuat kebijakan baru mengenai penambahan jumlah TPS 3R untuk mengakomodasi area yang tidak tersentuh TPS 3R saat ini. Selanjutnya juga dikembangkan skenario penyebaran TPS 3R dengan skala kecil yakni dengan menempatkan TPS 3R pada radius yang relatif kecil ataupun skala sedang yakni menempatkan TPS 3R pada radius yang lebih luas. Selain itu dibuat juga skenario mengenai proses pengolahan sampah pada TPS 3R itu sendiri meliputi penambahan metode pengolahan sampah plastik menjadi bijih plastik sehingga dapat mengurangi sampah plastik yang diangkut ke TPA Benowo.

3.3.5 *Running* Simulasi Skenario Kebijakan

Running simulasi dilakukan pada masing-masing alternatif skenario kebijakan baru dimana selanjutnya hasil dari setiap alternatif skenario kebijakan akan dianalisis lebih lanjut.

3.3.6 Komparasi Kondisi Awal dan Skenario Kebijakan

Hasil simulasi pada kondisi awal dan setiap alternatif skenario kebijakan dibandingkan untuk dianalisis sejauh mana skenario terbaik yang dapat mengurangi aliran sampah dari TPS 3R ke TPA Benowo. Analisis perbandingan tersebut juga dilakukan terhadap dampak lingkungan dari masing-masing alternatif skenario

kebijakan sehingga dapat diputuskan skenario kebijakan mana yang paling sesuai dengan tujuan penelitian.

3.4 Tahap Analisis dan Penarikan Kesimpulan

Pada tahap ini akan dilakukan analisis dari simulasi yang telah dilakukan baik pada model awal maupun model alternatif skenario kebijakan dan diakhiri dengan penarikan kesimpulan.

3.4.1 Analisis dan Interpretasi

Pada tahap ini akan dianalisis terhadap *output* yang dihasilkan dari hasil simulasi model awal maupun simulasi skenario kebijakan baru. Analisis juga dilakukan dengan melakukan perbandingan antara *output* model awal dan *output* skenario kebijakan.

3.4.2 Penarikan Kesimpulan

Tahap ini berfokus pada proses penarikan kesimpulan berdasarkan analisis dan interpretasi yang telah dilakukan. Proses penarikan kesimpulan juga didasari oleh tujuan penelitian.

BAB 4
LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai pengolahan data dampak lingkungan dari pengolahan sampah di TPS 3R Surabaya menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA). Metode LCA yang digunakan adalah *Environmental Product Declaration* (EPD) – 2007 sebagai *database* dalam proses kuantifikasi nilai emisi yang dilepaskan oleh sistem. Pengukuran dampak lingkungan ini menggunkan *software* SimaPro dimana pengukuran tersebu dilakukan untuk proses pengangkutan sampah dan proses pengolahan sampah meliputi pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran sampah plastik di TPS 3R Surabaya.

4.1 Pengukuran Dampak Lingkungan Proses Pengangkutan Sampah

Berikut merupakan proses pengukuran dampak lingkungan pada pengangkutan sampah dari timbulan sampah ke TPS 3R.

4.1.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Proses Pengangkutan Sampah

Berikut merupakan tujuan dan batasan dari pengukuran dampak lingkungan pada proses pengangkutan sampah di TPS 3R.

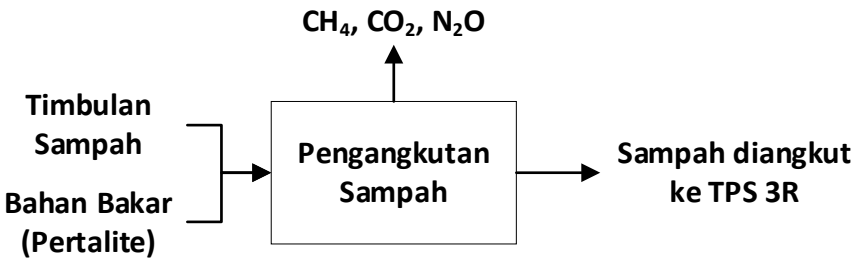
Tujuan: Mengukur nilai emisi yang dilepaskan oleh sistem pengangkutan sampah dari timbulan sampah ke TPS 3R.

Batasan:

1. Pengangkutan hanya dilakukan dari timbulan sampah dari area yang dicakup oleh TPS 3R
2. Tingkat konsumsi BBM yang diukur sesuai dengan jenis kendaraan pengangkutan yang tersedia yakni motor roda tiga
3. Jarak pengangkutan yang digunakan adalah jarak dari TPS 3R ke beberapa timbulan sampah yang tersebar dan kembali ke TPS 3R
4. *Functional unit* (Fu) yang digunakan adalah pengangkutan setiap 1 ton sampah untuk setiap 1 km dengan satuan 1 tKm

4.1.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Pengangkutan Sampah

Proses pengangkutan sampah dilakukan dengan mengangkut sampah dari timbulan sampah dalam area tercakup TPS 3R dengan radius 2 km dari TPS 3R menggunakan kendaraan motor roda tiga. Berikut merupakan *material balance* yang menggambarkan *input*-proses-*output* dari pengangkutan sampah.



Gambar 4.1 *Material Balance* Pengangkutan Sampah

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa proses pengangkutan sampah melepaskan emisi ke lingkungan berupa gas CH_4, CO_2, dan N_2O. Untuk menghitung nilai emisi dari gas yang dilepaskan oleh sistem tersebut dapat menggunakan formulasi dari IPCC (2006) sebagai berikut.

$$\text{Emisi GRK } \left(\frac{\text{kg}}{\text{tkm sampah}}\right) = \text{Konsumsi energi } \left(\frac{\text{TJ}}{\text{tkm sampah}}\right) \times \text{Faktor emisi } \left(\frac{\text{kg}}{\text{TJ}}\right) \qquad (4.1)$$

Pada persamaan 4.1 tersebut, faktor emisi bergantung pada jenis emisi yang dihitung (CH_4, CO_2, ataupun N_2O, dapat dilihat pada table 4.2) dan untuk konsumsi energi dapat dihitung dengan formulasi IPCC (2006) sebagai berikut.

$$\text{Konsumsi energi (TJ)} = \text{Konsumsi energi satuan (liter)} \times \text{Nilai kalor } \left(\frac{\text{TJ}}{\text{liter}}\right) \qquad (4.2)$$

Nilai faktor emisi pada persamaan 4.1 dan nilai kalor pada persamaan 4.2 merupakan konstanta yang ditetapkan oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) sesuai dengan jenis bahan bakar yang digunakan. Berikut merupakan data yang akan digunakan dalam menghitung nilai emisi yang dihasilkan dari proses pengangkutan sampah.

Tabel 4.1 Data Terkait Pengukuran Nilai Emisi Pengangkutan Sampah

Jenis Kendaraan: Motor Roda Tiga		
Rata-rata konsumsi energi satuan per tahun		420 liter
Konsumsi energi per km		0,33 liter/km
Kapasitas kendaraan		0,75 ton
Faktor Emisi (Pertalite)	CO_2	693 kg/TJ
	CH_4	33 kg/TJ
	N_2O	3,2 kg/TJ
Nilai Kalor (Pertalite)		0,000033 TJ/liter

Berikut merupakan perhitungan konsumsi energi dengan menggunakan persamaan 4.2.

$$\text{Konsumsi energi (TJ)} = \text{Konsumsi energi satuan (liter)} \times \text{Nilai kalor } \left(\frac{\text{TJ}}{\text{liter}}\right)$$

$$\text{Konsumsi energi (TJ)} = 420 \text{ (liter)} \times 0{,}000033 \left(\frac{\text{TJ}}{\text{liter}}\right)$$

$$\text{Konsumsi energi (TJ)} = 0{,}01386 \text{ TJ}$$

$$\text{Konsumsi energi } \left(\frac{\text{TJ}}{\text{tkm sampah}}\right) = \frac{0{,}01386 \text{ TJ}}{\text{Konsumsi/km} \times \text{Kapasitas pengangkutan}}$$

$$\text{Konsumsi energi } \left(\frac{\text{TJ}}{\text{tkm sampah}}\right) = \frac{0{,}01386 \text{ TJ}}{0{,}33 \text{ liter/km} \times 0{,}75 \text{ ton}}$$

$$\text{Konsumsi energi } \left(\frac{\text{TJ}}{\text{tkm sampah}}\right) = 0{,}056 \left(\frac{\text{TJ}}{\text{tkm sampah}}\right)$$

Selanjutnya akan dihitung nilai emisi yang dihasilkan oleh sistem pengangkutan sampah tersebut dalam tiga kategori jenis emisi yang berbeda yakni emisi gas CO_2, CH_4, dan N_2O. Berikut merupakan contoh perhitungan nilai emisi gas CO_2 yang dilepaskan oleh sistem pengangkutan sampah TPS 3R dengan menggunakan persamaan 4.1.

$$\text{Emisi GRK } \left(\frac{\text{kg}}{\text{tkm sampah}}\right) = \text{Konsumsi energi } \left(\frac{\text{TJ}}{\text{tkm sampah}}\right) \times \text{Faktor emisi } \left(\frac{\text{kg}}{\text{TJ}}\right)$$

$$\text{Emisi GRK } \left(\frac{\text{kg}}{\text{tkm sampah}}\right) = 0{,}056 \left(\frac{\text{TJ}}{\text{tkm sampah}}\right) \times 693 \left(\frac{\text{kg}}{\text{TJ}}\right)$$

$$\text{Emisi GRK } \left(\frac{\text{kg}}{\text{tkm sampah}}\right) = 38{,}808 \left(\frac{\text{kg } CO_2}{\text{tkm sampah}}\right) \text{ per tahun}$$

Berikut merupakan rekap perhitungan nilai emisi dari proses pengangkutan sampah untuk setiap jenis emisi gas yang dilepaskan oleh sistem.

Tabel 4.2 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Emisi Pengangkutan Sampah

Jenis Emisi	Konsumsi Energi	Faktor Emisi	Emisi Total
CO_2	0,056 TJ/tkm sampah	693 kg/TJ	38,808 kg CO_2/tkm sampah
CH_4		33 kg/TJ	1,848 kg CH_4/tkm sampah
N_2O		3,2 kg/TJ	0,1792 kg N_2O/tkm sampah

Data pada tabel 4.2 tersebut kemudian akan digunakan sebagai masukan dalam proses LCIA pada *software* SimaPro.

4.1.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Pengangkutan Sampah

Berikut merupakan hasil karakterisasi LCIA dari proses pengangkutan sampah menggunakan metode EPD 2007 pada SimaPro.

Se	Impact category	Unit	Total	Sampah	Gasoline, at refinery/l/US
☑	Acidification (fate not incl.)	kg SO2 eq	0,126	0,125	0,00104
☑	Eutrophication	kg PO4--- eq	0,0234	0,0233	0,000121
☑	Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	90,7	90,6	0,136
☑	Photochemical oxidation	kg NMVOC	0,2	0,198	0,00167
☑	Abiotic depletion, elements	kg Sb eq	x	x	x
☑	Abiotic depletion, fossil fuels	MJ	12,9	x	12,9
☑	Water scarcity	m3 eq	x	x	x
☑	Ozone layer depletion (ODP) (opti	kg CFC-11 eq	3,79E-11	x	3,79E-11

Gambar 4.2 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Pengangkutan Sampah

Gambar 4.2 menunjukkan nilai dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses pengangkutan sampah unutk berbagai jenis dampak lingkungan (*impact category*). Berdasarkan data pada gambar 4.2 tersebut, diketahui bahwa proses pengangkutan sampah pada TPS 3R dapat menghasilkan dampak pemanasan global (*global warming*) sebesar 90,7 kg CO_2 equivalent per ton kilometer (tKm)

pengangkutan sampah dimana nilai karakterisasi untuk pemanasan global ini akan digunakan sebagai *input* pada model sistem dinamik.

4.2 Pengukuran Dampak Lingkungan Proses Pengomposan

Berikut merupakan proses pengukuran dampak lingkungan untuk proses pengomposan pada TPS 3R.

4.2.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Proses Pengomposan

Berikut merupakan tujuan dan batasan dari pengukuran dampak lingkungan proses pengomposan di TPS 3R.

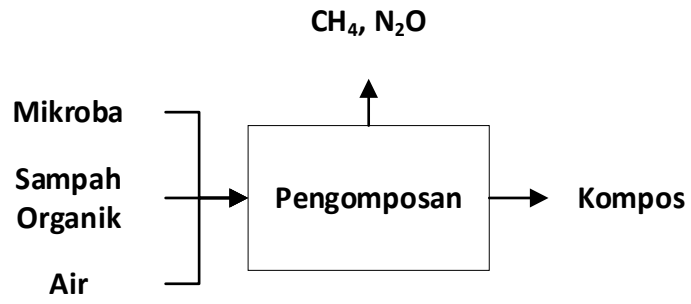
Tujuan: Mengukur nilai emisi yang dilepaskan oleh sistem pengomposan sampah pada TPS 3R.

Batasan:

1. Metode pengomposan yang dilakukan merupakan metode pengomposan secara *anaerobic digestion*
2. Komposisi mikroba dan air dalam proses pengomposan tidak diperhitungkan karena tidak berdampak pada jumlah emisi yang dilepaskan sistem
3. *Functional unit* (Fu) yang digunakan adalah pengolahan setiap 1 ton sampah

4.2.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Pengomposan

Proses pengomposan dilakukan dengan memproses sampah organik dengan mikroba tertentu untuk menghasilkan suatu pupuk kompos. Bahan baku utama dari pengomposan sendiri merupakan sampah organik seperti daun, ranting, kayu lapuk, dan sebagainya, air sebagai pengontrol kelembapan, dan mikroba sebagai pelaku proses fermentasi biologis pada sampah organik yang dikomposkan. Berikut merupakan *material balance* yang menggambarkan *input*-proses-*output* dari proses pengomposan yang dilakukan di TPS 3R.



Gambar 4.3 *Material Balance* Pengomposan

Proses pengomposan secara natural akan menghasilkan gas CH_4 dan N_2O dimana gas CH_4 dan N_2O merupakan gas emisi rumah kaca. Emisi CH_4 dan N_2O dapat dihitung menggunakan formulasi yang ditetapkan oleh IPCC. Berdasarkan IPCC (2006), emisi CH_4 dari pengomposan secara dapat dihitung dengan menggunakan formulasi berikut.

$$\text{CH4 Emissions} = [(\text{M} \times \text{EF}_{\text{CH4}}) \times 10^{-3}] - \text{R} \quad (4.3)$$

dengan,

M : masa sampah organik yang dikomposkan (kg)

EF : faktor emisi gas CH_4 yang dihasilkan per kg sampah organik (Tabel 4.4)

R : jumlah gas CH_4 yang dimanfaatkan kembali (jika ada) (kg)

Selain itu, berikut merupakan formulasi perhitungan emisi N_2O dari proses pengomposan menurut IPCC (2006).

$$\text{N2O Emissions} = (\text{M} \times \text{EF}_{\text{N2O}}) \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

dengan,

M : masa sampah organik yang dikomposkan

EF : faktor emisi gas N_2O yang dihasilkan per kg sampah organik (Tabel 4.4)

Berikut merupakan nilai faktor emisi dari masing-masing emisi gas untuk setiap jenis metode pengomposan berdasarkan IPCC (2006).

Tabel 4.3 Tetapan Faktor Emisi Pengomposan

Tipe pengomposan	**Faktor Emisi CH_4 (g CH_4/kg sampah diproses)**		**Faktor Emisi N_2O (g N_2O/kg sampah diproses**	
	Sampah kering	**Sampah basah**	**Sampah kering**	**Sampah basah**
Pengomposan tradisional	10	4	0,6	0,24
Anaerobic digestion	2	0,8	Dapat diabaikan	Dapat diabaikan

Sumber: IPCC, 2006

TPS 3R menerapkan proses pengomposan secara tradisional dan memanfaatkan gas CH_4 sebagai material dalam proses gasifikasi sampah menjadi listrik. TPS 3R menggunakan 1,5 – 2 kg gas CH_4 sebagai bahan bakar dalam proses gasifikasi sampah per harinya. Berikut merupakan perhitungan emisi gas CH_4 yang dihasilkan dalam memproses 1 ton sampah menjadi kompos dimana sampah organik yang digunakan merupakan sampah kering menggunakan persamaan 4.3.

$$\text{CH4 Emissions} = [(\text{M} \times \text{EF}_{\text{CH4}}) \times 10^{-3}] - \text{R}$$
$$\text{CH4 Emissions} = [(1000 \times 10) \times 10^{-3}] - 2$$
$$\text{CH4 Emissions} = 8 \text{ kg gas } \text{CH}_4 \text{ per 1 ton pengolahan sampah}$$

Berikut merupakan perhitungan emisi gas N_2O yang dihasilkan dalam memproses 1 ton sampah menjadi kompos menggunakan persamaan 4.4.

$$\text{N2O Emissions} = (\text{M} \times \text{EF}_{\text{N2O}}) \times 10^{-3}$$
$$\text{N2O Emissions} = (1000 \times 0{,}6) \times 10^{-3}$$
$$\text{N2O Emissions} = 0{,}6 \text{ kg gas } \text{N}_2\text{O} \text{ per 1 ton pengolahan sampah}$$

Hasil perhitungan emisi gas CH_4 dan N_2O tersebut kemudian akan di analisis lebih lanjut pada LCIA dengan menggunakan *software* SimaPro.

4.2.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Pengomposan

Berikut merupakan hasil karakterisasi LCIA dari proses pengomposan pada TPS 3R menggunakan *software* SimaPro.

Se	Impact category	Unit	Total	Kompos	113 Waste treatment,
☑	Acidification (fate not incl.)	kg SO2 eq	11,8	0,42	11,4
☑	Eutrophication	kg PO4--- eq	2,2	0,078	2,12
☑	Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	356	224	132
☑	Photochemical oxidation	kg NMVOC	0,69	0,681	0,00942
☑	Abiotic depletion, elements	kg Sb eq	5,38E-6	x	5,38E-6
☑	Abiotic depletion, fossil fuels	MJ	-1,68E4	x	-1,68E4
☑	Water scarcity	m3 eq	x	x	x
☑	Ozone layer depletion (ODP) (opti	kg CFC-11 eq	x	x	x

Gambar 4.4 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Pengomposan

Berdasarkan hasil karakterisasi dampak lingkungan pada gambar 4.4, didapatkan bahwa proses pengomposan 1 ton sampah organik pada TPS 3R dapat melepaskan emisi gas rumah kaca (*global warming*) sebesar 356 kg CO_2 equivalent dimana data ini kemudian akan digunakan sebagai *input* dalam model simulasi sistem dinamik.

4.3 Pengukuran Dampak Lingkungan Proses Gasifikasi

Berikut merupakan pengukuran dampak lingkungan dari proses gasifikasi sampah pada TPS 3R.

4.3.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Proses Gasifikasi

Berikut adalah tujuan dan batasan dari pengukuran dampak lingkungan proses gasifikasi sampah di TPS 3R.

Tujuan: Mengukur nilai emisi yang dilepaskan oleh sistem gasifikasi sampah pada TPS 3R.

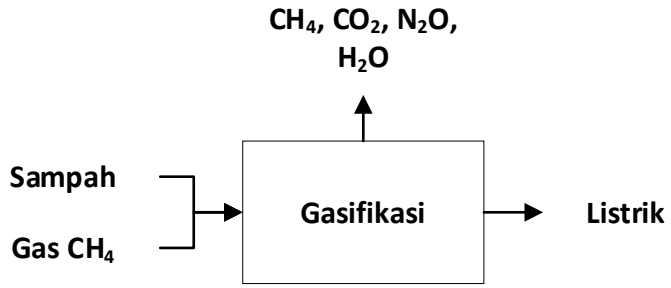
Batasan:

1. Metode gasifikasi yang dilakukan hanya menggunakan satu jenis metode yakni insinerasi sampah (*waste-to-energy*)

2. Bahan baku yang digunakan tetap yakni sampah organik (sisa bahan makanan) dan sampah non organik (plastik lunak)
3. *Functional unit* (Fu) yang digunakan adalah pengolahan setiap 1 ton sampah

4.3.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses pengolahan sampah secara termal dimana sampah akan dibakar dengan energi tertentu dan uap hasil pembakaran akan digunakan sebagai pemutar generator listrik. Gasifikasi sendiri merupakan salah satu bentuk pengolahan sampah *waste-to-energy* yang diterapkan TPS 3R dimana pengolahan sampah tersebut dapat menghasilkan listrik. Berikut merupakan *material balance* yang menggambarkan *input*-proses-*output* dari proses gasifikasi yang dilakukan oleh TPS 3R.



Gambar 4.5 *Material Balance* Gasifikasi

Proses gasifikasi secara umum dapat menghasilkan emisi berupa gas CH_4, CO_2, dan N_2O, serta uap air (H_2O) namun uap air bukan merupakan emisi yang dapat berdampak pada lingkungan sehingga kuantitas uap air yang dihasilkan tidak diperhitungkan. Untuk menghitung emisi gas yang dihasilkan oleh proses gasifikasi dapat menggunakan formulasi yang ditetapkan oleh IPCC (2006) dalam menghitung emisi gas dari insinerasi dengan faktor emisi gasifikasi. Berikut adalah perhitungan emisi untuk masing-masing jenis gas.

- Emisi CO_2

  Untuk menghitung emisi CO_2, IPCC menetapkan formulasi sebagai berikut.

$$\mathrm{CO_2\ Emission} = (\mathrm{SW} \times \mathrm{dm} \times \mathrm{CF} \times \mathrm{FCF} \times \mathrm{OF}) \times \frac{44}{12} \quad (4.5)$$

dengan,

SW : masa sampah yang akan diolah (sebelum dikeringkan) (kg)

dm : prosentase pengeringan sampah (%)

CF : *total carbon content* (%) (Tabel 4.5)

FCF : fraksi *fossil carbon* dalam *total carbon content* (%) (Tabel 4.5)

OF : faktor oksidasi (%) (Tabel 4.5)

44/12 : faktor konversi dari karbon (C) menjadi karbon dioksida (CO_2)

Berikut merupakan nilai faktor yang ditetapkan IPCC dalam menghitung emisi CO_2 pada proses insinerasi dan gasifikasi sampah.

Tabel 4.4 Tetapan Faktor Emisi CO_2 IPCC

Faktor Emisi CO_2 untuk Gasifikasi						
Parameter		**MSW (%)**	**Industrial Waste (%)**	**Clinical Waste (%)**	**Sewage Sludge (%)**	**Fossil Liquid Waste (%)**
Total carbon content		30	-	-	-	-
Fraksi *fossil carbon*		50	50	60	30	80
Faktor oksidasi	*Insinerasi* tertutup	100	100	100	100	100
	Open burning	71	-	-	-	-

Sumber: IPCC, 2006

TPS 3R mengolah jenis sampah rumah tangga atau *municipal solid waste* (MSW) dengan metode insinerasi tertutup. TPS 3R dapat mengeringkan sampah hingga menurunkan 40% kadar air dari sampah terkait sebelum dibakar. Berikut merupakan perhitungan emisi CO_2 menggunakan persamaan 4.5 untuk menghitung emisi CO_2 yang dihasilkan dari pengolahan gasifikasi 1 ton sampah.

$$\mathrm{CO_2\ Emission} = (\mathrm{SW} \times \mathrm{dm} \times \mathrm{CF} \times \mathrm{FCF} \times \mathrm{OF}) \times \frac{44}{12}$$

$$\mathrm{CO_2\ Emission} = (1000 \times 0{,}4 \times 0{,}3 \times 0{,}5 \times 1) \times \frac{44}{12}$$

$$\mathrm{CO_2\ Emission} = 220\ \mathrm{kg\ CO_2\ per\ 1\ ton\ sampah\ diolah}$$

- Emisi CH_4

  Untuk menghitung emisi CH_4, IPCC menetapkan formulasi sebagai berikut.

$$\text{CH4 Emissions} = (\text{IW}_i \times \text{EF}_i) \times 10^{-6} \quad (4.6)$$

dengan,

IW : jumlah sampah yang diproses (kg)

EF : faktor agregat emisi CH_4 (kg CH_4 per Gg sampah) (Tabel 4.6)

10^{-6} : konversi kilogram ke gigagram

i : jenis metode pengolahan sampah (pirolisis/gasifikasi/*melting*)

Berikut merupakan nilai faktor emisi dari CH_4 yang ditetapkan oleh IPCC dalam memproses pembakaran sampah.

Tabel 4.5 Tetapan Faktor Emisi CH_4 IPCC

Faktor Emisi CH_4 untuk Pembakaran Sampah		
Proses	**Metode**	**Faktor Emisi CH_4**
Pembakaran sampah	Pirolisis (300 ~ 600 °C)	5,81 kg CH_4/Gg sampah
	Gasifikasi (700 ~ 900 °C)	9,70 kg CH_4/Gg sampah
	Melting (1300 ~ 1700 °C)	5,40 kg CH_4/Gg sampah

Sumber: IPCC, 2006

TPS 3R melakukan proses pembakaran sampah menjadi listrik dengan menggunakan metode gasifikasi dengan bahan pembakaran berasal dari gas metana yang dihasilkan pada proses pengomposan. Berikut merupakan perhitungan emisi CH_4 yang dihasilkan pada proses gasifikasi 1 ton sampah menggunakan persamaan 4.6.

$$\text{CH4 Emissions} = (\text{IW}_i \times \text{EF}_i) \times 10^{-6}$$

$$\text{CH4 Emissions} = (1000 \text{ kg} \times 9{,}70 \text{ kg } \text{CH}_4 \text{ per Gg sampah}) \times 10^{-6}$$

$$\text{CH4 Emissions} = 9{,}7 \times 10^{-3} \text{ kg } \text{CH}_4 \text{ per 1 ton pengolahan sampah}$$

- Emisi N_2O

  Untuk menghitung emisi N_2O, IPCC menetapkan formulasi sebagai berikut.

$$\text{N2O Emissions} = (\text{IW}_i \times \text{EF}_i) \times 10^{-6} \quad (4.7)$$

dengan,

IW : jumlah sampah yang diproses (kg)

EF : faktor agregat emisi N_2O (kg N_2O per Gg sampah) (Tabel 4.7)

10^{-6} : konversi kilogram ke gigagram

i : jenis metode pengolahan sampah (pirolisis/gasifikasi/*melting*)

Berikut merupakan nilai faktor emisi dari N_2O yang ditetapkan oleh IPCC dalam memproses pembakaran sampah.

Tabel 4.6 Tetapan Faktor Emisi N_2O IPCC

Faktor Emisi N_2O untuk Pembakaran Sampah		
Proses	**Metode**	**Faktor Emisi N_2O**
Pembakaran sampah	Pirolisis (300 ~ 600 °C)	17,4 kg N_2O/Gg sampah
	Gasifikasi (700 ~ 900 °C)	5,80 kg N_2O/Gg sampah
	Melting (1300 ~ 1700 °C)	8,38 kg N_2O/Gg sampah

Sumber: IPCC, 2006

Berikut merupakan perhitungan emisi N_2O yang dihasilkan pada proses gasifikasi 1 ton sampah menggunakan persamaan 4.7.

$$\text{N2O Emissions} = (\text{IW}_i \times \text{EF}_i) \times 10^{-6}$$

$$\text{N2O Emissions} = (1000 \text{ kg} \times 5{,}80 \text{ kg } \text{N}_2\text{O per Gg sampah}) \times 10^{-6}$$

$$\text{N2O Emissions} = 5{,}8 \times 10^{-3} \text{ kg } \text{N}_2\text{O per 1 ton pengolahan sampah}$$

4.3.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Gasifikasi

Berikut merupakan hasil karakterisasi LCIA dari proses gasifikasi pada TPS 3R menggunakan *software* SimaPro.

Se	Impact category	Unit	Total	Listrik	116 Waste treatment,	Methane, 96% by volume {CH}
☑	Acidification (fate not incl.)	kg SO2 eq	0,273	0,282	-0,00946	3,44E-5
☑	Eutrophication	kg PO4--- eq	0,0531	0,0524	0,000676	3,09E-5
☑	Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	210	34,1	176	0,00585
☑	Photochemical oxidation	kg NMVOC	0,481	0,41	0,0709	1,34E-5
☑	Abiotic depletion, elements	kg Sb eq	3,04E-6	x	1,6E-6	1,44E-6
☑	Abiotic depletion, fossil fuels	MJ	-1,01	x	-1,04	0,0264
☑	Water scarcity	m3 eq	0,0031	x	x	0,0031
☑	Ozone layer depletion (ODP) (opti	kg CFC-11 eq	3,75E-10	x	x	3,75E-10

Gambar 4.6 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Gasifikasi

Berdasarkan hasil karakterisasi dampak lingkungan pada gambar 4.6, didapatkan bahwa proses gasifikasi 1 ton sampah pada TPS 3R dapat melepaskan emisi gas rumah kaca (*global warming*) sebesar 210 kg CO_2 equivalent dimana data ini kemudian akan digunakan sebagai *input* dalam model simulasi sistem dinamik.

4.4 Pengukuran Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah Plastik

Berikut merupakan perhitungan dampak lingkungan dari penimbunan sampah plastik pada TPS 3R.

4.4.1 Penentuan Tujuan dan Batasan pada Penimbunan Sampah Plastik

Berikut merupakan tujuan dan batasan dalam perhitungan dampak lingkungan dari penimbunan sampah plastik di TPS 3R.

Tujuan: Mengukur nilai emisi yang dilepaskan oleh sistem penimbunan sampah plastik pada TPS 3R.

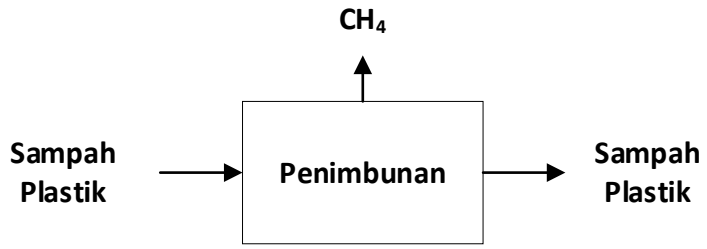
Batasan:

1. Sampah yang ditimbun merupakan sampah plastik yang telah dilakukan penge-*press*-an
2. Waktu penimbunan sampah relatif tetap yakni 7 hari

3. *Functional unit* (Fu) yang digunakan adalah penimbunan 1 ton sampah plastik

4.4.2 *Life Cycle Inventory* (LCI) Penimbunan Sampah Plastik

Penimbunan sampah plastik di TPS 3R merupakan salah satu kegiatan pengolahan sampah dengan menyortir dan menjual kembali sampah plastik yang berpotensi untuk di daur ulang. Penjualan sampah plastik ini hanya dilakukan satu minggu sekali oleh pengepul sehingga sampah plastik yang telah disortir akan disimpan sebelum dijual. Berikut merupakan *material balance* yang menunjukkan *input*-proses-*output* dari penimbunan plastik pada TPS 3R.



Gambar 4.7 *Material Balance* Penimbunan Sampah Plastik

Berdasarkan studi lingkungan yang dilakukan oleh IPCC (2006) penimbunan sampah plastik dapat menghasilkan gas metana (CH_4) dimana gas tersebut berkontribusi dalam pemanasan global. Untuk menghitung emisi CH_4 dari penimbunan sampah plastik, IPCC (2006) menetapkan formulasi sebagai berikut.

$$\mathrm{CH_4\ Emissions} = [\mathrm{CH_4\ Generated} - \mathrm{R}] \times (1 - \mathrm{OX}) \qquad (4.8)$$

dengan,

CH_4 *Generated*: jumlah CH_4 yang dihasilkan oleh sampah (Gg) (Persamaan 4.9)

R : jumlah gas CH4 dimanfaatkan kembali (Gg) (jika ada)

OX : faktor oksidasi (%) (Tabel 4.8)

Untuk menghitung jumlah potengi CH_4 yang dihasilkan (CH_4 *generated*) dapat menggunakan formulasi dari IPCC (2006) sebagai berikut.

$$\mathrm{CH_4\ Generated} = \mathrm{DDOCm}_i \times \mathrm{F} \times \frac{16}{22} \quad (4.9)$$

dengan,

DDOCm: massa DOC sampah jenis i yang terdekomposisi (Persamaan 4.10)

F : fraksi terbentuknya CH_4 (IPCC menetapkan fraksi CH_4 sebesar 50%)

16/22 : rasio berat molekul CH_4/C

DDOCm sendiri dapat dihitung menggunakan formulasi sebagai berikut.

$$\mathrm{DDOCm}_i = \mathrm{W}_i \times \mathrm{DOC}_i \times \mathrm{DOC}_f \times \mathrm{MCF} \quad (4.10)$$

dengan,

Wi : massa sampah yang ditimbun (kg)

DOCi : degradasi karbon organik untuk jenis sampah i (Tabel 4.9)

DOCf : fraksi DOC yang terdekomposisi (IPCC menetapkan fraksi sebesar 50%)

MCF : faktor koreksi metana (%) (Tabel 4.10)

Berkaitan dengan persamaan 4.8, berikut merupakan faktor oksidasi yang ditetapkan oleh IPCC (2006).

Tabel 4.7 Faktor Oksidasi Emisi CH_4 SWDS

Faktor Oksidasi Emisi CH_4 untuk *Solid Waste Disposal* (SWDS)	
Tipe Penimbunan	**Faktor Oksidasi**
Pembuangan CH_4 tidak terkontrol	0
Pembuangan CH_4 terkontrol	0,1

Sumber: IPCC, 2006

Berkaitan dengan persamaan 4.10, berikut merupakan tetapan degradasi karbon organik (DOC) untuk jenis sampah tertentu (DOCi) dan faktor koreksi metana (MCF) secara berurutan.

Tabel 4.8 DOC untuk setiap Jenis Sampah

Degradable Organic Carbon (DOC) untuk Jenis Sampah i	
Jenis Sampah	**Nilai DOCi**
Sampah kertas	0,40
Sampah tekstil	0,24
Sampah sisa makanan	0,15
Sampah kayu	0,43
Sampah kebun dan taman	0,20
Sampah diapers	0,24
Sampah karet dan kulit	0,39
Tidak terdegradasi (plastik, logam, kaca, dll)	1,00

Sumber: IPCC, 2006

Tabel 4.9 Faktor Koreksi Metana (MCF)

Faktor Koreksi Metana (MFC)	
Tipe Tempat Penimbunan	**MCF**
Terkelola – anaerobik	0,40
Terkelola – semi-anaerobik	0,24
Tidak terkelola – tumpukan sampah > 5 meter	0,15
Tidak terkelola – tumpukan sampah < 5 meter	0,43
TPA tidak terkategori	0,20

Sumber: IPCC, 2006

Untuk menghitung nilai emisi dari penimbunan sampah plastik, perlu dihitung terlebih dahulu potensi gas CH_4 yang dihasilkan oleh timbunan sampah beserta besar massa DOC yang terdekomposisi. Pada TPS 3R sendiri, penimbunan hanya dilakukan untuk sampah plastik sehingga nilai DOCi yang digunakan merupakan DOC untuk sampah tidak terdegradasi karena sampah plastik tidak dapat terdekomposisi secara alami. Selain itu, penimbunan sampah plastik di TPS 3R dikategorikan tidak terkelola dengan tumpukan sampah kurang dari 5 meter. Berdasarkan data tersebut, berikut merupakan perhitungan massa DOC yang terdekomposisi (DDOCmi) untuk penimbunan 1 ton sampah plastik menggunakan persamaan 4.10.

$$\mathrm{DDOCm}_i = \mathrm{W}_i \times \mathrm{DOC}_i \times \mathrm{DOC}_f \times \mathrm{MCF}$$

$$\mathrm{DDOCm}_i = 1000 \times 1 \times 0{,}5 \times 0{,}43$$

$$\mathrm{DDOCm}_i = 215$$

Hasil perhitungan DDOCmi ini kemudian digunakan dalam perhitungan potensi gas CH_4 yang dihasilkan, berikut merupakan perhitungan potensi gas CH_4 yang dihasilkan tersebut menggunakan persamaan 4.9.

$$\mathrm{CH_4\ Generated} = \mathrm{DDOCm}_i \times \mathrm{F} \times \frac{16}{22}$$

$$\mathrm{CH_4\ Generated} = 215 \times 0{,}5 \times \frac{16}{22}$$

$$\mathrm{CH_4\ Generated} = 78{,}18\ \mathrm{kg\ gas\ CH_4}$$

Selanjutnya dapat dihitung emisi dari gas CH4 yang dilepaskan oleh sistem penimbunan sampah plastik pada TPS 3R. Penimbunan sampah plastik di TPS 3R tidak memiliki pembuangan gas CH_4 yang terkontrol sehingga faktor oksidasi yang digunakan adalah 0. Selain itu, TPS 3R juga tidak memanfaatkan gas CH_4 yang dihasilkan oleh proses penimbunan sampah plastik. Berdasarkan data tersebut, berikut merupakan perhitungan emisi gas CH_4 yang dilepaskan oleh proses penimbunan sampah plastik di TPS 3R menggunakan persamaan 4.8.

$$\mathrm{CH_4\ Emissions} = [\mathrm{CH_4\ Generated} - \mathrm{R}] \times (1 - \mathrm{OX})$$

$$\mathrm{CH_4\ Emissions} = [78{,}18 - 0] \times (1 - 0)$$

$$\mathrm{CH_4\ Emissions} = 78{,}18\ \mathrm{kg\ gas\ CH_4\ per\ ton\ sampah\ ditimbun}$$

Perhitungan emisi gas CH_4 dari penimbunan sampah plastik tersebut kemudian akan digunakan sebagai *input* dalam LCIA dengan menggunakan *software* SimaPro.

4.4.3 *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) Penimbunan Sampah Plastik

Berikut merupakan hasil karakterisasi LCIA dari proses penimbunan sampah plastik pada TPS 3R menggunakan *software* SimaPro.

Se	Impact category	Unit	Total	Sampah Plastik	118 Waste treatment,
☑	Acidification (fate not incl.)	kg SO2 eq	0,000225	x	0,000225
☑	Eutrophication	kg PO4--- eq	2,43E-5	x	2,43E-5
☑	Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	2,37	2,19	0,179
☑	Photochemical oxidation	kg NMVOC	0,00108	0,00079	0,000286
☑	Abiotic depletion, elements	kg Sb eq	2,61E-8	x	2,61E-8
☑	Abiotic depletion, fossil fuels	MJ	0,63	x	0,63
☑	Water scarcity	m3 eq	x	x	x
☑	Ozone layer depletion (ODP) (opti	kg CFC-11 eq	x	x	x

Gambar 4.8 Hasil Karakterisasi Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah Plastik

Berdasarkan hasil karakterisasi dampak lingkungan pada gambar 4.8, didapatkan bahwa proses penimbunan 1 ton sampah plastik pada TPS 3R dapat melepaskan emisi gas rumah kaca (*global warming*) sebesar 2,37 kg CO_2 equivalent dimana data ini kemudian akan digunakan sebagai *input* dalam model simulasi sistem dinamik.

4.5 Rekapitulasi Perhitungan Dampak Lingkungan

Data perhitungan dampak lingkungan yang telah dilakukan pada sub-bab 4.1 hingga 4.4 akan digunakan sebagai masukan dalam model simulasi sistem dinamik untuk pengukuran besar emisi yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R secara keseluruhan. Berikut merupakan rekapitulasi dari perhitungan dampak lingkungan berupa emisi gas rumah kaca yang akan digunakan sebagai masukan dalam model simulasi sistem dinamik.

Tabel 4.10 Rekapitulasi Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) TPS 3R

No	Sistem	Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)
1	Pengangkutan sampah	90,7 kg CO_2 equivalent
2	Pengomposan	356 kg CO_2 equivalent
3	Gasifikasi	210 kg CO_2 equivalent
4	Penimbunan sampah plastik	2,37 kg CO_2 equivalent

Data rekapitulasi pada tabel 4.10 tersebut kemudian akan digunakan sebagai *input* data pada variabel dampak lingkungan yang dihasilkan oleh sistem

pengolahan sampah terkait. Penjelasan lebih lanjut mengenai variabel dampak lingkungan terdapat pada sub-bab 5.4.1.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5
PERANCANGAN MODEL SIMULASI

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai rancangan model simulasi dari kondisi eksisting sistem persampahan di TPS 3R Surabaya.

5.1 Gambaran Umum Kota Surabaya

Berikut merupakan gambaran umum dari objek penelitian yakni Kota Surabaya meliputi kondisi geografis dan demografi Kota Surabaya.

5.1.1 Kondisi Geografis Kota Surabaya

Surabaya merupakan salah satu kota di Indonesia yang terletak di 07°09’ – 07°21’ Lintang Selatan (LS) dan 112°36’ - 112°54’ Bujur Timur (BT). Surabaya sendiri merupakan ibukota dari provinsi Jawa Timur yang memiliki ketinggian 3 – 6 meter di atas permukaan air laut. Kota Surabaya memiliki 31 kecamatan dengan total 160 desa/kelurahan. 80% topografi Kota Surabaya merupakan dataran rendah dengan ketinggian 3 – 6 meter di atas permukaan air laut dan 20% sisanya merupakan perbukitan dengan gelombang rendah yang memiliki ketinggian hingga 30 meter di atas permukaan air laut. Secara administratif, berikut merupakan batas dari Kota Surabaya.

Batas Utara : Selat Madura
Batas Timur : Selat Madura
Batas Selatan : Kabupaten Sidoarjo
Batas Barat : Kabupaten Gresik

5.1.2 Demografi Kota Surabaya

Kota Surabaya termasuk ke dalam kategori kota metropolitan dengan jumlah penduduk pada akhir 2019 sebanyak 3.158.943 jiwa dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 2,07 % per tahun (BPS, 2019). Pada tahun yang sama, jumlah Kepala Keluarga (KK) di Surabaya sendiri mencapai 631.788 KK. Surabaya memiliki luas wilayah sebesar 33.306,30 Ha dengan kepadatan penduduk sebesar

9.497 penduduk/km^2. Berikut merupakan rincian dari perkembangan jumlah penduduk Kota Surabaya selama sepuluh tahun terakhir.

Tabel 5.1 Rincian Jumlah Penduduk Surabaya

Tahun	Jumlah Penduduk
2009	2.938.225
2010	2.929.528
2011	3.024.319
2012	3.125.576
2013	3.200.454
2014	2.853.661
2015	2.943.528
2016	3.016.653
2017	3.074.883
2018	3.094.723
2019	3.158.943

Sumber: (BPS, 2019)

Berdasarkan data pada tabel 5.1 diketahui bahwa jumlah penduduk Surabaya relatif bersifat fluktuatif namun memiliki tendensi atau kecenderungan untuk meningkat. Proyeksi jumlah penduduk pada tahun 2020 adalah sebesar 3.224.333 jiwa dimana memiliki kecenderungan meningkat untuk tahun berikutnya.

5.2 Identifikasi Sistem Persampahan Surabaya

Surabaya telah memiliki sistem pengelolaan sampah yang telah diatur dan dijalankan oleh Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Surabaya. Pada tahun 2020, Surabaya memiliki fasilitas pengolahan sampah berupa TPS 3R sejumlah 28 TPS 3R yang tersebar di beberapa lokasi di Surabaya serta satu TPA yang berlokasi di Benowo, Surabaya Barat. TPS 3R sendiri memiliki fasilitas pengolahan sampah berupa pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran plastik sedangkan pada TPA Benowo terdapat fasilitas pengolahan sampah berupa *sanitary landfill*, insinerasi dan PLTSa, pengomposan, dan pengolahan air lindi. Untuk mengetahui kondisi eksisting pengolahan sampah Surabaya dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder dari penelitian yang relevan serta wawancara dengan pihak DKP Surabaya.

5.2.1 Kondisi Eksisting Pengolahan Sampah Surabaya

Skema pengelolaan sampah di Surabaya terdapat pada gambar 2.4 dimana pengelolaan sampah di Surabaya terbagi ke dalam tiga fase yakni timbulan sampah, *intermediate treatment*, dan pembuangan akhir. Tahap timbulan sampah mencakup pembentukan sampah dari penduduk hingga proses pengumpulan dan pengangkutan sampah ke TPS dan/atau TPS 3R. Pengumpulan sampah dilakukan oleh pihak DKP Surabaya melalui penyebaran tempat sampah pada setiap kampung di Surabaya dan kemudian dikumpulkan dan diangkut ke TPS secara rutin dimana selanjutnya sampah akan diolah lebih lanjut pada tahap *intermediate treatment*. Tahap *intermediate treatment* mencakup penyimpanan sampah pada TPS dan pengolahan sampah pada TPS 3R. Penyimpanan sampah dilakukan pada TPS untuk area yang tidak tercakup TPS 3R dan untuk area yang tercakup TPS 3R, sampah akan diolah dalam proses pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran plastik. Tahap terakhir merupakan fase pembuangan akhir dimana sampah akan dikirimkan ke TPA Benowo untuk dilakukan proses penghancuran sampah dengan *landfill*, insinerasi, dan sebagainya.

5.2.1.1 Timbulan Sampah

Surabaya pada tahun 2019 memproduksi sampah hingga 2.394 ton/hari yang didominasi oleh sampah rumah tangga. Pada tahun yang sama, timbulan sampah di Surabaya sendiri mencapai 0,75 kg sampah per orang per hari. Tabel 5.2 berikut menunjukkan rincian timbulan sampah di Kota Surabaya dalam empat tahun terakhir.

Tabel 5.2 Timbulan Sampah Surabaya

Tahun	Timbulan Sampah per hari (kg)	Jumlah penduduk (jiwa)	Produksi sampah per kapita
2016	1.786.000	3.016.653	0,59 kg/orang/hari
2017	2.091.000	3.074.883	0,68 kg/orang/hari
2018	2.252.000	3.094.723	0,72 kg/orang/hari
2019	2.394.000	3.158.943	0,75 kg/orang.hari

Proses pengumpulan sampah sendiri diawali dari penyebaran tempat sampah yang disediakan oleh pihak DKP Surabaya pada masing-masing

kelurahan di Surabaya. Berdasarkan hasil wawancara dengan pihak DKP Surabaya, setiap kelurahan di Surabaya mendapatkan sekitar 50 tempat sampah yang kemudian oleh masing-masing kelurahan akan disebarkan ke beberapa titik pada area kelurahan tersebut. Pengumpulan sampah sendiri umumnya dikelola oleh masing-masing RT/RW untuk mengumpulkan sampah dari masyarakat ke tempat penyimpanan sampah sementara dengan menggunakan gerobak. Selanjutnya, sampah akan diangkut oleh pihak DKP Surabaya menuju TPS 3R menggunakan motor roda tiga (tossa) dengan kapasitas hingga 0,75 ton atau 3-4 tempat sampah setiap kali angkut. Frekuensi pengambilan sampah dilakukan per hari.

5.2.1.2 Pengangkutan Sampah

DKP Surabaya memiliki beberapa jenis armada pengangkutan sampah untuk mengangkut sampah dari TPS/TPS 3R menuju TPA Benowo yakni *compactor truck, armroll truck* masing-masing berukuran $6m^3$, $8m^3$, dan $14m^3$, serta *dump truck*. Penggunaan armada ini dipilih berdasarkan kapasitas pengangkutan dimana satu jenis truk akan melayani satu rute pengangkutan dari TPS/TPS 3R tertentu secara rutin. Selain berdasarkan kapasitas pengangkutan, pemilihan armada juga didasari oleh rata-rata banyaknya jumlah sampah yang terkumpul di TPS/TPS 3R per hari-nya. Jumlah ritase pengangkutan sampah berbeda-beda disesuaikan dengan jumlah sampah yang terkumpul pada TPS/TPS 3R. Ritase rata-rata yang dilakukan oleh pihak DKP Surabaya dalam mengangkut sampah ke TPA Benowo adalah sekitar 1-4 kali sehari. Untuk pengangkutan dari timbulan sampah ke TPS dan TPS 3R, DKP Surabaya menggunakan armada lain yakni gerobak sampah dan sepeda motor roda tiga (tossa). Ritase pengangkutan dari timbulan sampah menuju TPS/TPS 3R rata-rata sekitar 1-2 kali sehari.

5.2.2 TPS 3R Surabaya

TPS 3R atau Tempat Pengolahan Sampah *Reduce, Reuse,* dan *Recycle* (3R) merupakan salah satu fasilitas pengolahan sampah yang dimiliki oleh Pemerintah

Kota Surabaya dalam rangka mengurangi volume sampah yang masuk ke TPA Benowo. Tujuan dari pembangunan TPS 3R ini adalah untuk mengurangi volume sampah yang masuk ke TPA Benowo dengan mengolah sampah jenis tertentu sebelum diangkut ke TPA Benowo sehingga TPA Benowo tidak langsung menerima sampah dari masyarakat namun menerima residu/sisa sampah yang telah diolah. DKP Surabaya menetapkan standar bahwa TPS 3R harus setidaknya berkapasitas minimal 400 KK atau dengan radius cakupan area pengumpulan sampah sejauh 1,5 kilometer. Pada tahun 2020, Surabaya memiliki 28 TPS 3R yang tersebar di beberapa titik di Surabaya dimana 23 diantaranya merupakan rumah kompos dan 3 diantaranya merupakan Pusat Daur Ulang (PDU). Rumah kompos sendiri hanya melakukan pengolahan sampah organik menjadi pupuk kompos dan gasifikasi sampah menjadi listrik sedangkan PDU melakukan tiga jenis pengolahan sampah yakni pengomposan sampah organik, gasifikasi, dan penyortiran sampah plastik. Untuk penjelasan mekanisme pengolahan sampah pada TPS 3R secara rinci dapat dilihat pada gambar 2.5. Tabel 5.3 berikut merupakan rincian data pengelolaan sampah pada keseluruhan TPS 3R yang ada di Surabaya.

Tabel 5.3 Rincian Data Pengolahan Sampah TPS 3R Surabaya

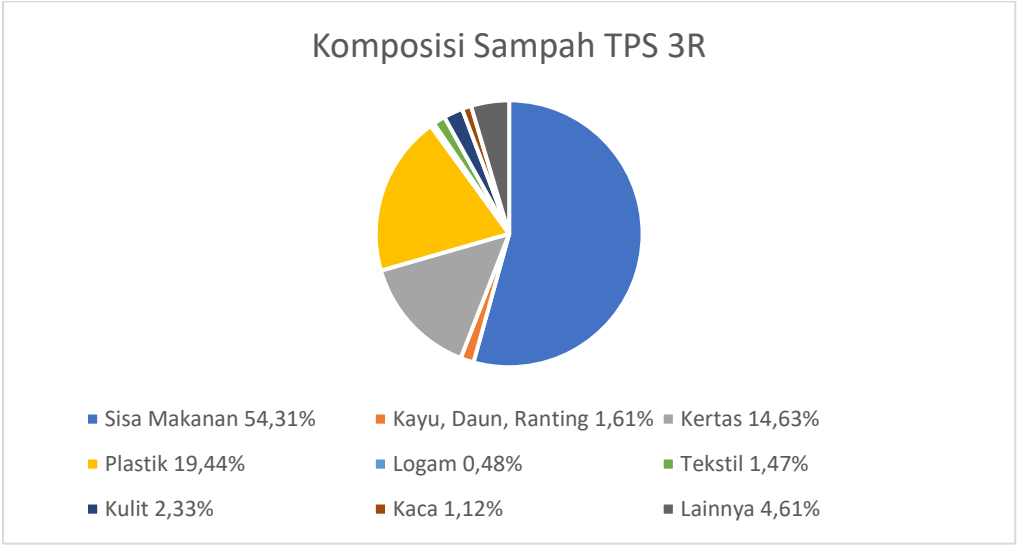
TPS 3R	Area	Jenis TPS	Rata-rata Sampah Masuk per hari (ton)	Rata-rata Sampah Diolah		Rata-rata Sampah Diangkut ke TPA	
				Ton	%	Ton	%
Babat Jerawat	Surabaya Barat	RK	9,72	3,11	32%	6,61	68%
Karangpoh		RK	6,25	2,13	34%	4,13	66%
Sono Kwijenan		RK	8,81	2,55	29%	6,26	71%
Babatan		RK	9,01	2,97	33%	6,04	67%
Putat Jaya		RK	6,73	2,22	33%	4,51	67%
Jajar Tunggal	Surabaya Selatan	RK	9,10	3,09	34%	6,01	66%
Balas Klumprik		RK	10,59	3,49	33%	7,10	67%
Bibis Karah		RK	5,54	1,88	34%	3,66	66%
Karah		RK	10,38	3,22	31%	7,16	69%
Jambangan		PDU	10,30	4,84	47%	5,46	53%
Gayungan		RK	10,86	3,26	30%	7,60	70%
Jemursari	Surabaya Timur	RK	10,43	3,02	29%	7,41	71%
Tenggilis		RK	9,77	2,93	30%	6,84	70%
Rungkut		RK	10,31	3,09	30%	7,22	70%
Rungkut Asri		RK	7,88	2,60	33%	5,28	67%
Wonorejo		PDU	10,70	4,71	44%	5,99	56%
Wonorejo		RK	9,65	3,09	32%	6,56	68%
Keputih		RK	9,21	2,58	28%	6,63	72%
Semolowaru		RK	9,95	3,08	31%	6,87	69%
Keputih Tegal		RK	6,70	2,08	31%	4,62	69%

Tabel 5.3 Rincian Data Pengolahan Sampah TPS 3R Surabaya (Lanjutan)

TPS 3R	Area	Jenis TPS	Rata-rata Sampah Masuk per hari (ton)	Rata-rata Sampah Diolah		Rata-rata Sampah Diangkut ke TPA	
				Ton	%	Ton	%
Sutorejo	Surabaya Utara	RK	8,94	2,59	29%	6,35	71%
Bulak		RK	10,56	3,59	34%	6,97	66%
Tambak Wedi		RK	10,73	3,43	32%	7,30	68%
Keputran	Surabaya Pusat	RK	11,21	3,48	31%	7,73	69%
Bratang		PDU	9,64	4,43	46%	5,21	54%
Bratang		RK	7,41	2,37	32%	5,04	68%
Srikana		RK	9,40	3,01	32%	6,39	68%
Sukodami		RK	10,21	3,37	33%	6,84	67%
Total			**259,99**	**86,23**	**-**	**173,75**	**-**
Rata-rata			**10,2**	**-**	**-**	**-**	**-**

Keterangan: RK adalah Rumah Kompos dan PDU adalah Pusat Daur Ulang
Sumber: DKP Surabaya, 2019

Pada TPS 3R berjenis rumah kompos rata-rata dapat mengolah sampah sebesar 2,34 ton sampah per hari dan TPS 3R berjenis PDU rata-rata dapat mengolah sampah hingga 4,59 ton sampah per hari dimana rata-rata sampah yang masuk pada TPS 3R baik rumah kompos ataupun PDU adalah sebanyak 10,2 ton per harinya. Baik rumah kompos ataupun PDU belum dapat mengolah sampah diatas 50% sampah yang masuk karena keterbatasan kapasitas dan metode pengolahan. Gambar 5.1 berikut menunjukkan rata-rata komposisi sampah yang masuk ke TPS 3R per hari-nya.



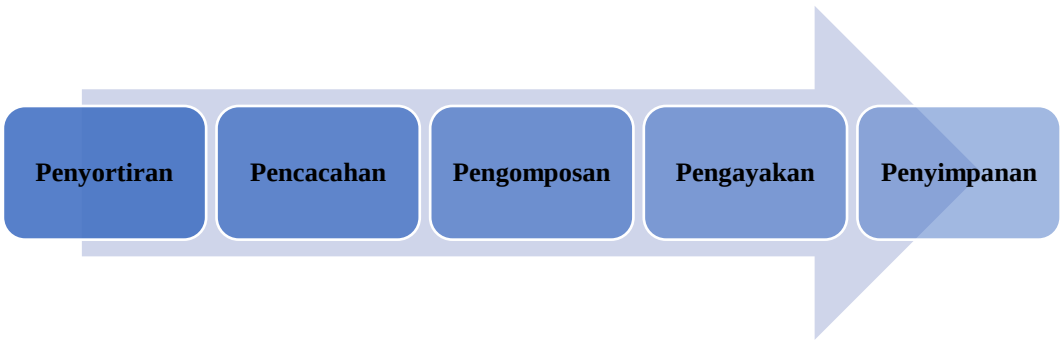
Gambar 5.1 Komposisi Sampah TPS 3R
Sumber: (SIPSN, 2020)

Berdasarkan gambar 5.1, komposisi sampah terbesar berasal dari sisa makanan sebesar 54,31% dimana sampah jenis tersebut merupakan sampah organik dan dapat dikomposkan. Komposisi sampah terbesar kedua yakni sampah jenis plastik sebesar 19,44% dan diikuti oleh sampah jenis kertas sebesar 14,63%. TPS 3R berjenis PDU baik PDU Jambangan, Bratang, ataupun Wonorejo mampu mengolah sampah dengan metode pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran sampah plastik. Untuk pengomposan sendiri sampah yang digunakan adalah sampah sisa makanan, gasifikasi dengan bahan baku sampah kertas serta kayu, daun, ranting, dan penyortiran sampah plastik dengan bahan baku sampah plastik.

Pada TPS 3R sendiri melakukan tiga jenis aktivitas pengolahan sampah yakni pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran sampah plastik. Berikut merupakan penjelasan rinci dari setiap aktivitas pengolahan sampah yang dilakukan di TPS 3R.

5.2.2.1 Pengomposan

Pengomposan merupakan proses pengolahan sampah organik menjadi pupuk kompos. Di TPS 3R, metode pengomposan yang digunakan adalah pengomposan anaerobik dimana pengomposan dilakukan secara tertutup sehingga proses fermentasi/pembusukan tidak dipengaruhi oleh udara terbuka atau oksigen. Proses pengomposan anaerobik ini kemudian akan menghasilkan gas metana (CH_4) dimana gas ini kemudian akan digunakan dalam proses gasifikasi untuk pembangkitan listrik skala kecil. Berikut merupakan alur dari proses pengomposan yang dilakukan di TPS 3R.



Gambar 5.2 Mekanisme Pengomposan di TPS 3R

Berdasarkan gambar 5.2, berikut merupakan rincian proses pengomposan di TPS 3R.

1. Penyortiran – merupakan proses pemilahan sampah sesuai dengan jenis sampah yang dapat dikomposkan ataupun yang tidak dapat dikomposkan. Untuk sampah yang dikomposkan umumnya berjenis daun, ranting, kertas, dan sampah organik lainnya.
2. Pencacahan – merupakan proses mencacah sampah sehingga bentuk fisik sampah menjadi lebih halus. Hal ini dilakukan agar mempermudah proses fermentasi/pembusukan.
3. Pengomposan – merupakan proses fermentasi yang dilakukan selama 14 hari. Proses pengomposan yang dilakukan dengan menggunakan metode pengomposan anaerobik dimana pengomposan dilakukan pada media tertutup sehingga terbentuk gas metana (CH_4). Skema proses pengomposan anaerobik dapat dilihat pada gambar 2.3.
4. Pengayakan – merupakan proses penyaringan kompos yang telah difermentasi sehingga kompos yang dihasilkan lebih halus dan siap untuk digunakan sebagai pupuk.
5. Penyimpanan – terbagi ke dalam dua bagian yakni penyimpanan kompos yang akan digunakan oleh warga setempat dan penyimpanan kompos yang akan dijual. Untuk kompos yang akan digunakan oleh warga akan disimpan dalam karung sedangkan kompos yang akan dijual dikemas dalam kemasan plastik siap jual.

Pada TPS 3R sendiri baik rumah kompos ataupun PDU, dalam sehari dapat menerima sekitar 1,5 – 3 ton sampah yang dapat dikomposkan sedangkan kapasitas pengomposan pada rumah kompos ataupun PDU hanya sebesar 1,5 – 2,5 ton. Sebagai penjelasan lebih lanjut, berikut merupakan kapasitas pengomposan dari masing-masing TPS 3R di Surabaya.

Tabel 5.4 Data Pengomposan TPS 3R Surabaya

TPS 3R	Area	Jenis TPS	Rata-rata pengolahan Sampah per hari			
			Sampah Masuk (ton)	Sampah diolah (ton)	Sampah dikomposkan (ton)	Kapasitas komposter (ton)
Babat Jerawat	Surabaya Barat	RK	9,72	3,11	1,87	1,5
Karangpoh		RK	6,25	2,13	1,28	1,5
Sono Kwijenan		RK	8,81	2,55	1,53	1,5
Babatan		RK	9,01	2,97	1,78	1,5
Putat Jaya		RK	6,73	2,22	1,33	1,5
Jajar Tunggal	Surabaya Selatan	RK	9,10	3,09	1,85	1,5
Balas Klumprik		RK	10,59	3,49	2,09	1,5
Bibis Karah		RK	5,54	1,88	1,13	1,5
Karah		RK	10,38	3,22	1,93	1,5
Jambangan		PDU	10,30	4,84	2,90	2,5
Gayungan		RK	10,86	3,26	1,96	2,0
Jemursari	Surabaya Timur	RK	10,43	3,02	1,81	1,5
Tenggilis		RK	9,77	2,93	1,76	2,0
Rungkut		RK	10,31	3,09	1,85	1,5
Rungkut Asri		RK	7,88	2,60	1,56	1,5
Wonorejo		PDU	10,70	4,71	2,83	2,5
Wonorejo		RK	9,65	3,09	1,85	1,5
Keputih		RK	9,21	2,58	1,55	1,5
Semolowaru		RK	9,95	3,08	1,85	1,5
Keputih Tegal		RK	6,70	2,08	1,25	1,5
Sutorejo		RK	8,94	2,59	1,55	1,5
Bulak	Surabaya Utara	RK	10,56	3,59	2,15	2,0
Tambak Wedi		RK	10,73	3,43	2,06	2,0
Keputran	Surabaya Pusat	RK	11,21	3,48	2,09	2,0
Bratang		PDU	9,64	4,43	2,66	2,5
Bratang		RK	7,41	2,37	1,42	1,5
Srikana		RK	9,40	3,01	1,81	1,5
Sukodami		RK	10,21	3,37	2,02	1,5
Total			**259,99**	**86,23**	**51,73**	**-**
Rata-rata			**10,2**	**-**	**-**	**-**

Berdasarkan data pada tabel 5.4 tersebut, dapat diketahui bahwa rata-rata TPS 3R memiliki kapasitas yang lebih kecil dibandingkan dengan jumlah sampah yang dapat dikomposkan per harinya. Sampah dikomposkan yang tidak dapat diolah karena keterbatasan kapasitas akan langsung dikirimkan ke TPA Benowo dimana hal ini dapat meningkatkan jumlah sampah yang diangkut ke TPA tersebut.

5.2.2.2 Gasifikasi

Gasifikasi sampah yang dilakukan di TPS 3R merupakan proses pembakaran sampah dalam skala kecil dimana uap panas dari pembakaran

sampah tersebut digunakan sebagai penggerak turbin generator listrik. Jenis sampah yang dibakar dalam proses gasifikasi ini umumnya daun, kayu, ranting, kertas, plastik, hingga sampah organik seperti sisa makanan. Pada TPS 3R, proses gasifikasi ini berkaitan dengan pengomposan dimana pembakaran sampah dilakukan dengan bahan bakar gas metana (CH_4) yang dihasilkan pada saat proses pengomposan anaerobik dilakukan. Sebagai penjelasan lebih lanjut, berikut merupakan alur dari proses gasifikasi yang dilakukan pada TPS 3R.

Gambar 5.3 Mekanisme Gasifikasi Sampah di TPS 3R

Berdasarkan gambar 5.3 tersebut, berikut merupakan rincian mekanisme gasifikasi pada TPS 3R.

1. Pengeringan – proses pengurangan kadar air yang terdapat dalam sampah sehingga sampah akan lebih mudah terbakar. Pengeringan sampah ini dilakukan pada mesin pengering khusus dan hanya dilakukan untuk sampah jenis tertentu yang masih memiliki kadar air yang relatif tinggi.
2. Pembakaran – proses pembakaran sampah untuk menghasilkan uap panas yang akan digunakan sebagai penggerak generator listrik. Pembakaran ini dilakukan pada tungku khusus yang telah disambungkan dengan generator listrik. Bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran ini adalah gas metana (CH_4) yang dihasilkan dari proses pengomposan anaerobik sebelumnya.

3. Produksi listrik – uap hasil pembakaran akan langsung disalurkan ke generator listrik dan secara otomatis akan memutar generator listrik sehingga listrik dapat diproduksi.
4. Penyimpanan dan penyaluran listrik – listrik yang telah diproduksi akan disimpan dalam gardu induk pembangkit listrik dan listrik tersebut akan dipergunakan sebagai operasional TPS 3R. Kedepannya, DKP Surabaya berencana untuk meningkatkan kapasitas produksi listrik sehingga listrik dapat disalurkan kepada penduduk sekitar TPS 3R.

Pada TPS 3R sendiri, baik rumah kompos ataupun PDU memiliki pembangkit listrik tenaga sampah berskala kecil dengan kapasitas produksi hingga 4 kilowatt dengan kapasitas pengolahan sampah hingga 1 ton sampah per hari.

Tabel 5.5 Data Gasifikasi TPS 3R Surabaya

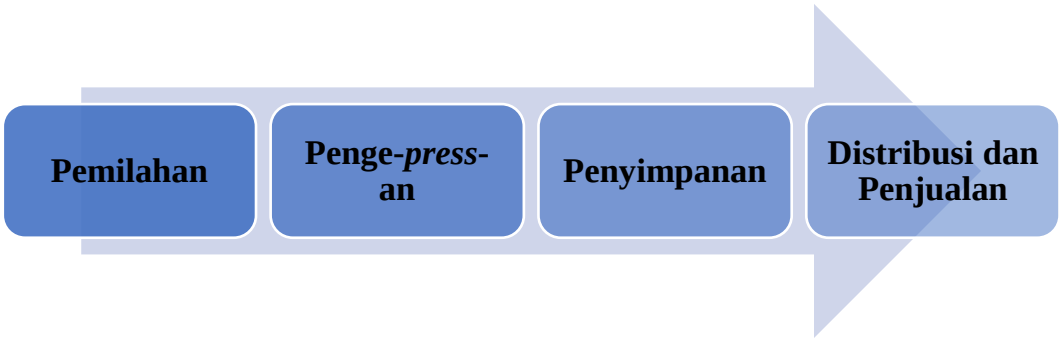
TPS 3R	Area	Jenis TPS	Rata-rata pengolahan Sampah per hari		
			Sampah Masuk (ton)	Sampah diolah (ton)	Sampah gasifikasi (ton)
Babat Jerawat	Surabaya Barat	RK	9,72	3,11	1,00
Karangpoh		RK	6,25	2,13	0,93
Sono Kwijenan		RK	8,81	2,55	1,00
Babatan		RK	9,01	2,97	1,00
Putat Jaya		RK	6,73	2,22	0,98
Jajar Tunggal	Surabaya Selatan	RK	9,10	3,09	0,82
Balas Klumprik		RK	10,59	3,49	1,00
Bibis Karah		RK	5,54	1,88	0,92
Karah		RK	10,38	3,22	1,00
Jambangan		PDU	10,30	4,84	0,97
Gayungan		RK	10,86	3,26	0,97
Jemursari	Surabaya Timur	RK	10,43	3,02	1,00
Tenggilis		RK	9,77	2,93	1,00
Rungkut		RK	10,31	3,09	1,00
Rungkut Asri		RK	7,88	2,60	0,97
Wonorejo		PDU	10,70	4,71	1,00
Wonorejo		RK	9,65	3,09	1,00
Keputih		RK	9,21	2,58	1,00
Semolowaru		RK	9,95	3,08	0,92
Keputih Tegal		RK	6,70	2,08	0,81
Sutorejo		RK	8,94	2,59	1,00
Bulak	Surabaya Utara	RK	10,56	3,59	0,92
Tambak Wedi		RK	10,73	3,43	0,93
Keputran	Surabaya Pusat	RK	11,21	3,48	1,00
Bratang		PDU	9,64	4,43	0,89
Bratang		RK	7,41	2,37	0,95

Tabel 5.5 Data Gasifikasi TPS 3R Surabaya (Lanjutan)

TPS 3R	Area	Jenis TPS	Rata-rata pengolahan Sampah per hari		
			Sampah Masuk (ton)	Sampah diolah (ton)	Sampah gasifikasi (ton)
Srikana		RK	9,40	3,01	1,00
Sukodami		RK	10,21	3,37	0,98
Total			**259,99**	**86,23**	**31,71**
Rata-rata			**10,2**	**-**	**-**

5.2.2.3 Penyortiran Sampah Plastik

Penyortiran sampah plastik merupakan kegiatan pemilahan sampah plastik yang masih memiliki nilai ekonomis untuk kemudian disimpan dan dijual ke pengepul. Pada dasarnya, kegiatan penyortiran sampah plastik ini merupakan kegiatan yang dilakukan untuk menunjang operasional dari TPS 3R itu sendiri dimana hasil penjualan sampah plastik tersebut digunakan untuk membiayai operasional TPS 3R. Berikut merupakan alur dari proses penyortiran sampah plastik pada TPS 3R.



Gambar 5.4 Mekanisme Penyortiran Sampah Plastik di TPS 3R

Berdasarkan gambar 5.4 tersebut, berikut rincian dari proses penyortiran sampah plastik di TPS 3R.

1. Pemilahan – proses ini dilakukan untuk memilah sampah plastik sesuai dengan jenisnya. Sampah plastik pada TPS 3R akan dikelompokkan dalam dua kategori yakni sampah plastik keras yakni sampah plastik yang memiliki karakteristik keras seperti botol plastik, gelas plastik, dan sebagainya serta sampah plastik lunak yakni sampah plastik yang memiliki karakteristik lunak seperti kemasan produk.

2. Penge-*press*-an – merupakan proses penekanan sampah plastik sehingga sampah plastik akan bersifat lebih keras dan kadar air berkurang. Penge-*press*-an ini juga dilakukan untuk mempermudah proses penyimpanan sampah.
3. Penyimpanan – penyimpanan sampah plastik yang telah di-*press* untuk menunggu didistribusikan.
4. Distribusi dan penjualan – sampah plastik yang telah disimpan kemudian akan dijual ke pengepul. Transaksi ini dilakukan dua kali dalam seminggu dan telah terjadwal. Selain dijual, sampah plastik juga dapat dikirimkan ke bank sampah ketika bank sampah meminta sampah plastik untuk di daur ulang namun umumnya hal ini relatif jarang terjadi karena bank sampah telah memiliki sistem pengumpulan sampah plastik tersendiri.

Tabel 5.6 Data Penyortiran Sampah Plastik TPS 3R Surabaya

TPS 3R	Jenis TPS	Rata-rata pengolahan Sampah per hari		
		Sampah Masuk (ton)	Sampah diolah (ton)	Sampah plastik disortir (ton)
Jambangan	PDU	10,3	4,84	0,97
Bratang		10,7	4,71	0,94
Wonorejo		9,64	4,43	0,89

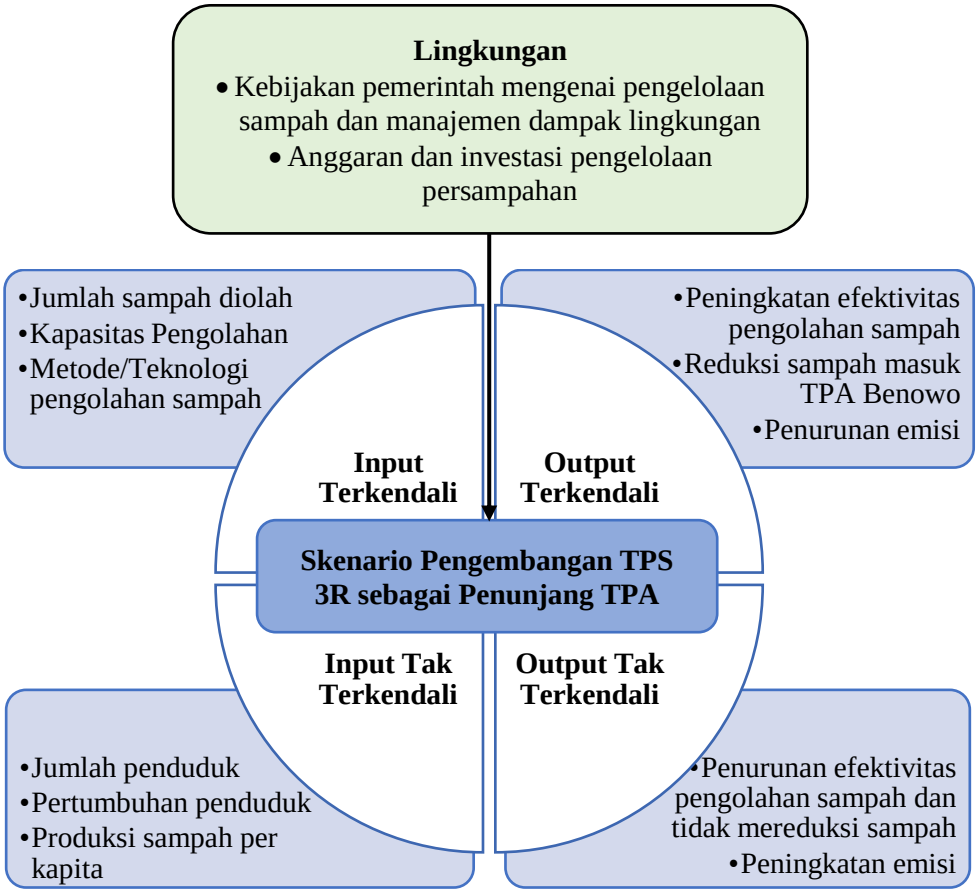
5.3 Konseptualisasi Sistem

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai konseptualisasi dari sistem eksisting yang telah dijabarkan pada sub-bab 5.2 sebelumnya ke dalam model konseptual berupa *causal loop diagram* (CLD). Sub-bab ini juga akan membahas mengenai diagram *input – output* dari penelitian yang dilakukan terhadap sistem eksisting persampahan Surabaya khususnya pengolahan sampah pada TPS 3R.

5.3.1 Diagram *Input – Output*

Diagram *input-output* dirancang untuk mendeskripsikan *input* dan *output* dari sistem persampahan sehingga dapat diketahui arah penelitian ini secara sistematis. Pada diagram *input-output* dideskripsikan apa saja *input* dan *output* terkendali dimana hal ini menyatakan variabel atau entitas yang dapat dikontrol dalam

penelitian ini serta *input* dan *output* tak terkendali yang menyatakan variabel atau entitas yang tidak dapat dikontrol dalam penelitian ini. Selain itu terdapat pengaruh dari lingkungan dimana hal tersebut merupakan faktor eksternal yang dapat berpengaruh terhadap sistem persampahan TPS 3R yang diamati. Berikut merupakan diagram *input – output* dari penelitian ini.



Gambar 5.5 Diagram *Input – Output*

Berdasarkan diagram *input-output* pada gambar 5.5, *input* terkendali merupakan permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian ini dimana *input* terkendali ini akan digunakan sebagai variabel kontrol yang dapat diubah-ubah nilai/parameternya. Namun hal tersebut juga dipengaruhi oleh *input* tak terkendali yang tidak dapat dikontrol dalam penelitian ini. Sebagai penjelasan pendukung, pada gambar 5.5 tersebut terdapat *input* terkendali berupa jumlah sampah diolah dimana hal ini dapat dikontrol dengan perubahan kapasitas pengolahan sampah namun hal tersebut dipengaruhi oleh jumlah sampah yang ada di Surabaya itu

sendiri dimana jumlah produksi sampah di Surabaya tidak dapat dikontrol oleh penelitian ini. Banyak faktor yang memengaruhi jumlah produksi sampah Surabaya seperti jumlah dan pertumbuhan penduduk hingga tingkat konsumsi masyarakat terhadap produk yang berpotensi menimbulkan sampah.

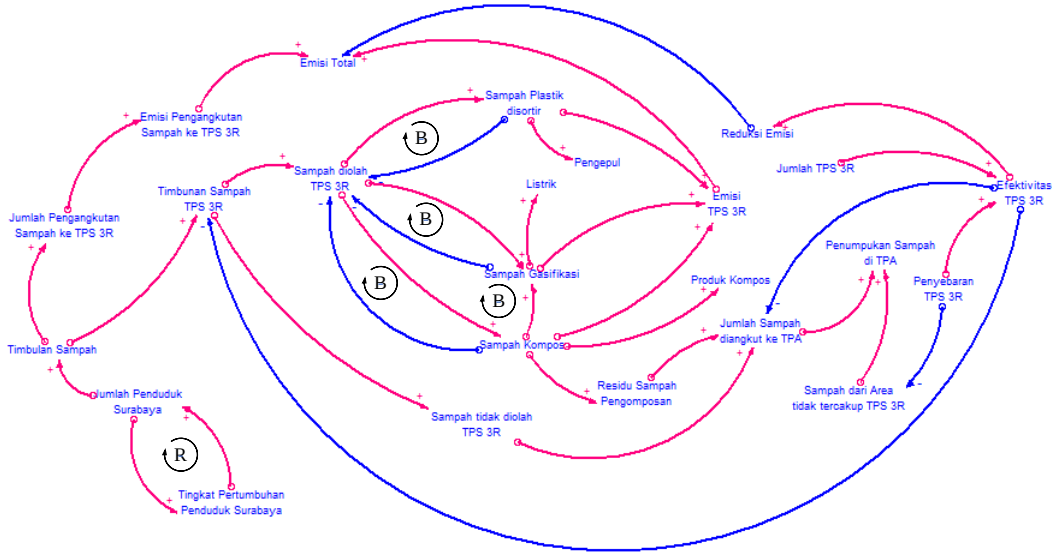
Selanjutnya, *output* merupakan hasil yang mungkin akan dihasilkan dari penelitian ini dimana terbagi kedalam dua kategori yakni *output* terkendali dan *output* tak terkendali. *Output* terkendali merupakan hasil penelitian yang diharapkan untuk dicapai atau didapatkan. Pada gambar 5.5, *output* terkendali yang diharapkan oleh penelitian ini adalah adanya peningkatan efektivitas dari pengolahan sampah sehingga dapat mereduksi jumlah sampah yang dikirimkan ke TPA Benowo serta adanya penurunan emisi gas rumah kaca yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R. Disisi lain, terdapat *output* tak terkendali yang merupakan hasil yang mungkin akan diperoleh namun tidak diharapkan dalam penelitian ini. Umumnya *output* tak terkendali ini berlawanan dengan *output* terkendali seperti pada gambar 5.5 bahwa *output* tak terkendali yang mungkin dihasilkan dari penelitian ini adalah penurunan efektivitas pengolahan sampah dimana hal tersebut akan berdampak pada jumlah sampah yang dikirimkan ke TPA Benowo tidak tereduksi dengan baik sehingga penumpukan sampah di TPA Benowo akan tetap terjadi. Selain itu, juga terdapat *output* tak terkendali berupa peningkatan emisi gas rumah kaca yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R dimana hal tersebut akan berdampak pada peningkatan suhu permukaan bumi atau lebih dikenal dengan *global warming*. *Output* tak terkendali ini harus diminimalisir karena dapat menyebabkan tidak tercapainya tujuan penelitian yang dilakukan.

Faktor lain yang dapat memengaruhi *input* dan *output* dari penelitian ini adalah faktor lingkungan dimana faktor lingkungan ini merepresentasikan faktor eksternal dari luar sistem namun dapat memengaruhi sistem persampahan TPS 3R. Dalam konteks sistem persampahan TPS 3R, pada gambar 5.5 menunjukkan bahwa faktor lingkungan yang dapat memengaruhi penelitian ini adalah adanya kebijakan pemerintah mengenai pengelolaan sampah. Kebijakan pemerintah yang dapat memengaruhi sistem persampahan itu sendiri umumnya diatur oleh pemerintah daerah setempat. Pada sistem persampahan TPS 3R di Surabaya, kebijakan pemerintah yang dapat memengaruhi sistem pengelolaan sampah di TPS 3R

umumnya berupa kebijakan terkait dengan anggaran biaya pengelolaan sampah serta kebijakan mengenai dampak lingkungan dari pengelolaan sampah terkait.

5.3.2 *Causal Loop Diagram* (CLD)

CLD merupakan model konseptual yang dibuat berdasarkan hubungan kausal antar entitas pada sistem eksisting objek penelitian, dalam hal ini adalah persampahan pada TPS 3R di Surabaya. Tujuan dari pembuatan CLD ini adalah untuk mengetahui hubungan kausal antar entitas sehingga dapat diketahui bagaimana suatu entitas memengaruhi entitas lain. Selain itu, dengan dibuatnya CLD akan memudahkan dalam proses identifikasi variabel dan parameter variabel tersebut ketika dilakukan pembuatan model simulasi. Berikut merupakan CLD yang dirancang dalam penelitian ini.



Gambar 5.6 *Causal Loop Diagram* Sistem Persampahan TPS 3R

Gambar 5.6 menunjukkan model konseptual yang dirancang untuk memodelkan sistem persampahan pada TPS 3R. Variabel yang menjadi kriteria utama dalam penelitian ini adalah variabel jumlah sampah diangkut ke TPA dimana jumlah sampah ini dipengaruhi oleh sampah sisa TPS 3R dari pengomposan serta sampah yang tidak diolah oleh TPS 3R. Tujuan penelitian ini adalah untuk mereduksi variabel tersebut dimana pada CLD yang disusun, terdapat variabel

produktivitas TPS 3R yang dapat mengurangi jumlah sampah diangkut ke TPA. Hal ini menunjukkan bahwa untuk mereduksi jumlah sampah yang masuk TPA, perlu mengoptimalkan produktivitas dari TPS 3R itu sendiri. Pada CLD yang dirancang terdapat lima *loop* yakni *loop* pertumbuhan penduduk dengan populasi penduduk yang bersifat *reinforcing loop*, sampah diolah dan masing-masing pengolahan sampah yakni pengomposan, gasifikasi, dan penyortiran sampah plastik dimana masing-masing menghasilkan *balancing loop*. Model konseptual berupa CLD ini kemudian akan dipergunakan sebagai acuan dalam perancangan model simulasi yang akan dilakukan pada sub-bab 5.4.

5.4 *Stock and Flow Diagram*

Stock and flow diagram (SFD) merupakan model simulasi yang dirancang berdasarkan model konseptual. Pembuatan SFD dilakukan dengan menggunakan *software* STELLA dimana pada *software* tersebut juga akan dilakukan *running* simulasi.

5.4.1 Identifikasi Variabel

Identifikasi variabel merupakan proses mengidentifikasi keseluruhan entitas yang terkait dengan sistem persampahan pada TPS 3R di Surabaya. Proses identifikasi variabel ini dilakukan dengan melakukan studi literatur terhadap penelitian terkait yang relevan serta dengan melakukan pengamatan terhadap sistem berupa diskusi dengan pihak DKP ataupun DKRTH Surabaya. Identifikasi variabel dilakukan untuk masing-masing sub-sistem yang terkait dengan sistem persampahan. Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem timbulan sampah.

Tabel 5.7 Identifikasi Variabel Sub-sistem Timbulan Sampah

Sub-sistem Timbulan Sampah					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Jumlah Penduduk Surabaya	Total jumlah penduduk Surabaya	Jiwa	*Stock*	
2	Kelahiran	Laju kelahiran per tahun	Jiwa/tahun	*Flow*	

Tabel 5.7 Identifikasi Variabel Sub-sistem Timbulan Sampah (Lanjutan)

Sub-sistem Timbulan Sampah					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
3	Tingkat Pertumbuhan Penduduk	Prosentase peningkatan penduduk berdasarkan kelahiran	*Dimensionless*	*Converter*	
4	Kematian	Laju kematian per tahun	Jiwa/tahun	*Flow*	
5	Tingkat Kematian Penduduk	Prosentase penurunan jumlah penduduk akibat kematian	*Dimensionless*	*Converter*	
6	Pembentukan Sampah	Laju pembentukan sampah per tahun	Ton/hari	*Flow*	
7	Produksi Sampah per Kepala	Produksi sampah harian per kapia	Ton/orang/hari	*Converter*	
8	Jumlah Sampah Surabaya	Total jumlah sampah yang diproduksi masyarakat Surabaya	Ton	*Stock*	
9	Sampah Rumah Tangga	Jumlah pembentukan sampah rumah tangga per hari	Ton/hari	*Flow*	
10	Sampah Non Rumah Tangga	Jumlah pembentukan sampah non rumah tangga per hari	Ton/hari	*Flow*	
11	Prosentase Sampah RT	Prosentase sampah rumah tangga terhadap total sampah Surabaya	*Dimensionless*	*Converter*	
12	Total Sampah Rumah Tangga	Total jumlah sampah rumah tangga yang dihasilkan Surabaya	Ton	*Stock*	
13	Sampah Area TPS 3R	Laju sampah masuk ke TPS 3R	Ton/hari	*Flow*	
14	Prosentase Sampah Terakomodasi TPS 3R	Prosentase sampah yang dicakup oleh area TPS 3R terhadap total sampah	*Dimensionless*	*Converter*	
15	Sampah Area Non-TPS 3R	Laju sampah masuk ke TPS	Ton/hari	*Flow*	
16	Prosentase Area Tidak Terakomodasi TPS 3R	Prosentase area yang tidak dicakup oleh TPS 3R	*Dimensionless*	*Converter*	
17	Konverter Waktu	Konversi waktu dari tahun ke hari untuk laju kelahiran dan kematian	*Dimensionless*	*Converter*	

Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem timbunan sampah di TPS 3R.

Tabel 5.8 Identifikasi Variabel Sub-sistem Timbunan Sampah di TPS 3R

Sub-sistem Timbunan Sampah di TPS 3R					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Sampah Masuk ke TPS 3R	Laju sampah masuk ke TPS 3R	Ton/hari	*Flow*	
2	Timbunan Sampah TPS 3R	Total timbunan sampah di TPS 3R	Ton	*Stock*	
3	Penyusutan Sampah	Laju penyusutan sampah	Ton/hari	*Flow*	
4	Tingkat Penyusutan Sampah	Besar penyusutan sampah	Ton/hari	*Converter*	
5	Sampah Tidak Diolah	Penyortiran sampah yang tidak diolah	Ton/hari	*Flow*	
6	Jumlah Sampah Tidak Diolah	Total sampah tidak diolah TPS 3R	Ton	*Stock*	
7	Prosentase Sampah Diolah	Prosentase sampah yang dapat diolah TPS 3R	*Dimensionless*	*Converter*	
8	Sampah Diolah	Penyortiran sampah dapat diolah TPS 3R	Ton/hari	*Flow*	
9	Akumulasi Sampah Diolah	Total sampah dapat diolah TPS 3R	Ton	*Stock*	
10	Sortir Sampah Proses	Penyortiran sampah yang akan diproses	Ton/hari	*Flow*	
11	Sampah Diproses	Total sampah yang diproses	Ton	*Stock*	
12	Sortir Sampah Non Proses	Penyortiran sampah yang tidak diproses	Ton/hari	*Flow*	
13	Sampah Tidak Diproses	Total sampah tidak diproses	Ton	*Stock*	
14	Prosentase Sampah Diproses	Prosentase sampah yang diproses terhadap sampah diolah	*Dimensionless*	*Converter*	

Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem pengangkutan sampah ke TPS 3R.

Tabel 5.9 Identifikasi Variabel Sub-sistem Pengangkutan Sampah ke TPS 3R

Sub-sistem Pengangkutan Sampah ke TPS 3R					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Jumlah Pengangkutan Sampah ke TPS	Jumlah kebutuhan pengangkutan sampah per hari	Pengangkutan/hari	*Converter*	
2	Jumlah Kendaraan Pengangkut	Jumlah kendaraan tersedia	Unit	*Converter*	
3	Jumlah Kendaraan per TPS 3R	Jumlah kendaraan yang dimiliki tiap TPS 3R	Unit	*Converter*	

Tabel 5.9 Identifikasi Variabel Sub-sistem Pengangkutan Sampah ke TPS 3R (Lanjutan)

Sub-sistem Pengangkutan Sampah ke TPS 3R					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
4	Kapasitas Kendaraan	Kapasitas pengangkutan sampah	Ton	*Converter*	
5	Kebutuhan Trip	Jumlah trip yang diperlukan dalam satu kali pengangkutan sampah	Trip/pengangkutan	*Converter*	
6	Jumlah Trip Pengangkutan	Total trip yang dibutuhkan untuk pengangkutan sampah per hari	Trip/hari	*Converter*	
7	Dampak Lingkungan Pengangkutan	Dampak lingkungan dari sistem pengangkutan sampah	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	
8	LCA Pengangkutan Sampah	Emisi GRK pengangkutan sampah dari LCA	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	

Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem penyortiran sampah plastik.

Tabel 5.10 Identifikasi Variabel Sub-sistem Penyortiran Sampah Plastik

Sub-sistem Penyortiran Sampah Plastik					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Sampah Plastik Disimpan	Total sampah plastik ditimbun	Ton	*Stock*	
2	Pengepresan	Pengepresan sampah plastik untuk disimpan	Ton	*Flow*	
3	Konversi Sampah Pengepresan	Prosentase konversi sampah plastik sebelum dan setelah di-*press*	*Dimensionless*	*Converter*	
4	Sampah Plastik Dijual	Penjualan sampah plastik	Ton/hari	*Flow*	
5	Tingkat Penjualan Sampah Pastik	Jumlah penjualan sampah plastik per hari	Ton/hari	*Converter*	
6	Dampak Lingkungan Penimbunan Sampah Plastik	Dampak lingkungan dari sistem penimbunan sampah plastik	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	
7	LCA Penimbunan Sampah Plastik	Emisi GRK penimbunan sampah plastik dari LCA	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	

Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem pengomposan.

Tabel 5.11 Identifikasi Variabel Sub-sistem Pengomposan

Sub-sistem Pengomposan					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Akumulasi Kompos	Jumlah kompos diproduksi	Ton	*Stock*	
2	Pengomposan	Produksi kompos	Ton	*Flow*	
3	Konversi Sampah ke Kompos	Prosentase konversi dari sampah ke kompos	*Dimensionless*	*Converter*	
4	Kapasitas Pengomposan	Kapasitas komposter	Ton	*Converter*	
5	Sampah Dikomposkan	Jumlah sampah yang akan dikomposkan	Ton	*Converter*	
6	Prosentase Sampah Dikomposkan	Prosentase sampah dikomposkan terhadap sampah proses	*Dimensionless*	*Converter*	
7	Sisa Sampah Pengomposan	Sisa sampah yang tidak dapat dikomposkan akibat keterbatasan kapasitas	Ton	*Converter*	
8	Kapasitas Komposter per TPS	Besar kapasitas komposter yang tersedia per TPS 3R	Ton	*Converter*	
9	Jumlah TPS 3R	Jumlah TPS 3R di Surabaya	Unit	*Converter*	
10	Kapasitas Pengomposan	Kapasitas total pengomposan seluruh TPS 3R	Ton	*Converter*	
11	Gas CH4 Pengomposan	Potensi gas CH4 dihasilkan	m^3	*Converter*	
12	Konversi Kompos ke CH4	Nilai konversi sampah kompos ke gas CH4	*Dimensionless*	*Converter*	
13	Pemakian Kompos	Pemakaian kompos oleh warga	Ton/hari	*Flow*	
14	Tingkat Pemakaian Kompos	Tingkat pemakaian kompos per hari	Ton/hari	*Converter*	
15	Penjualan Kompos	Jumlah kompos dijual	Ton/hari	*Flow*	
16	Tingkat Penjualan Kompos	Tingkat penjualan kompos harian	Ton/hari	*Converter*	
17	Dampak Lingkungan Pengomposan	Dampak lingkungan dari system pengomposan	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	
18	LCA Pengomposan	Emisi GRK pengomposan dari LCA	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	

Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem gasifikasi.

Tabel 5.12 Identifikasi Variabel Sub-sistem Gasifikasi

Sub-sistem Gasifikasi					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Sampah Gasifikasi	Jumlah sampah yang digasifikasikan	Ton	*Converter*	
2	Prosentase Sampah Gasifikasi	Prosentase sampah gasifikasi terhadap total sampah proses	*Dimensionless*	*Converter*	
3	Pengeringan Sampah	Pengurangan kadar air sampah sebelum dibakar	Ton	*Flow*	
4	Konversi Sampah Pengeringan	Prosentase konversi sampah basah ke sampah kering	*Dimensionless*	*Converter*	
5	Akumulasi Sampah Kering	Total sampah hasil pengeringan	Ton	*Stock*	
6	Sampah Dibakar	Jumlah sampah yang akan dibakar pada proses gasifikasi	Ton	*Flow*	
7	Gasifikasi	Proses gasifikasi sampah kering	Ton/hari	*Converter*	
8	Listrik	Total listrik dihasilkan	kWh	*Converter*	
9	Konversi Sampah ke Listrik	Nilai konversi dari sampah kering menjadi listrik	*Dimensionless*	*Converter*	
10	Dampak Lingkungan Gasifikasi	Dampak lingkungan dari sistem gasifikasi sampah	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	
11	LCA Gasifikasi	Emisi GRK gasifikasi sampah dari LCA	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	

Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem sampah masuk TPA.

Tabel 5.13 Identifikasi Variabel Sub-sistem Sampah Masuk TPA

Sub-sistem Sampah Masuk TPA					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Akumulasi Sampah diangkut ke TPA dari TPS 3R	Total sampah yang diangkut dari TPS 3R menuju TPA	Ton	*Stock*	
2	Sisa Sampah TPS 3R	Jumlah sampah yang tidak diolah TPS 3R	Ton/hari	*Flow*	
3	Sampah masuk TPA	Pengangkutan sampah ke TPA	Ton/hari	*Flow*	

Tabel 5.13 Identifikasi Variabel Sub-sistem Sampah Masuk TPA (Lanjutan)

Sub-sistem Sampah Masuk TPA					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
4	Total Sampah TPA	Total sampah yang masuk ke TPA secara akumulatif	Ton	*Stock*	

Berikut merupakan identifikasi variabel untuk sub-sistem emisi.

Tabel 5.14 Identifikasi Variabel Sub-sistem Emisi

Sub-sistem Emisi					
No.	**Variabel**	**Deskripsi**	**Unit/Satuan**	**Tipe**	**Referensi**
1	Emisi GRK Total	Total emisi GRK dilepaskan oleh TPS 3R	Kg CO_2 equivalent	*Converter*	

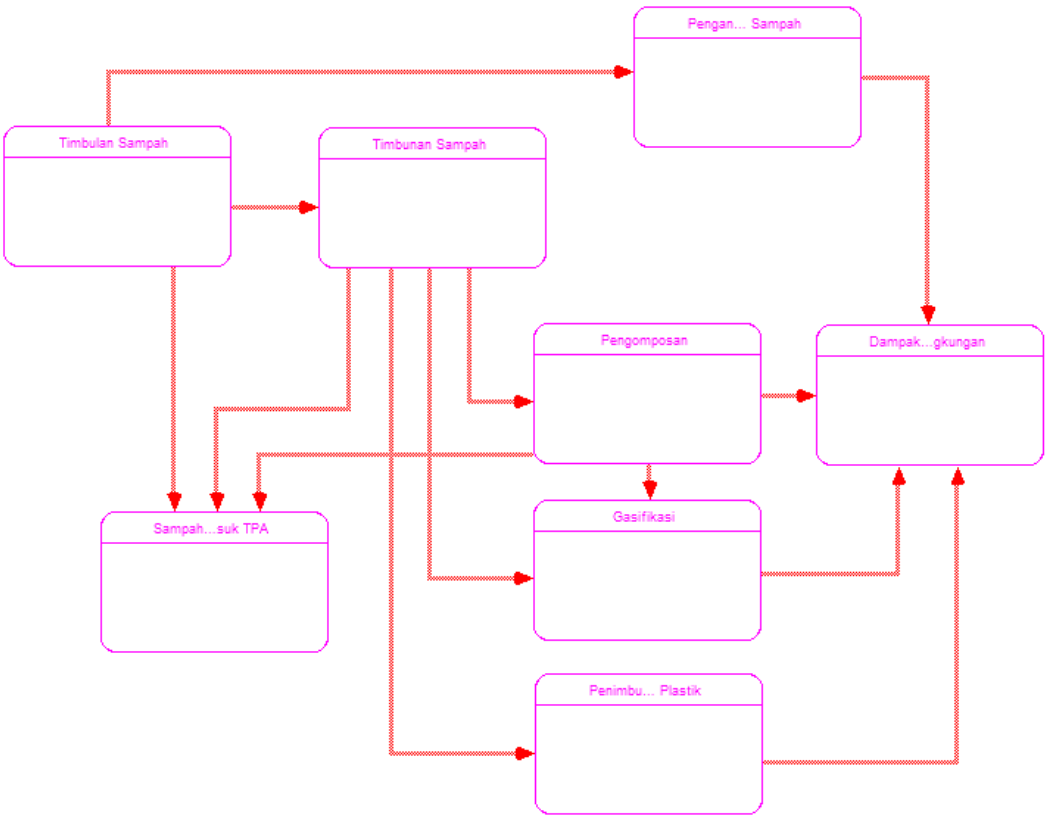
Berdasarkan identifikasi variabel yang dijelaskan pada tabel 5.7 hingga tabel 5.14 kemudian dirancang model simulasi berupa *stock flow diagram* (SFD) yang akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya.

5.4.2 Model Simulasi

Model simulasi yang digunakan berupa *stock and flow diagram* (SFD) dimana SFD tersebut disusun dengan menggunakan *software* STELLA. SFD disusun berdasarkan model konseptual (CLD) yang telah disusun sebelumnya dimana pada SFD ini akan memuat formulasi matematis yang dapat menggambarkan interaksi antar variabel terkait dalam sistem persampahan TPS 3R Surabaya. Berikut merupakan model simulasi yang disusun meliputi model utama sistem dan sub-sistem yang terkait dengan persampahan TPS 3R Surabaya.

5.4.1.1 Model Utama Sistem

Berikut merupakan model utama sistem dari sistem TPS 3R.



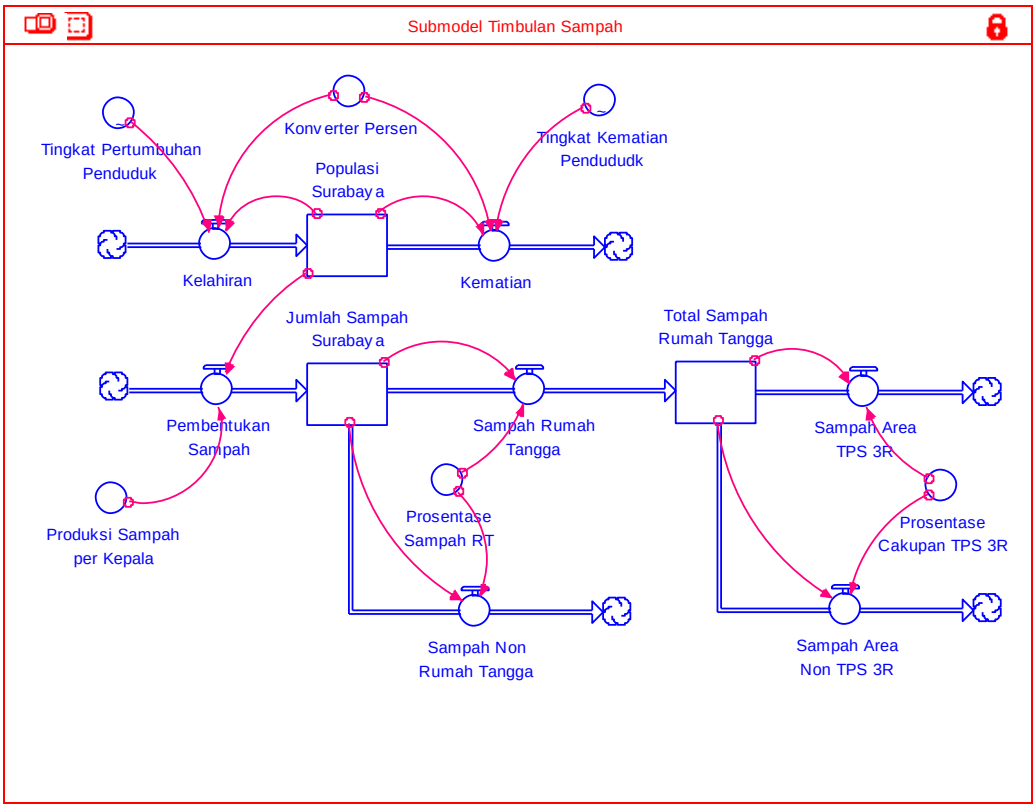
Gambar 5.7 Model Utama Sistem

Gambar 5.7 menunjukkan model utama dari sistem persampahan TPS 3R dimana model simulasi yang disusun terdiri dari beberapa sub-sistem atau sub-model yakni sub-model timbulan sampah, timbunan sampah, pengangkutan sampah ke TPS 3R, pengomposan, gasifikasi, penimbunan sampah plastik, sampah masuk TPA, dan dampak lingkungan. Pada model utama sistem juga dijelaskan interaksi antar sub-model yang ditunjukkan oleh anak panah.

5.4.1.2 Sub-model Timbulan Sampah

Sub-model timbulan sampah merupakan model yang menunjukkan bagaimana sampah di Surabaya dapat terbentuk. Pembentukan sampah ini diawali dari laju kelahiran dan kematian penduduk di Surabaya beserta jumlah penduduknya. Selanjutnya jumlah penduduk akan terkait dengan produksi sampah per kapita dimana nilai produksi sampah per kapita ini didapatkan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh IPCC. Sampah

Surabaya kemudian akan dipisahkan berdasarkan area cakupan TPS 3R dimana sampah yang tercakup TPS 3R akan diproses melalui TPS 3R dan sampah yang tidak tercakup TPS 3R tidak akan diproses di TPS 3R melainkan langsung dikirimkan ke TPA Benowo. Berikut merupakan SFD dari sub-model timbulan sampah.

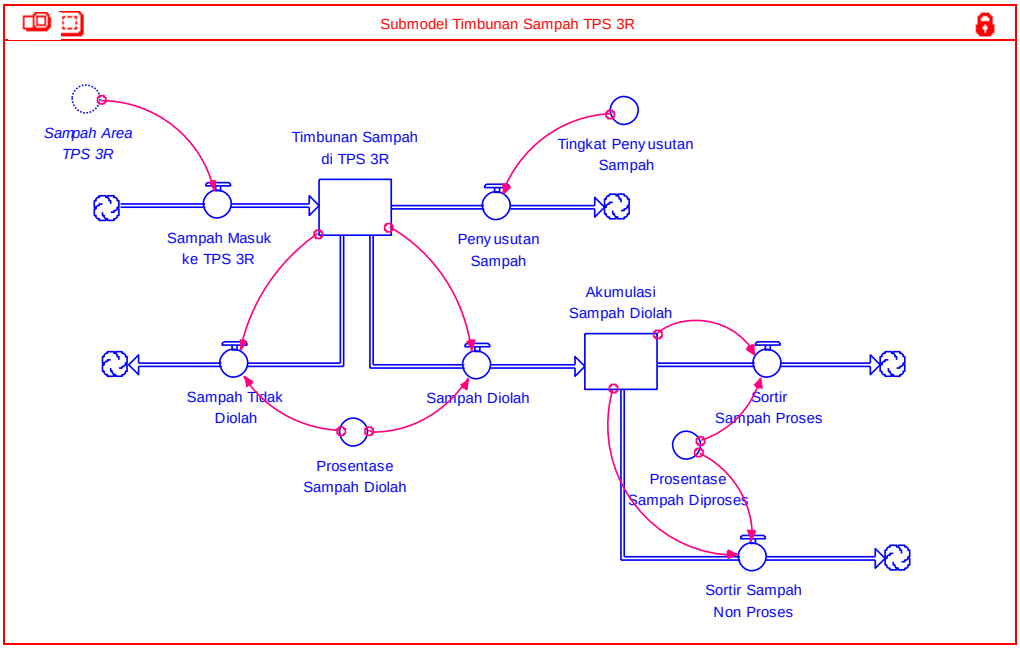


Gambar 5.8 Sub-model Timbulan Sampah

5.4.1.3 Sub-model Timbunan Sampah

Sub-model timbunan sampah menunjukkan bagaimana sampah masuk dan ditimbun TPS 3R beserta penyortiran sampah yang akan diolah dan sampah yang tidak dapat diolah oleh TPS 3R. Timbunan sampah yang disimpan di TPS 3R diawali dari jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R berdasarkan laju sampah area TPS 3R pada sub-model timbulan sampah sehingga sub-model timbunan sampah ini berkaitan dengan sub-model timbulan sampah. Selanjutnya, timbunan sampah di TPS 3R akan disortir dalam dua kategori yakni sampah diolah dan sampah tidak diolah. Sampah

yang diolah merupakan sampah yang dapat dikomposkan, sampah yang akan dibakar dalam proses gasifikasi, dan sampah plastik yang akan dijual kembali sedangkan sampah yang tidak diolah merupakan sampah yang tidak dapat diolah oleh TPS 3R karena keterbatasan kapasitas dan teknologi seperti sampah logam, kaca, karet, dan sebagainya. Sampah yang diolah sendiri akan disortir kembali ke dalam dua kategori yakni sampah proses dan sampah non-proses. Sampah proses disini merupakan sampah yang akan diproses lebih lanjut pada pengomposan dan/atau gasifikasi sedangkan sampah non proses merupakan sampah yang hanya akan dijual kembali tanpa diproses seperti sampah plastik ringan. Berikut merupakan SFD dari sub-model timbunan sampah TPS 3R.

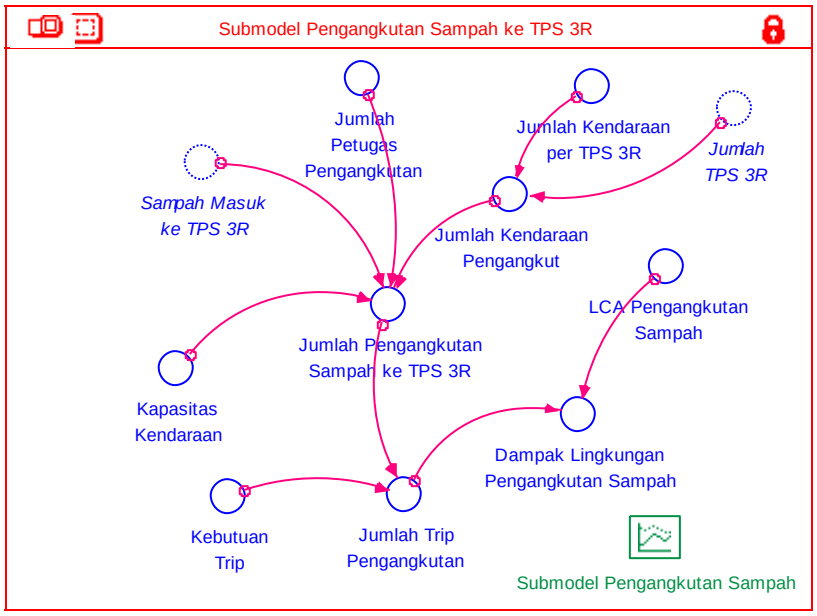


Gambar 5.9 Sub-model Timbunan Sampah

5.4.1.4 Sub-model Pengangkutan Sampah ke TPS 3R

Sub-model pengangkutan menggambarkan jumlah ritase pengangkutan yang dibutuhkan oleh TPS 3R dalam mengumpulkan sampah dari timbulan sampah. Kebutuhan pengangkutan sampah ke TPS 3R dipengaruhi oleh beberapa hal terkait dengan pengangkutan maupun timbulan sampah itu sendiri. Pada sub-model ini, jumlah pengangkutan

sampah ditentukan berdasarkan jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R serta dipengaruhi oleh jumlah kendaraan pengangkut yang tersedia dan kapasitas kendaraan tersebut. Selanjutnya kebutuhan pengangkutan ini akan terkait dengan jumlah trip/ritase yang dibutuhkan dimana satu kali pengangkutan terdiri dari dua trip. Jumlah trip ini akan berpengaruh terhadap emisi GRK yang dilepaskan oleh sistem pengangkutan sampah di TPS 3R dimana nilai emisi yang dihasilkan dari LCA merupakan nilai emisi GRK per trip pengangkutan. Berikut merupakan SFD dari sub-model pengangkutan sampah ke TPS 3R.

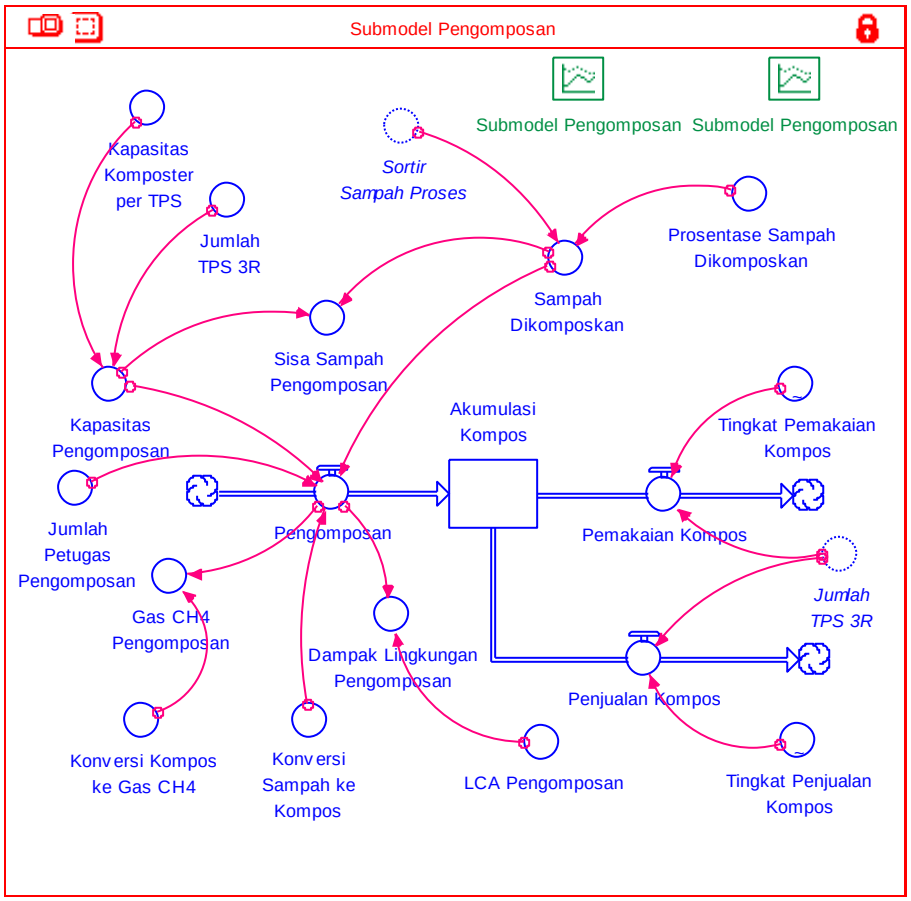


Gambar 5.10 Sub-model Pengangkutan Sampah ke TPS 3R

5.4.1.5 Sub-model Pengomposan

Sub-model pengomposan menggambarkan proses pengomposan yang dilakukan TPS 3R beserta emisi yang dilepaskan oleh sistem pengomposan tersebut. Proses pengomposan sendiri diawali dari jumlah sampah proses yang akan dikomposkan dimana laju pengomposan ini dipengaruhi oleh kapasitas pengomposan yang dimiliki oleh TPS 3R. Umumnya kapasitas pengomposan di TPS 3R lebih kecil daripada jumlah sampah proses yang dapat dikomposkan sehingga proses pengomposan ini

berpotensi menimbulkan sisa sampah dimana sisa sampah ini akan dikirimkan ke TPA Benowo. Kompos yang telah diproduksi kemudian akan dijual dan juga dipergunakan kembali oleh masyarakat sekitar TPS 3R. Berikut merupakan SFD dari sub-model pengomposan di TPS 3R.

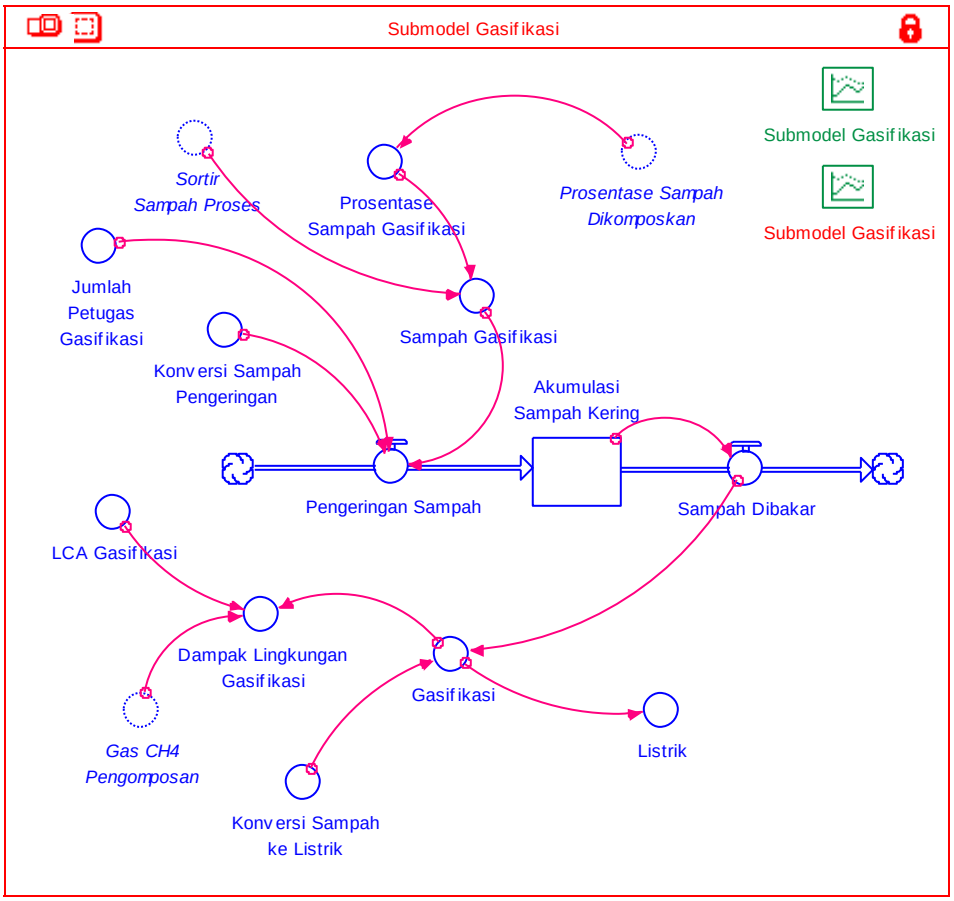


Gambar 5.11 Sub-model Pengomposan

5.4.1.6 *Sub-model Gasifikasi*

Sub-model gasifikasi menggambarkan proses produksi listrik dari pembakaran sampah dengan metode gasifikasi. Sub-model ini berkaitan dengan sub-model pengomposan dimana bahan bakar yang dipergunakan dalam proses gasifikasi merupakan gas metana (CH_4) yang dihasilkan dari proses pengomposan. Proses gasifikasi diawali dari penyortiran sampah proses yang akan digasifikasikan dimana sampah tersebut akan dikeringkan terlebih dahulu sebelum dibakar dalam proses gasifikasi.

Sampah kering ini kemudian akan dibakar dan uap pembakaran dipergunakan untuk memutar generator listrik sehingga listrik dapat dihasilkan. Pada sub-model ini juga ditampilkan dampak lingkungan yang dihasilkan dari pembakaran sampah pada gasifikasi dimana emisi yang dilepaskan oleh sistem gasifikasi ini dipengaruhi oleh pembakaran sampah itu sendiri serta gas CH_4 yang digunakan dalam pembakaran sampah. Berikut merupakan SFD dari sub-model gasifikasi.

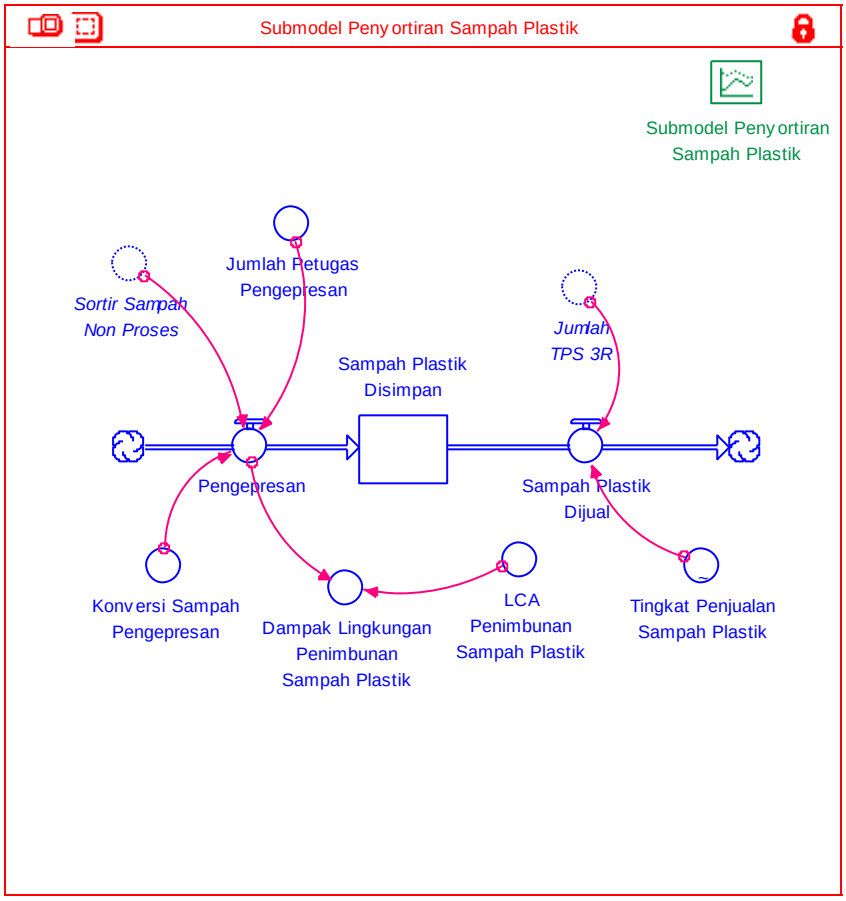


Gambar 5.12 Sub-model Gasifikasi

5.4.1.7 Sub-model Penyortiran Sampah Plastik

Sub-model penimbunan sampah plastik menggambarkan proses penyortiran sampah plastik yang dilakukan oleh TPS 3R dimana sampah plastik ini akan dijual kembali ke pengepul. Proses penyortiran sampah plastik ini diawali dari jumlah sampah non proses yang diterima oleh TPS

3R dimana sampah jenis ini akan di-*press* dan disimpan dalam jangka waktu tertentu hingga dijual ke pengepul. Penimbunan sampah plastik ini dapat menghasilkan emisi berupa gas CH_4 dimana gas ini akan berdampak pada jumlah gas rumah kaca yang dihasilkan. Berikut merupakan SFD dari sub-model penimbunan sampah plastik yang dilakukan oleh TPS 3R.

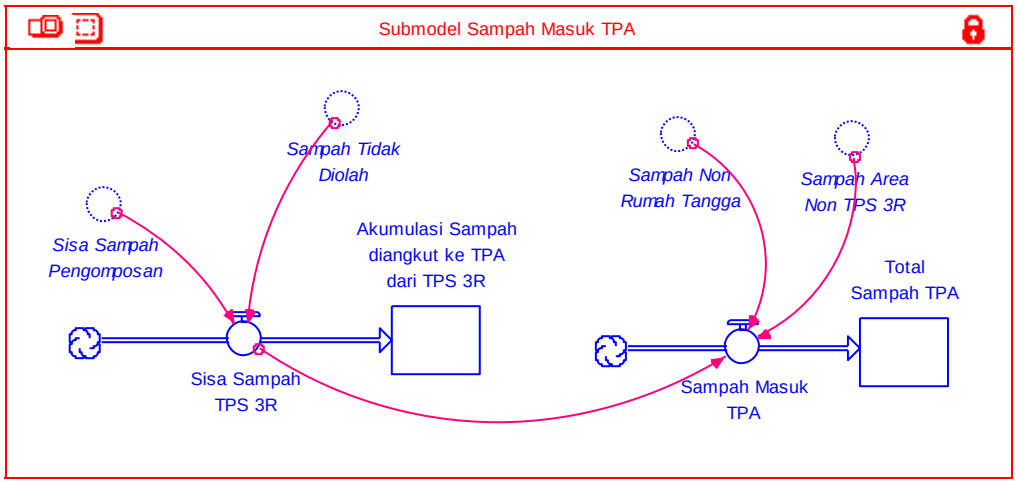


Gambar 5.13 Sub-model Penyortiran Sampah Plastik

5.4.1.8 Sub-model Sampah Masuk TPA

Sub-model sampah masuk TPA merupakan sub-model yang sangat krusial dalam penelitian ini dimana pada sub-model ini terdapat entitas jumlah sampah masuk TPA. Entitas tersebut merupakan salah satu variabel keputusan dalam penelitian ini dalam merancang skenario kebijakan. Sub-model ini menjelaskan total sampah yang akan diangkut ke TPA Benowo baik dari timbulan sampah maupun dari TPS 3R itu sendiri.

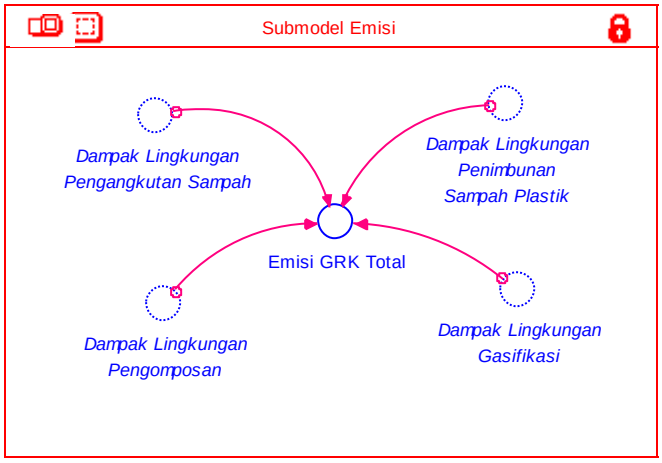
Sampah yang dikirimkan ke TPA Benowo dari TPS 3R berasal dari sampah yang tidak dapat diolah oleh TPS 3R seperti sampah kaca, logam, karet, dan sebagainya serta dari sampah sisa pengomposan yang tidak dapat diolah akibat keterbatasan kapasitas komposter. Jumlah sampah dari kedua sumber ini kemudian akan diakumulasikan dengan total sampah area non TPS 3R yang berasal dari sub-model timbulan sampah dimana total dari ketiga entitas ini merupakan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo per harinya. Berikut merupakan SFD dari sub-model sampah masuk TPA Benowo.



Gambar 5.14 Sub-model Sampah Masuk TPA

5.4.1.9 Sub-model Emisi

Sub-model emisi menjelaskan total emisi gas rumah kaca (GRK) yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R secara keseluruhan. Total emisi GRK yang dilepaskan didapatkan dari penjumlahan dari emisi yang dilepaskan oleh sistem pengangkutan sampah, penimbunan sampah plastik, pengomposan, dan gasifikasi sehingga sub-model dampak lingkungan ini berkaitan dengan sub-model yang telah disebutkan sebelumnya. Pada sub-model ini juga terdapat entitas emisi GRK total dimana entitas tersebut merupakan salah satu variabel keputusan dalam penelitian ini terkait dengan dampak lingkungan yang diukur. Berikut merupakan SFD dari sub-model emisi yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R.



Gambar 5.15 Sub-model Emisi

5.5 Simulasi Eksisting

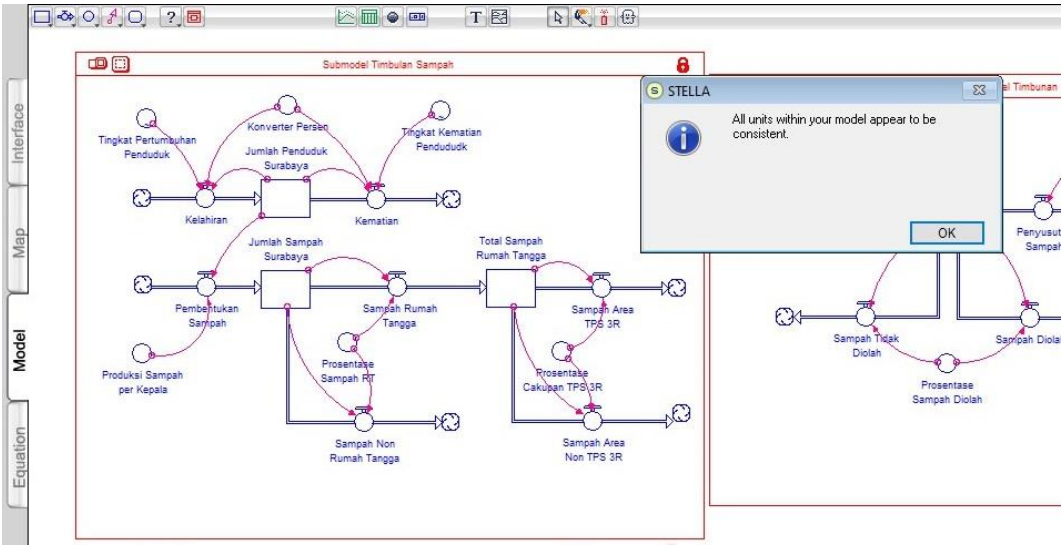
Sub-bab ini menjelaskan hasil simulasi dari kondisi eksisting sistem yang ada meliputi penjelasan hasil *running* simulasi untuks setiap sub-model beserta verifikasi dan validasi model yang telah disusun sebelumnya.

5.5.1 Verifikasi Model

Verifikasi model dilakukan untuk memeriksa kesalahan/*error* pada model serta merupakan salah satu konsep pengujian model untuk meyakinkan model bahwa model telah representatif terhadap sistem. Verifikasi sendiri dilakukan pada *software* STELLA pada model simulasi (SFD) untuk mengetahui *error*/konsistensi dari model simulasi tersebut. Berikut merupakan verifikasi model berupa verifikasi unit dan verifikasi struktur.

5.5.1.1 Verifikasi Unit

Verifikasi unit dilakukan untuk memeriksa konsistensi satuan unit yang dipergunakan dalam formulasi matematis pada model simulasi yang telah dirancang. Berikut merupakan hasil verifikasi unit dari model simulasi dengan menggunakan *software* STELLA.

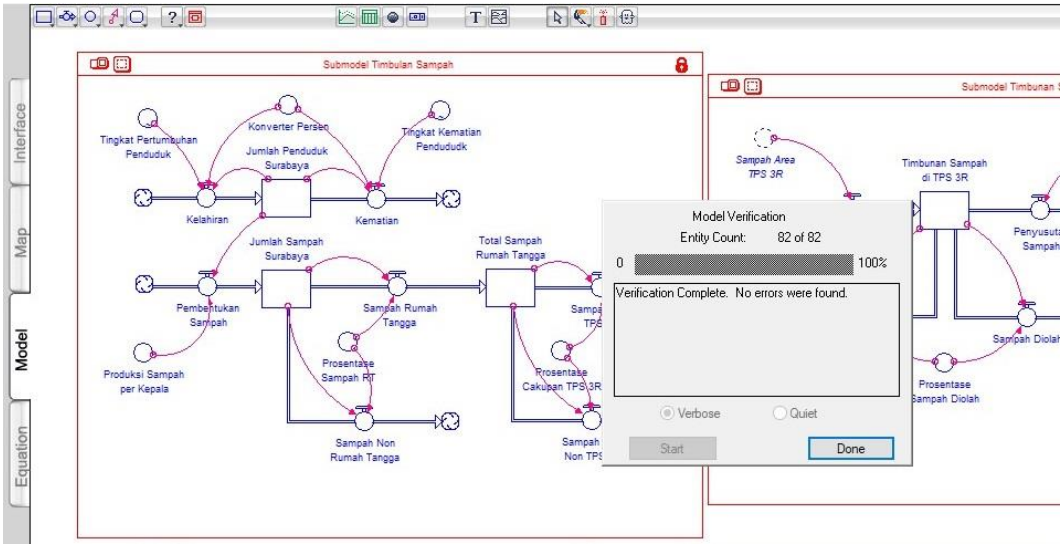


Gambar 5.16 Verifikasi Unit

Berdasarkan pada gambar 5.16 tersebut didapatkan bahwa semua unit pada model telah konsisten sehingga model dapat dinyatakan verif.

5.5.1.2 Verifikasi Struktur

Verifikasi struktur dilakukan untuk memeriksa struktur variabel dari model berupa konsistensi dari jenis variabel/entitas (*stock, flow*, dan *converter*). Berikut merupakan hasil verifikasi struktur dari model simulasi dengan menggunakan *software* STELLA.



Gambar 5.17 Verifikasi Struktur

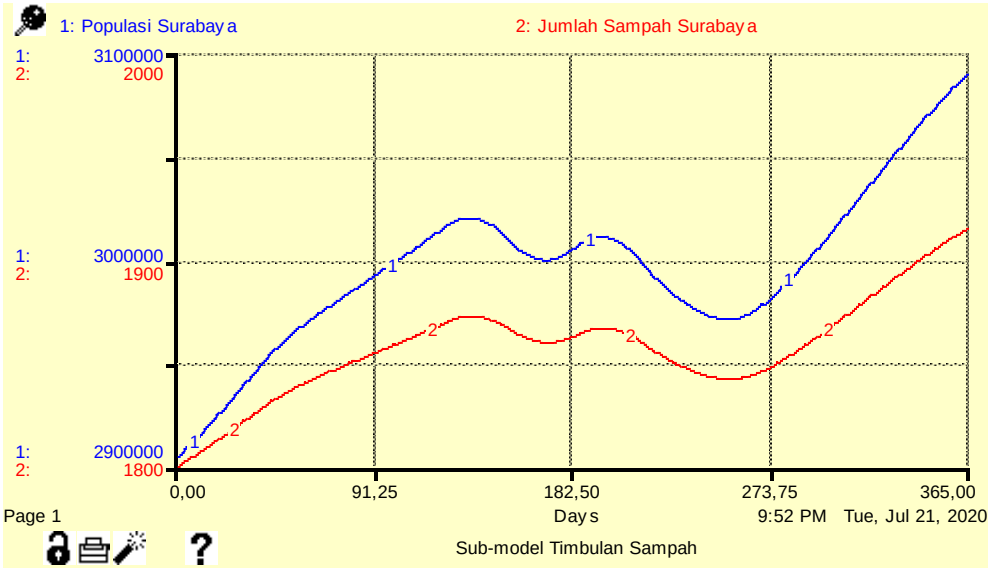
Berdasarkan gambar 5.17 didapatkan bahwa tidak terdapat *error*/kesalahan pada model simulasi yang dirancang sehingga struktur model dapat dinyatakan verif.

5.5.2 Hasil *Running* Simulasi

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai hasil *running* simulasi pada kondisi eksisting persampahan TPS 3R Surabaya untuk setiap sub-model beserta analisisnya. Model disimulasikan secara harian selama satu tahun dimana data simulasi diawali pada Januari 2020 dan simulasi ini berakhir pada Desember 2020. Penentuan waktu simulasi selama satu tahun ini dilakukan untuk menganalisa jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R apakah mengalami peningkatan ataupun sebaliknya. Berikut merupakan hasil *running* simulasi untuk setiap sub-model.

5.5.2.1 Sub-model Timbulan Sampah

Simulasi pada sub-model timbulan sampah ini dilakukan untuk mengetahui pola peningkatan dari produksi sampah oleh penduduk Surabaya dimana produksi sampah ini sangat dipengaruhi oleh populasi Surabaya itu sendiri. Surabaya sendiri pada awal 2020 memiliki populasi sebanyak 2.904.751 jiwa dengan pertumbuhan penduduk yang relatif fluktuatif sekitar 0,05% per bulan. Dengan produksi sampah per kapita sebesar 0,62 kg sampah per hari, Surabaya dapat menghasilkan sampah sekitar 1.800 ton sampah per hari. Fluktuasi dari produksi sampah di Surabaya ini dapat dilihat dari hasil simulasi yang dilakukan pada sub-model terkait. Berikut merupakan hasil *running* simulasi dari sub-model timbulan sampah dimana pada sub-model ini berfokus pada populasi Surabaya dan jumlah sampah yang diproduksi oleh Surabaya.

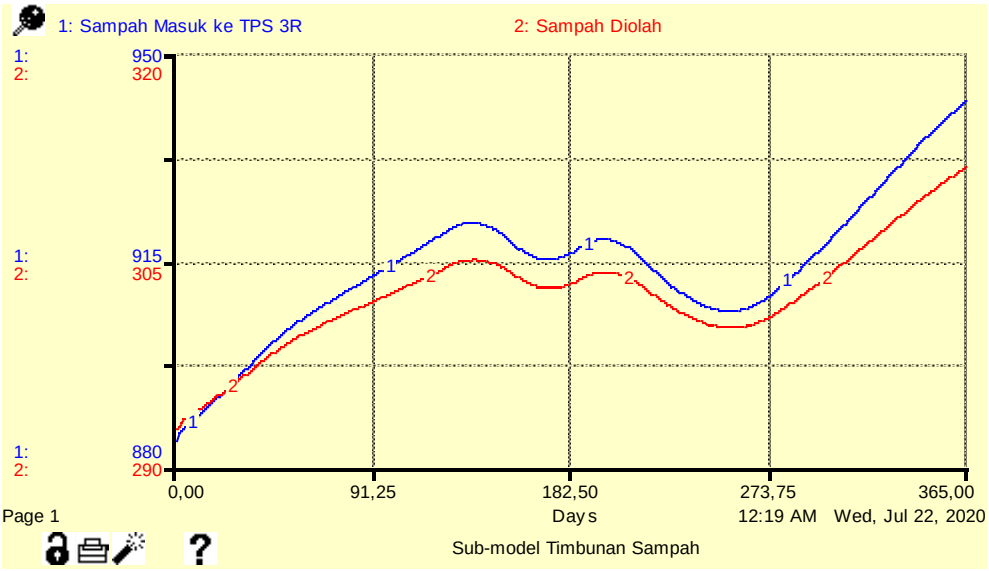


Gambar 5.18 Grafik Simulasi Sub-model Timbulan Sampah

Berdasarkan grafik hasil *running* simulasi sub-model timbulan sampah pada gambar 5.18 dapat dilihat bahwa populasi Surabaya selama satu tahun bersifat fluktuatif namun memiliki tendensi untuk meningkat sehingga memengaruhi jumlah produksi sampah di Surabaya. Dari grafik pada gambar 5.18 tersebut dapat dilihat bahwa baik kurva populasi maupun jumlah sampah Surabaya bersifat linear dalam arti memiliki kecenderungan fluktuasi yang sama sehingga kecenderungan peningkatan populasi Surabaya tersebut juga akan meningkatkan jumlah sampah Surabaya. Peningkatan jumlah sampah Surabaya ini kemudian akan menimbulkan potensi penumpukan sampah sehingga dapat memengaruhi pengelolaan sampah di Surabaya khsusnya pengelolaan sampah melalui TPS 3R.

5.5.2.2 Sub-model Timbunan Sampah

Simulasi pada sub-model timbunan sampah dilakukan untuk mengetahui berapa jumlah sampah yang masuk sebagai timbunan sampah di TPS 3R dimana timbunan sampah ini akan disortir dalam dua kategori sampah yakni sampah yang diolah TPS 3R dan sampah tidak diolah TPS 3R. Berikut merupakan hasil *running* simulasi dari sub-model timbunan sampah TPS 3R.

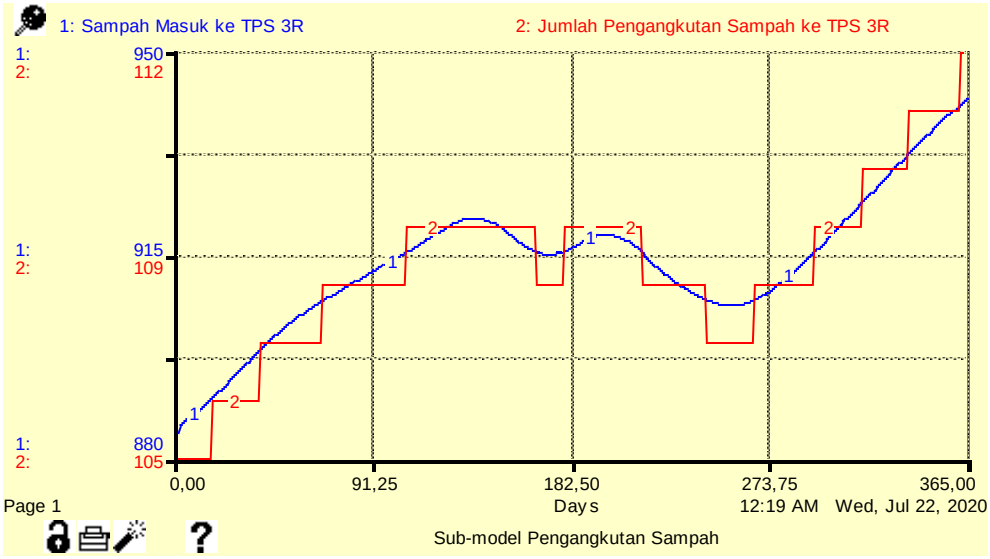


Gambar 5.19 Grafik Simulasi Sub-model Timbunan Sampah

Berdasarkan grafik pada gambar 5.19 didapatkan bahwa sampah yang masuk ke TPS 3R memiliki tendensi untuk meningkat, bahkan pada simulasi hari ke 365 didapatkan peningkatan sekitar 60 ton yakni dari 880 ton menjadi 940 ton. Dari sampah yang masuk ke TPS 3R tersebut, TPS 3R hanya mengolah sekitar 300 ton sampah dimana kapasitas pengolahan sebesar 300 ton tersebut bersifat relatif stagnan meskipun terdapat sedikit tendensi peningkatan. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat gap sekitar 500 – 600 ton sampah yang masuk ke TPS 3R tidak diolah dan langsung dikirimkan ke TPA Benowo sehingga dapat meningkatkan potensi penumpukan sampah di TPA terkait.

5.5.2.3 Sub-model Pengangkutan Sampah ke TPS 3R

Simulasi pada sub-model pengangkutan sampah bertujuan untuk mengetahui jumlah pengangkutan yang dibutuhkan oleh TPS 3R dalam mengumpulkan sampah dari timbulan sampah per harinya. Berikut merupakan hasil *running* simulasi pada sub-model pengangkutan sampah ke TPS 3R.

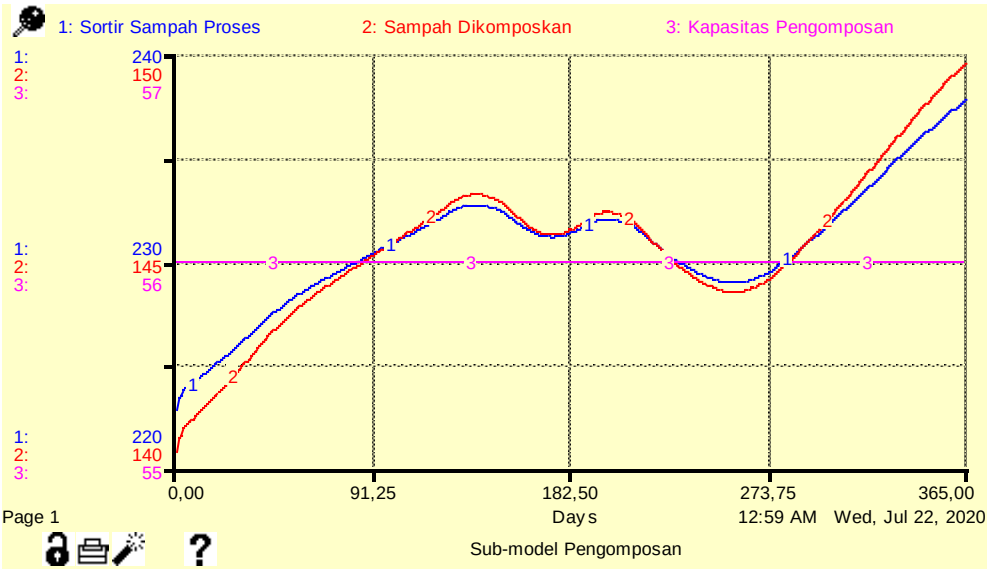


Gambar 5.20 Grafik Simulasi Sub-model Pengangkutan Sampah

Berdasarkan grafik pada gambar 5.20 menunjukkan bahwa TPS 3R membutuhkan 105 hingga 112 kali pengangkutan sampah dari seluruh timbulan sampah di Surabaya per hari. Jumlah pengangkutan sampah ini bersifat linear terhadap jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R dimana kebutuhan pengangkutan sampah akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R begitupun sebaliknya.

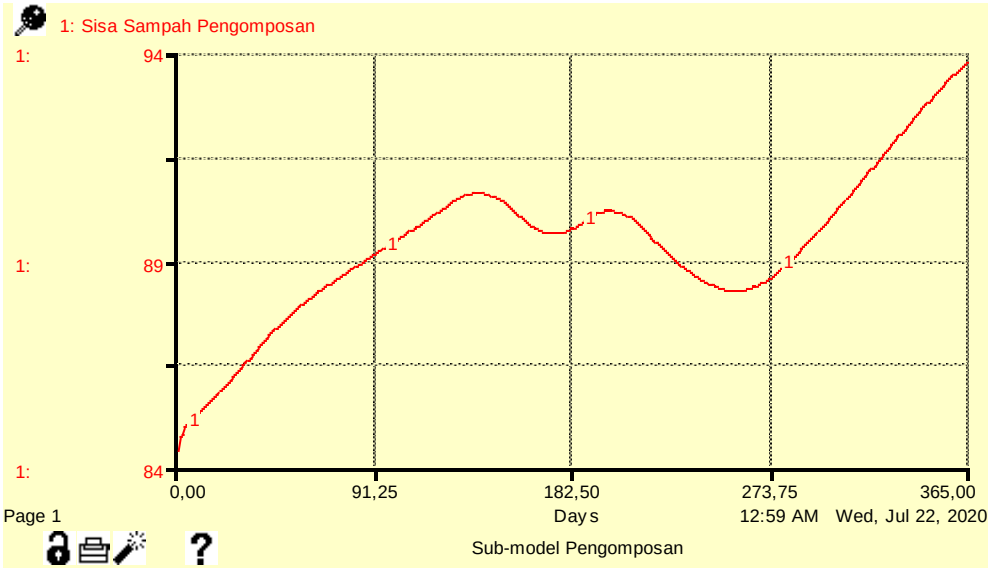
5.5.2.4 Sub-model Pengomposan

Simulasi pada sub-model pengomposan bertujuan untuk mengetahui berapa jumlah sampah yang diproses dengan metode pengomposan per harinya dimana kemudian dibandingkan dengan kapasitas komposter yang tersedia di TPS 3R tersebut. Selain itu, dapat diketahui pula sisa sampah yang tidak dapat dikomposkan akibat keterbatasan kapasitas komposter. Berikut merupakan hasil *running* simulasi dari sub-model pengomposan.



Gambar 5.21 Grafik Simulasi Sub-model Pengomposan

Berdasarkan grafik pada gambar 5.21 tersebut didapatkan bahwa baik sampah proses, sampah dikomposkan, maupun sisa sampah pengomposan bersifat relatif stagnan dan tidak mengalami perubahan. Hal tersebut dapat terjadi karena jumlah sampah yang diolah di TPS 3R juga tidak berfluktuasi serta kapasitas komposter di TPS 3R juga tidak mengalami perubahan. Dari gambar 5.21 dapat dilihat bahwa sampah yang dikomposkan terdapat sekitar 140 ton dari 220 ton sampah yang diproses oleh TPS 3R dimana sisa sampah proses yang tidak dikomposkan akan diproses gasifikasi menjadi listrik. Disisi lain, kapasitas pengomposan yang dimiliki oleh TPS 3R hanya 56 ton per hari dengan rincian kapasitas komposter sebesar 2 ton per TPS 3R. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas kompos belum dapat memenuhi kebutuhan pengolahan kompos dimana sampah yang dapat dikomposkan sekitar 140 ton per hari sehingga terdapat sisa sampah pengomposan yang tidak diolah dan akan dikirimkan ke TPA Benowo.

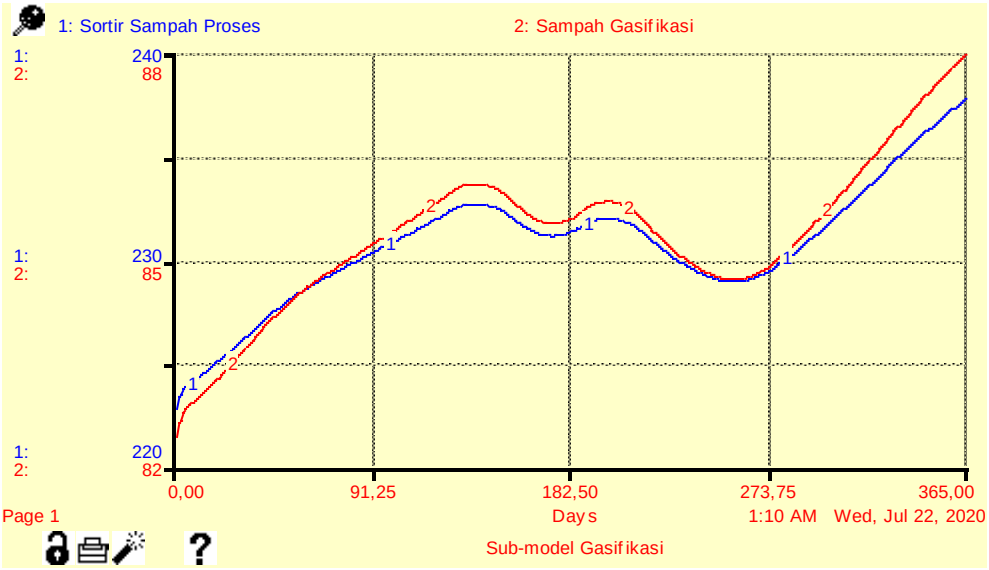


Gambar 5.22 Grafik Simulasi Sub-model Pengomposan Sektor Sisa Sampah Pengomposan

Berdasarkan grafik pada gambar 5.22 didapatkan pula bahwa TPS 3R tidak mampu mengolah seluruh sampah yang dikomposkan sehingga masih terdapat sisa sampah pengomposan sekitar 80 ton dimana sampah ini kemudian akan dikirimkan ke TPA Benowo. Hal ini mengindikasikan bahwa perlu adanya penambahan kapasitas pengomposan sehingga dapat mereduksi sisa sampah pengomposan secara total dimana hal tersebut secara otomatis akan dapat mengurangi jumlah sampah yang dikirimkan ke TPA Benowo.

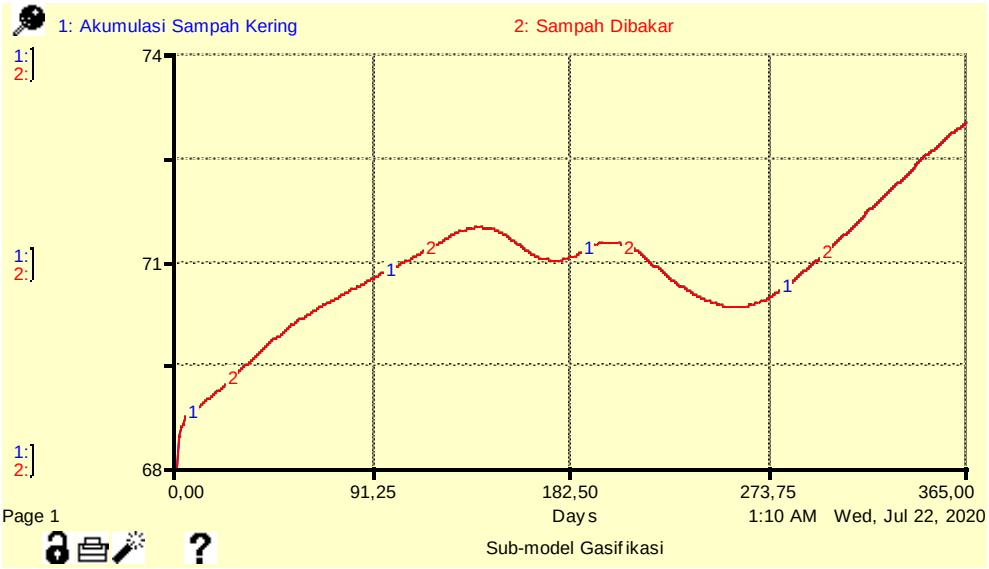
5.5.2.5 *Sub-model Gasifikasi*

Simulasi pada sub-model gasifikasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui jumlah sampah gasifikasi yang telah dikeringkan dan perbandingannya dengan jumlah sampah yang dibakar/digasifikasikan. Berikut merupakan hasil *running* simulasi dari sub-model gasifikasi.



Gambar 5.23 Grafik Simulasi Sub-model Gasifikasi

Berdasarkan grafik pada gambar 5.23 dapat diketahui bahwa dari sekitar 220 ton sampah proses yang akan diolah TPS 3R, sekitar 80 ton akan diproses gasifikasi menjadi listrik dimana sisa sampah proses yang tidak digasifikasikan akan diolah dalam proses pengomposan. Berikut merupakan hasil *running* simulasi untuk variabel akumulasi sampah kering dibandingkan dengan sampah dibakar.

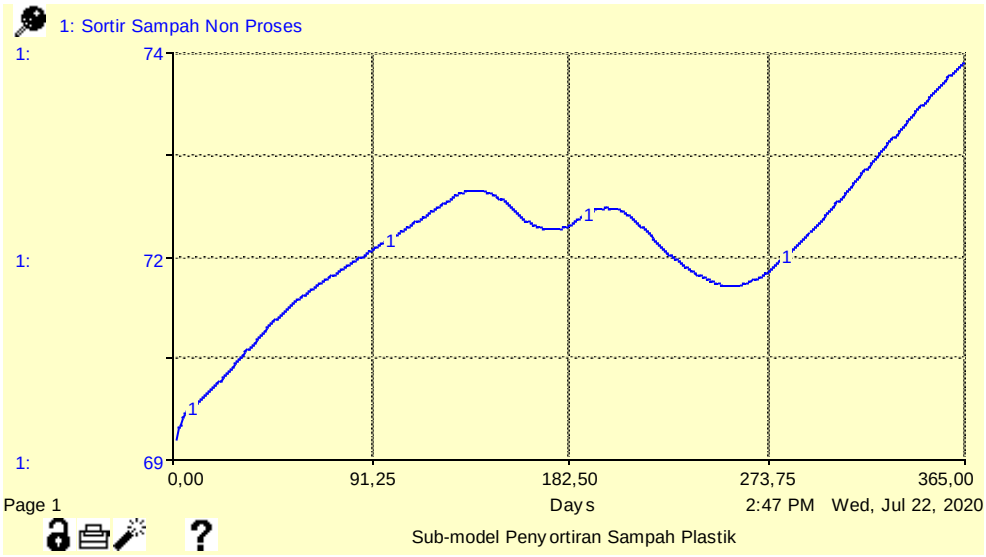


Gambar 5.24 Grafik Simulasi Sub-model Gasifikasi Sektor Pembakaran Sampah

Berdasarkan grafik pada gambar 5.24 dapat diketahui bahwa akumulasi sampah kering dan sampah yang dibakar per harinya memiliki kuantitas yang sama sehingga dapat disimpulkan bahwa pada proses gasifikasi di TPS 3R tidak terdapat residu/sisa sampah seperti pada proses pengomposan.

5.5.2.6 Sub-model Penyortiran Sampah Plastik

Simulasi pada sub-model penyortiran sampah plastik bertujuan untuk mengetahui jumlah sampah plastik yang disortir dan ditimbun di TPS 3R per harinya. Berikut merupakan hasil *running* simulasi untuk sub-model penyortiran sampah plastik.



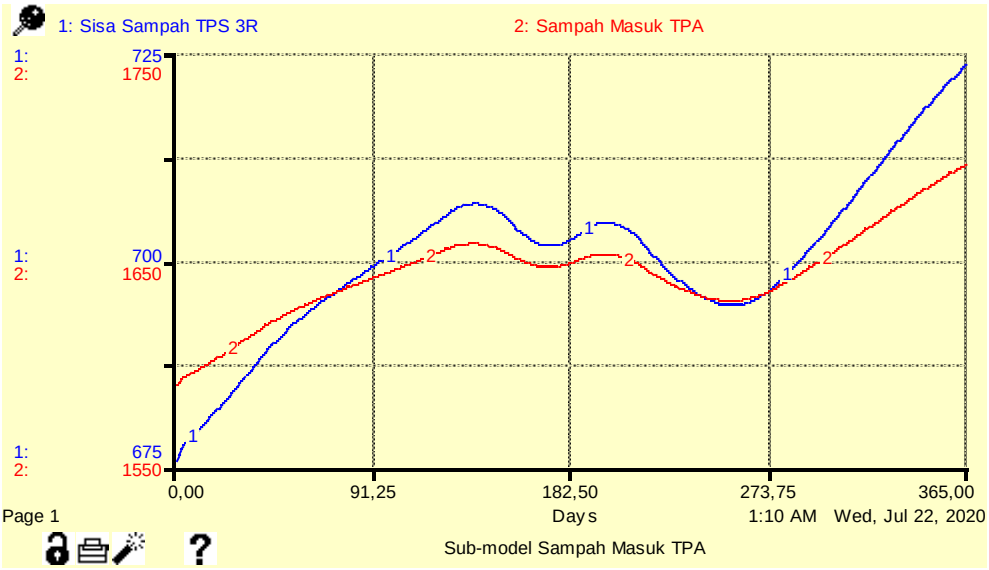
Gambar 5.25 Grafik Simulasi Sub-model Penyortiran Sampah Plastik

Berdasarkan grafik pada gambar 5.25 dapat diketahui bahwa TPS 3R menimbun sampah non proses/sampah plastik sekitar 70 ton per harinya dan selama 365 hari, jumlah sampah plastik ditimbun per hari berfluktuasi namun dengan deviasi tidak melebihi 5 ton.

5.5.2.7 Sub-model Sampah Masuk TPA

Simulasi pada sub-model sampah masuk TPA dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui berapa jumlah sampah yang diangkut ke TPA

Benowo secara keseluruhan per harinya dimana jumlah sampah yang diangkut ke TPA Benowo ini merupakan salah satu variabel keputusan dari penelitian ini. Berikut merupakan hasil *running* simulasi pada sub-model sampah masuk TPA.



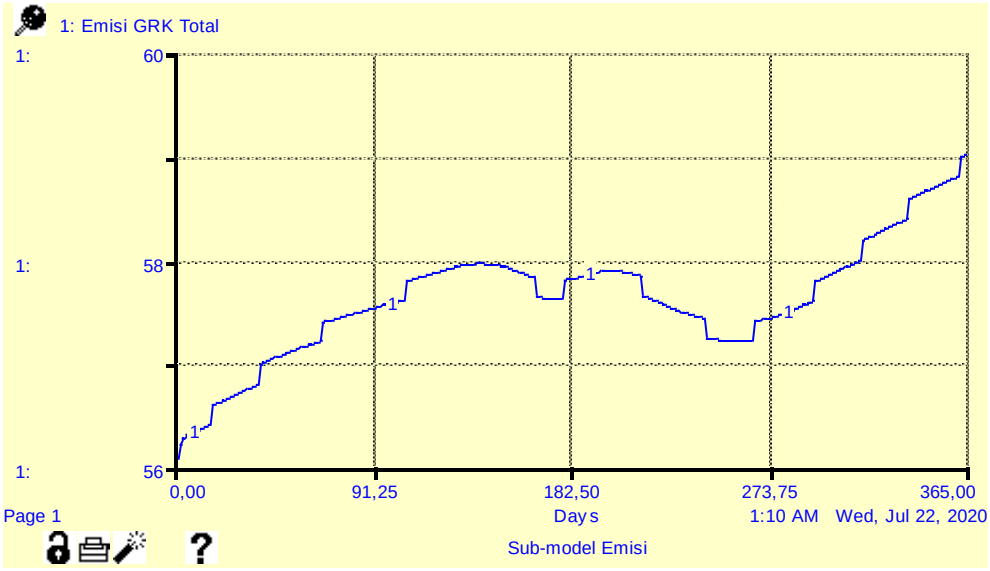
Gambar 5.26 Grafik Simulasi Sub-model Sampah Masuk TPA

Berdasarkan grafik pada gambar 5.26 didapatkan bahwa sisa sampah TPS 3R sekitar 700 ton dimana sisa sampah ini merupakan akumulasi dari sisa sampah pengomposan dan sampah yang tidak dapat diolah TPS 3R. Sisa sampah TPS 3R ini kemudian akan diangkut ke TPA Benowo. Entitas sampah masuk TPA ini merupakan akumulasi dari sisa sampah TPS 3R beserta sampah non rumah tangga dan sampah non TPS 3R masing-masing dari sub-model timbulan sampah. Dari grafik pada gambar 5.26 tersebut dapat diketahui bahwa sampah masuk TPA memiliki tendensi untuk meningkat meskipun tidak signifikan dimana pada hari ke 365 simulasi terdapat sekitar 1.700 ton sampah Surabaya masuk TPA Benowo per harinya.

5.5.2.8 Sub-model Emisi

Simulasi pada sub-model emisi bertujuan untuk mengukur emisi yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R secara keseluruhan dimana emisi

yang diukur berupa emisi gas rumah kaca (GRK) yang dapat berdampak pada pemanasan global. Berikut merupakan hasil *running* simulasi pada sub-model emisi.



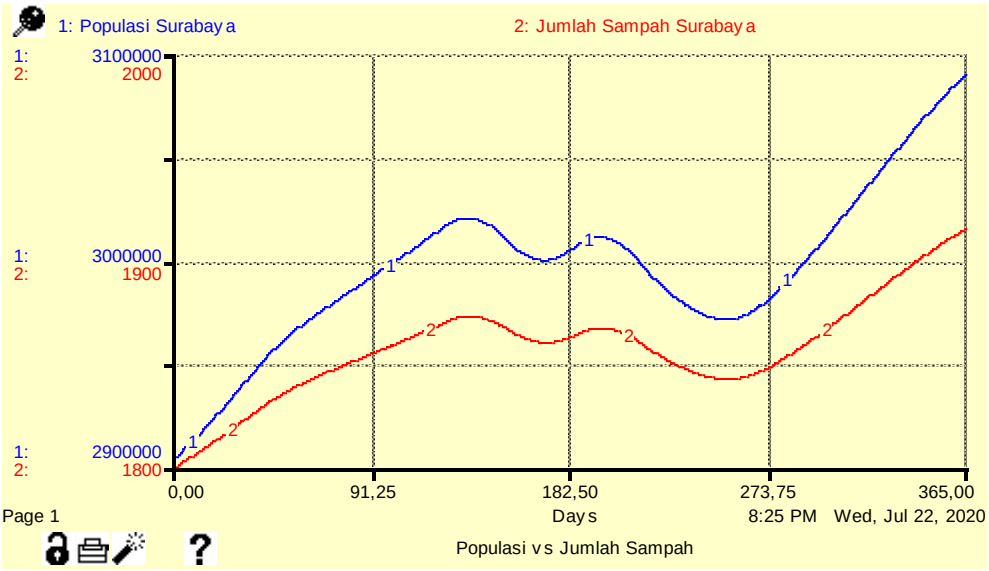
Gambar 5.27 Grafik Simulasi Sub-model Emisi

Berdasarkan grafik pada gambar 5.27 didapatkan bahwa emisi GRK yang dihasilkan oleh sistem TPS 3R secara keseluruhan adalah sekitar 60 ton CO_2 equivalent per hari dimana total emisi GRK ini merupakan akumulasi dari total emisi yang dihasilkan oleh proses pengomposan, gasifikasi, penimbunan sampah plastik, dan pengangkutan sampah ke TPS 3R.

5.5.2.9 *Analisis Hasil Running Simulasi Eksisting*

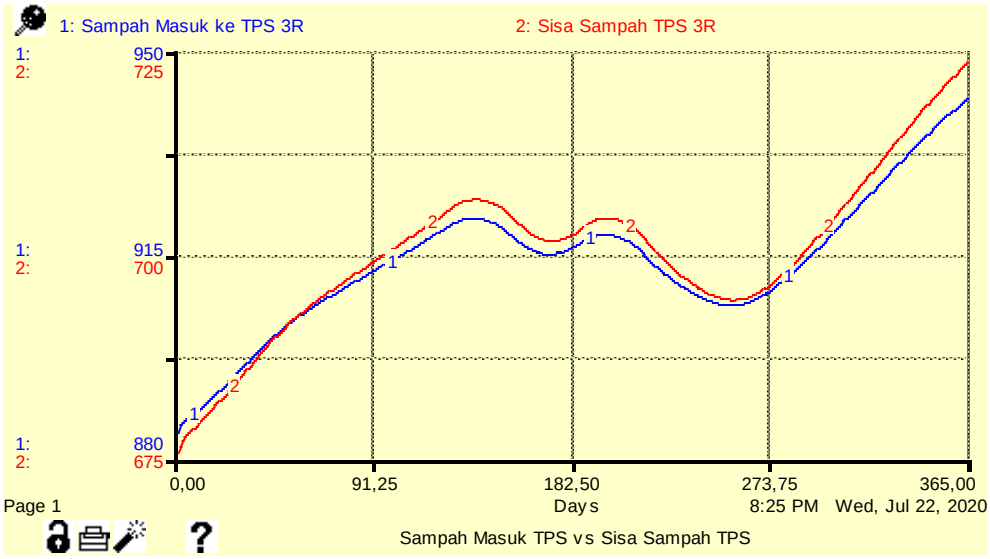
Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk merancang skenario yang dapat mengurangi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo per hari sehingga jumlah sampah yang masuk ke TPA tidak melebihi kapasitas pengolahan di TPA Benowo itu sendiri. Untuk itu perlu disimulasikan dalam jangka waktu tertentu untuk mengetahui proyeksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo kedepannya. Dalam menganalisis kondisi eksisting, variabel yang digunakan sebagai variabel keputusan adalah jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo dimana

variabel ini akan diminimasi sebisa mungkin dengan skenario-skenario yang akan dirancang. Berikut merupakan hasil *running* simulasi eksisting untuk beberapa variabel utama seperti populasi Surabaya, pembentukan sampah per hari, jumlah sampah masuk ke TPS 3R per hari, sisa sampah yang dihasilkan TPS 3R, dan total sampah masuk TPA Benowo per hari.



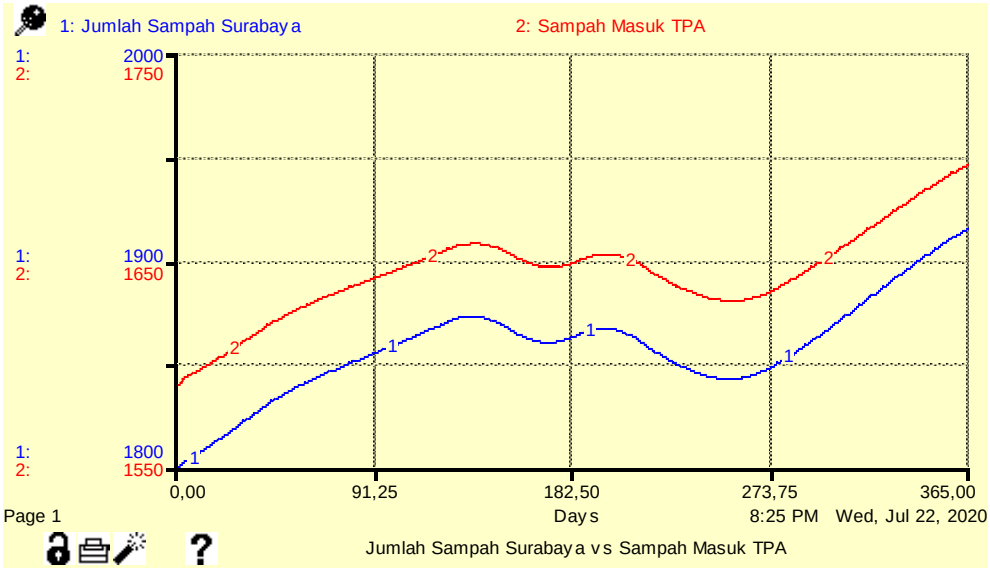
Gambar 5.28 Grafik Jumlah Sampah terhadap Populasi Surabaya

Running simulasi dilakukan selama 365 hari dengan titik awal simulasi diawali pada 1 Januari 2020 dimana data simulasi yang digunakan hingga Mei 2020. Simulasi ini menghasilkan nilai proyeksi hingga Desember 2020. Berdasarkan grafik pada gambar 5.28 dapat diketahui bahwa fluktuasi antara populasi Surabaya dan produksi sampah Surabaya bersifat linear dalam arti memiliki sifat fluktutasi yang sama sehingga dapat dipastikan bahwa peningkatan populasi Surabaya akan meningkatkan produksi sampah Surabaya begitupun sebaliknya. Berdasarkan grafik yang sama, dapat diketahui bahwa populasi Surabaya terus meningkat pada simulasi hari ke 270 hingga hari ke 365 dimana hal ini meningkatkan jumlah sampah Surabaya secara simultan. Data secara lengkap mengenai populasi Surabaya dan jumlah sampah Surabaya tersedia pada tabel 5.15.



Gambar 5.29 Grafik Jumlah Sampah Masuk TPS terhadap Sisa Sampah TPS

Berdasarkan grafik pada gambar 5.29 didapatkan bahwa tidak semua sampah yang masuk ke TPS 3R dapat diolah. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan adanya sisa sampah TPS 3R dimana sisa sampah TPS 3R ini merupakan akumulasi dari sampah yang tidak dapat diolah TPS 3R pada sub-model timbunan sampah dan sisa sampah pengomposan pada sub-model pengomposan. Sisa sampah TPS 3R ini kemudian akan diangkut ke TPA Benowo untuk diproses lebih lanjut.



Gambar 5.30 Grafik Sampah Masuk TPA terhadap Jumlah Sampah Surabaya

Berdasarkan grafik pada gambar 5.30 dapat diketahui bahwa hampir seluruh sampah Surabaya masuk ke TPA Benowo baik melalui TPS 3R terlebih dahulu ataupun langsung dikirimkan ke TPA Benowo dari timbulan sampah. Sekitar 80% sampah Surabaya, yakni sekitar 1.800 hingga 1.900 ton sampah akan berakhir di TPA Benowo tanpa diproses terlebih dahulu. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya penumpukan sampah di TPA Benowo mengingat TPA Benowo hanya dapat mengolah sampah sebanyak 1.400 ton per hari. Sebagai penjelasan lebih lanjut mengenai hasil *running* simulasi kondisi eksisting, berikut merupakan data simulasi dari grafik pada gambar 5.21 hingga 5.23 yang disajikan dalam tabel per bulannya.

Tabel 5.15 Hasil *Running* Simulasi Sektor Persampahan Kondisi Eksisting per Bulan

Bulan	*Data Point* Simulasi	Populasi Surabaya	Pembentukan Sampah	Sampah Masuk TPS 3R	Sisa Sampah TPS 3R	Sampah Masuk TPA
1	31	2.939.446	1.822,46	895,87	685,42	1.610,56
2	60	2.969.334	1.840,99	905,29	693,35	1.628,17
3	91	2.991.583	1.854,78	912,13	699,06	1.640,93
4	121	3.013.565	1.868,41	918,78	704,54	1.653,29
5	152	3.009.636	1.865,97	918,70	704,99	1.653,45
6	182	3.004.013	1.862,49	915,89	702,19	1.647,95
7	213	2.999.433	1.859,65	915,66	702,50	1.647,81
8	244	2.972.486	1.842,94	907,03	695,21	1.631,68
9	274	2.980.460	1.847,89	908,58	696,06	1.634,29
10	305	3.016.250	1.870,07	919,29	704,81	1.654,14
11	335	3.054.941	1.894,06	931,10	714,58	1.676,10
12	365	3.089.122	1.915,26	941,69	723,44	1.695,27

Berdasarkan data pada tabel 5.15 didapatkan bahwa TPS 3R menerima sekitar 900 ton sampah per hari dimana hanya diolah sekitar 200 ton sehingga tersisa sampah yang tidak diolah sekitar 700 ton. Sisa sampah tersebut kemudian akan dikirimkan ke TPA Benowo untuk diolah lebih lanjut. Pada tabel yang sama, dapat diketahui pula bahwa sampah yang masuk ke TPA Benowo per harinya sekitar 1.600 ton dimana kapasitas pengolahan sampah di TPA Benowo hanya 1.400 ton per hari. Hal tersebut

menunjukkan bahwa hingga Desember 2020, TPA Benowo masih menerima kelebihan sampah hingga 200 ton per hari. Dari hasil simulasi tersebut perlu dirancang skenario kebijakan baru dalam pengolahan sampah di TPS 3R untuk mereduksi sisa sampah TPS 3R sehingga jumlah sampah masuk ke TPA Benowo dapat direduksi dengan target hingga 200 ton per hari. Selain mereduksi sampah, penelitian ini juga berfokus dalam mereduksi emisi GRK yang dilepaskan oleh TPS 3R sehingga dalam simulasi yang dilakukan melibatkan perhitungan variabel emisi GRK. Berikut merupakan hasil *running* simulasi mengenai emisi GRK.

Tabel 5.16 Hasil *Running* Simulasi Sektor Emisi Kondisi Eksisting per Bulan

Bulan	*Data Point* Simulasi	Emisi Gasifikasi	Emisi Pengangkutan	Emisi Pengomposan	Emisi Penimbunan Plastik	Total Emisi GRK
1	31	30,59	19,23	6,75	0,16	56,72
2	60	30,84	19,41	6,75	0,16	57,16
3	91	31,02	19,59	6,75	0,16	57,53
4	121	31,19	19,77	6,75	0,16	57,88
5	152	31,23	19,77	6,75	0,16	57,92
6	182	31,12	19,77	6,75	0,16	57,81
7	213	31,15	19,77	6,75	0,16	57,84
8	244	30,92	19,41	6,75	0,16	57,24
9	274	30,93	19,59	6,75	0,16	57,43
10	305	31,20	19,77	6,75	0,16	57,88
11	335	31,50	19,95	6,75	0,17	58,37
12	365	31,79	20,32	6,75	0,17	59,02

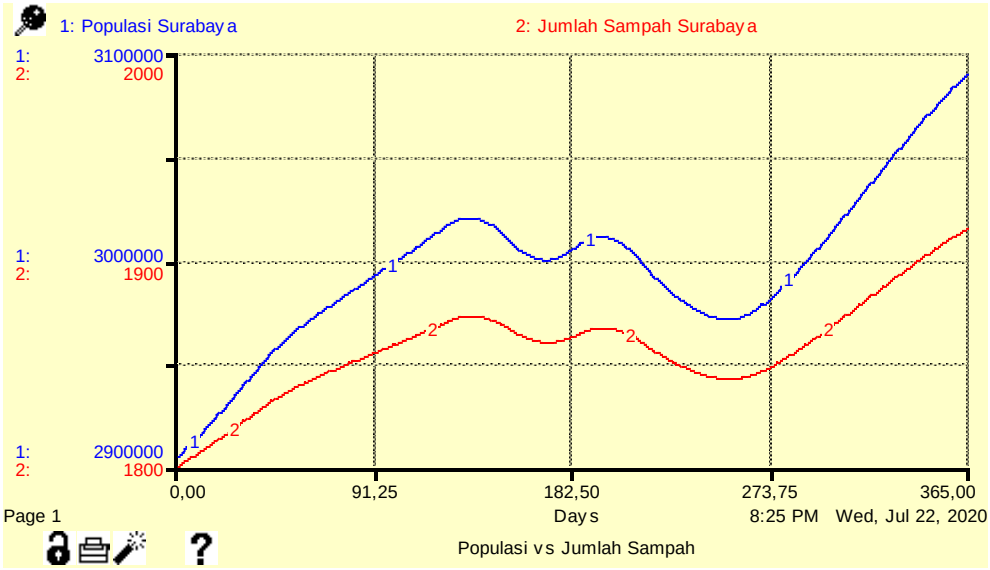
Berdasarkan data *running* simulasi pada tabel 5.16 didapatkan bahwa TPS 3R dalam mengolah sampah dengan kuantitas sebanyak pada tabel 5.15 dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) sekitar 57 ton. Nilai emisi ini kemudian menjadi salah satu parameter dalam penentuan skenario kebijakan yang dapat mereduksi jumlah sampah masuk ke TPA Benowo namun dengan memerhatikan dampak lingkungan yang dihasilkan.

5.5.3 Validasi Model

Secara umum, model tidak dapat menggantikan realitas sistem yang ada sehingga diperlukan penghampiran dari model supaya model yang dirancang setidaknya dapat merepresentasikan sistem yang ada. Validasi ini bertujuan untuk membangun keyakinan terhadap model bahwa model dapat merepresentasikan sistem yang ada. Penjelasan mengenai konsep validasi model dalam sistem dinamik dapat dilihat pada sub-bab 2.3.4. Validasi yang dilakukan terbagi ke dalam dua jenis yakni *model structure test* dan *model behavior test*. Untuk *model structure test*, metode yang digunakan yakni *parameter verification test* dan *extreme condition test* sedangkan untuk *model behavior test*, metode yang digunakan adalah *Barlas's test* dan *stastical test*. Berdasarkan literatur dari Forrester dan Senge (1980) mengenai pengujian model dalam sistem dinamik dinyatakan bahwa untuk melakukan validasi model tidak perlu dilakukan pada setiap variabel dan dapat dilakukan hanya untuk variabel kritis yang memiliki pengaruh dominan terhadap model. Maka dari itu, validasi yang dilakukan hanya pada variabel kritis terkait model yang dirancang yakni populasi, jumlah produksi sampah dan sampah masuk TPS 3R, jumlah sampah diolah, serta jumlah sampah masuk TPA. Berikut merupakan validasi terhadap model untuk setiap metode yang digunakan.

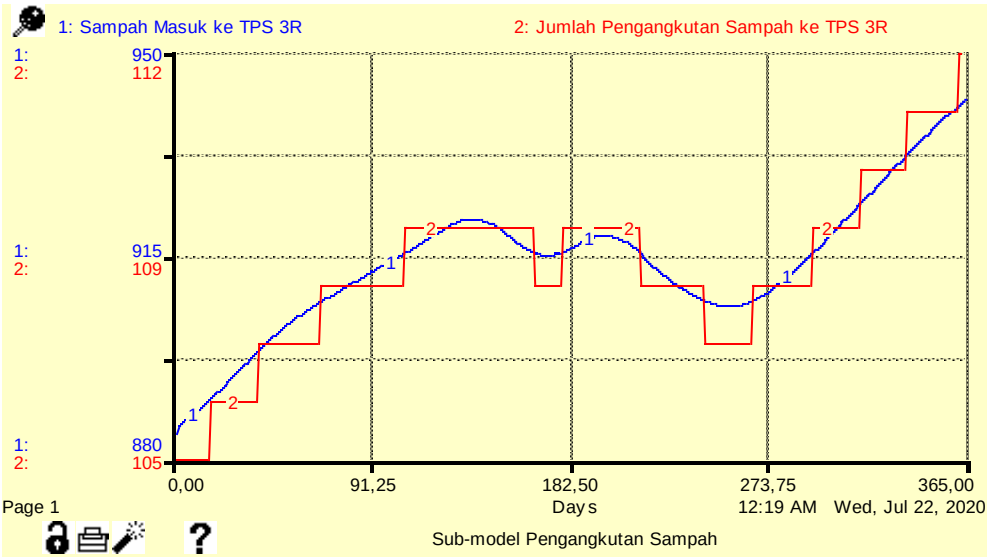
5.5.3.1 Parameter Verification Test

Parameter verification test atau uji parameter model merupakan salah satu metode validasi dalam sistem dinamik dimana metode ini digunakan untuk melihat logika antar variabel yang berhubungan telah sesuai dengan *causal loop diagram* yang telah dirancang sebelumnya. Berikut merupakan hasil uji parameter model untuk beberapa variabel.



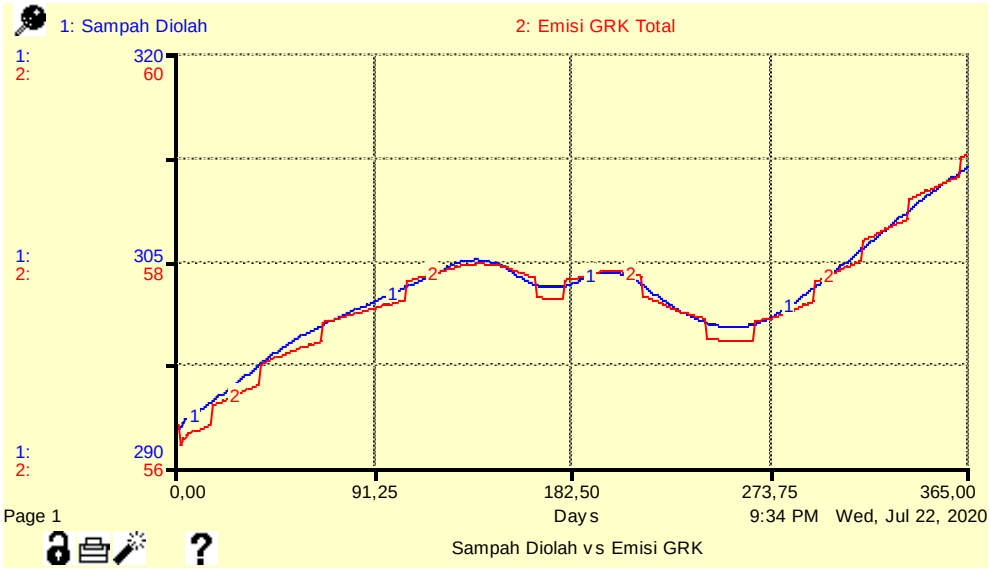
Gambar 5.31 Uji Parameter Populasi dan Jumlah Sampah Surabaya

Berdasarkan grafik hasil simulasi pada gambar 5.31 menunjukkan bahwa fluktuasi populasi Surabaya akan memengaruhi fluktuasi jumlah sampah Surabaya. Dengan kata lain, peningkatan populasi Surabaya akan meningkatkan jumlah sampah di Surabaya dan juga sebaliknya. Hal ini telah sesuai dengan logika pada *causal loop diagram* yang telah dirancang sebelumnya dimana pada *causal loop diagram* menunjukkan hubungan bahwa peningkatan populasi akan meningkatkan jumlah sampah Surabaya. Hal tersebut menunjukkan bahwa logika parameter dari populasi terhadap jumlah sampah telah sesuai dengan model konseptual sehingga model dapat dinyatakan valid. Selain itu, berikut merupakan pengecekan logika hubungan antara variabel sampah masuk ke TPS 3R dengan jumlah pengangkutan yang dibutuhkan.



Gambar 5.32 Uji Parameter Sampah Masuk TPS 3R dan Jumlah Pengangkutan

Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 5.32 menunjukkan bahwa hubungan antara sampah masuk TPS 3R dengan jumlah pengangkutan sampah yang dibutuhkan bersifat linear dimana semakin banyak jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R maka jumlah pengangkutan akan bertambah pula. Hal tersebut telah sesuai dengan logika pada *causal loop diagram* dimana peningkatan nilai pada jumlah sampah Surabaya akan meningkatkan jumlah pengangkutan yang dibutuhkan sehingga model dapat dinyatakan valid. Selanjutnya, pengujian juga dilakukan untuk variabel emisi terhadap jumlah sampah gasifikasi, pengomposan, dan sampah plastik ditimbun sebagai berikut.

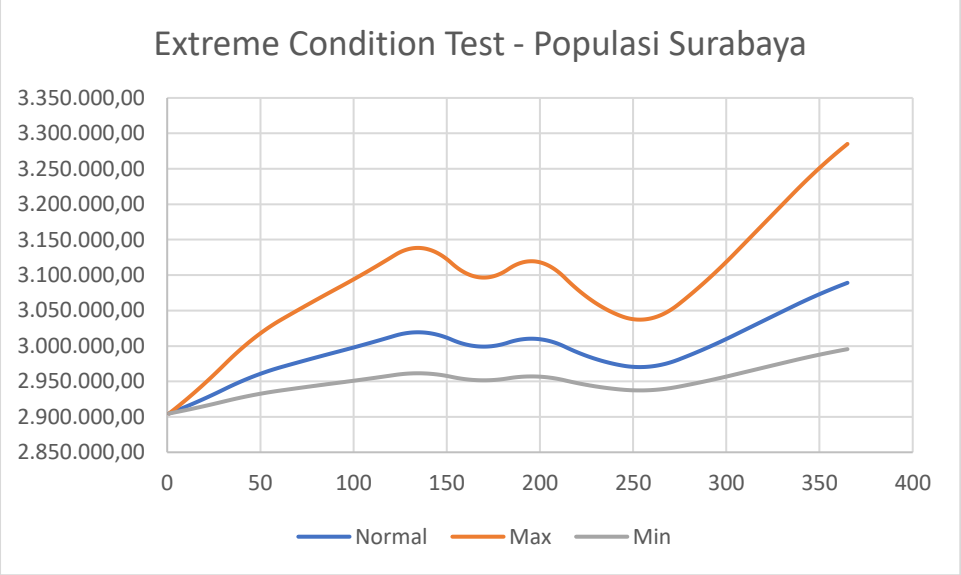


Gambar 5.33 Uji Parameter Sampah Diolah dan Emisi

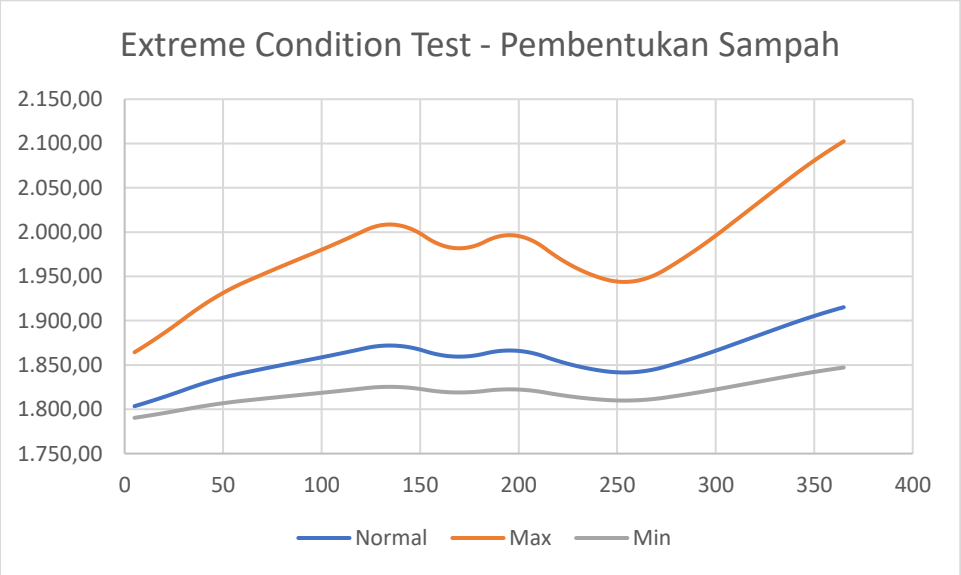
Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 5.33 dapat diketahui bahwa fluktuasi nilai emisi GRK yang dihasilkan berjalan linear dengan jumlah sampah yang diolah dimana hal ini telah sesuai dengan logika pada *causal loop diagram* sehingga model yang disusun dapat dinyatakan telah valid.

5.5.3.2 Extreme Condition Test

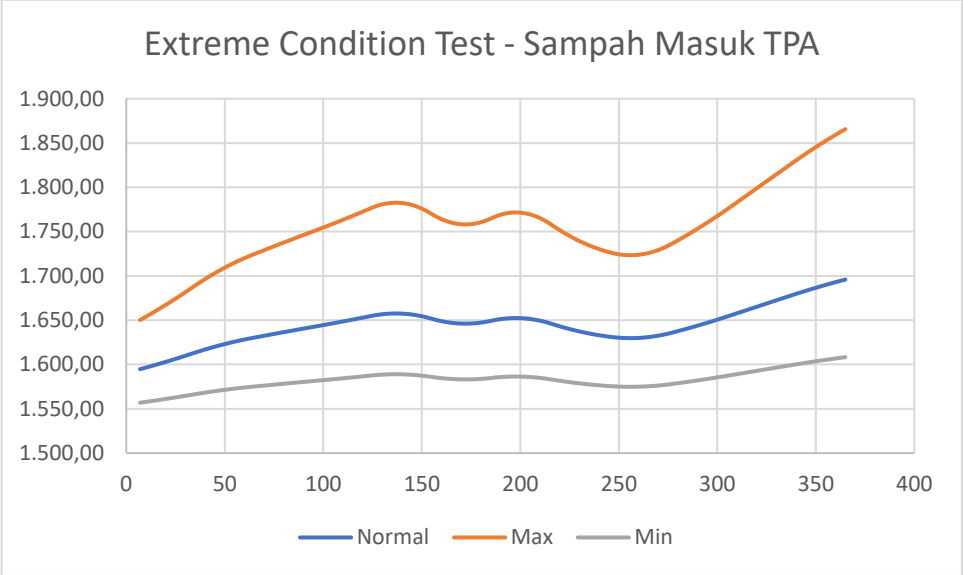
Extreme condition test atau uji kondisi ekstrim merupakan pengujian terhadap nilai variabel dalam mengakomodasi kondisi ekstrim tertentu. Pada pengujian ini, nilai variabel akan ditingkatkan dan diturunkan secara signifikan. Selanjutnya, nilai pada variabel tersebut akan dibandingkan antara kondisi normal, kondisi ekstrim terbesar, dan kondisi ekstrim terkecil. Model yang mampu menghasilkan pola nilai variabel yang konsisten dapat dinyatakan valid. Pada penelitian ini, *extreme condition test* dilakukan dengan merubah parameter tingkat kelahiran dan kematian. Untuk nilai ekstrim atas (maksimum), tingkat kelahiran dan kematian ditingkatkan menjadi dua kali dari kondisi normal sedangkan untuk nilai ekstrim bawah (minimum), tingkat kelahiran dan kematian diturunkan menjadi setengah kali dari kondisi normal. Berikut merupakan hasil dari *extreme condition test* untuk variabel populasi Surabaya, produksi sampah Surabaya, dan sampah masuk TPA Benowo secara berurutan.



Gambar 5.34 *Extreme Condition Test* Variabel Populasi Surabaya



Gambar 5.35 *Extreme Condition Test* Variabel Produksi Sampah Surabaya



Gambar 5.36 *Extreme Condition Test* Variabel Sampah Masuk TPA Benowo

Berdasarkan hasil *extreme condition test* pada gambar 5.34 hingga gambar 5.36 menunjukkan bahwa baik populasi Surabaya, produksi sampah Surabaya, dan sampah masuk TPA Benowo memiliki perilaku yang konsisten untuk kondisi normal, ekstrim atas (maksimal), dan ekstrim bawah (minimal). Perilaku konsisten tersebut ditunjukkan oleh pola grafik yang identik. Konsistensi perilaku dari ketiga variabel tersebut menunjukkan bahwa melalui *extreme condition test*, model dapat dinyatakan valid.

5.5.3.3 Model Behavior Barlas's Test

Model behavior Barlas's test merupakan salah satu metode validasi dalam sistem dinamik yang dilakukan dengan metode *black box* yakni dengan membandingkan rata-rata nilai *error* yang dihasilkan dari model yang diuji. Untuk menghitung rata-rata nilai *error* pada *Barlas's test* ini dapat menggunakan persamaan 2.1 dengan kriteria model dapat dikatakan valid jika nilai *error* tidak melebihi 0,1. Berikut merupakan perhitungan *error* menggunakan persamaan 2.1 untuk beberapa variabel.

Tabel 5.17 *Barlas's Test* Variabel Populasi Surabaya

Bulan	Data Points	Populasi Surabaya		*Error*
		Aktual	Simulasi	
0	1	2.904.751	2.904.751	0,000
1	31	2.991.831	2.939.446	0,018
2	60	2.937.102	2.969.334	0,011
3	91	3.004.516	2.991.583	0,004
4	121	3.021.811	3.013.565	0,003
5	152	3.015.409	3.009.636	0,002
Rata-rata *Error*				**0,006**

Tabel 5.18 *Barlas's Test* Variabel Pembentukan Sampah per Hari

Bulan	Data Points	Pembentukan Sampah per Hari		*Error*
		Aktual	Simulasi	
0	1	1.801	1.801	0,000
1	31	1.851	1.822	0,015
2	60	1.857	1.841	0,009
3	91	1.843	1.855	0,006
4	121	1.821	1.868	0,026
5	152	1.872	1.866	0,003
Rata-rata *Error*				**0,010**

Tabel 5.19 *Barlas's Test* Variabel Sampah Masuk TPS 3R per Hari

Bulan	Data Points	Sampah Masuk TPS 3R per Hari		*Error*
		Aktual	Simulasi	
0	1	887	891	0,005
1	31	896	897	0,001
2	60	905	892	0,015
3	91	912	941	0,032
4	121	919	908	0,012
5	152	919	912	0,007
Rata-rata *Error*				**0,012**

Tabel 5.20 *Barlas's Test* Variabel Sisa Sampah TPS 3R

Bulan	Data Points	Sisa Sampah TPS 3R per Hari		*Error*
		Aktual	Simulasi	
0	1	665	678	0,019
1	31	692	685	0,010
2	60	711	693	0,025
3	91	733	699	0,046
4	121	683	705	0,032
5	152	701	705	0,006
Rata-rata *Error*				**0,023**

Tabel 5.21 *Barlas's Test* Variabel Sampah Masuk TPA per Hari

Bulan	Data Points	Sampah Masuk TPA per Hari		*Error*
		Aktual	Simulasi	
0	1	1.671	1.594	0,046
1	31	1.645	1.611	0,021
2	60	1.698	1.628	0,041
3	91	1.622	1.641	0,012
4	121	1.601	1.653	0,033
5	152	1.669	1.653	0,009
Rata-rata *Error*				**0,027**

Berdasarkan perhitungan nilai *error* antara data aktual dan data hasil simulasi untuk beberapa variabel pada tabel 5.17 hingga 5.21, didapatkan bahwa untuk kelima variabel utama yang diuji memiliki tingkat *error* yang tidak melebihi 0,1 sehingga dari pengujian dengan metode *Barlas's test* tersebut model dapat dinyatakan valid.

5.5.3.4 Model Behavior Stastical Test

Model behavior stastical test merupakan salah satu metode validasi model dalam sistem dinamik dengan melakukan uji statistik terhadap data hasil simulasi dan data aktual. Uji statistik ini dilakukan dengan menggunakan uji hipotesis *t-test two paired samples* dimana hipotesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

Ho: Tidak terdapat perbedaan antara *output* simulasi dan data aktual

Ha: Terdapat perbedaan antara *output* simulasi dan data aktual

Kriteria penerimaan yang digunakan adalah nilai *p-value* yang dihasilkan dari uji tersebut. Jika *p-value* bernilai lebih dari alpha (α) yang digunakan yakni 0,05, maka Ho diterima begitu pula sebaliknya. Uji statistik ini dilakukan dengan menggunakan *software* Microsoft Excel. Berikut merupakan hasil uji statistik untuk beberapa variabel utama dalam model sistem dinamik yang dirancang sebelumnya.

Populasi Surabaya	*Aktual*	*Simulasi*
Mean	2979236,667	2971385,86
Variance	2248423631	1822930419
Observations	6	6
Pearson Correlation	0,82364515	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	0,708668271	
P(T<=t) one-tail	0,255096965	
t Critical one-tail	2,015048373	
P(T<=t) two-tail	**0,510193931**	
t Critical two-tail	2,570581836	

Gambar 5.37 Uji Statistik Variabel Populasi Surabaya

Pembentukan Sampah per Hari	*Aktual*	*Simulasi*
Mean	1840,833333	1842,26
Variance	664,1666667	700,5812
Observations	6	6
Pearson Correlation	0,489973345	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	-0,132434529	
P(T<=t) one-tail	0,449902574	
t Critical one-tail	2,015048373	
P(T<=t) two-tail	**0,899805149**	
t Critical two-tail	2,570581836	

Gambar 5.38 Uji Statistik Variabel Pembentukan Sampah per Hari

Sampah Masuk TPS 3R per Hari	*Aktual*	*Simulasi*
Mean	906,2433333	906,8333333
Variance	167,5674267	352,5666667
Observations	6	6
Pearson Correlation	0,580803254	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	-0,093719146	
P(T<=t) one-tail	0,464485949	
t Critical one-tail	2,015048373	
P(T<=t) two-tail	**0,928971898**	
t Critical two-tail	2,570581836	

Gambar 5.39 Uji Statistik Variabel Sampah Masuk TPS 3R per Hari

Sisa Sampah TPS 3R	*Aktual*	*Simulasi*
Mean	697,5	694,2083333
Variance	550,3	118,1571767
Observations	6	6
Pearson Correlation	0,491976455	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	0,394579519	
P(T<=t) one-tail	0,354711025	
t Critical one-tail	2,015048373	
P(T<=t) two-tail	**0,709422049**	
t Critical two-tail	2,570581836	

Gambar 5.40 Uji Statistik Variabel Sisa Sampah TPS 3R

Sampah Masuk TPA	*Aktual*	*Simulasi*
Mean	1651	1629,99
Variance	1262	584,477
Observations	6	6
Pearson Correlation	-0,409374374	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	5	
t Stat	0,119204045	
P(T<=t) one-tail	0,177430413	
t Critical one-tail	2,015048373	
P(T<=t) two-tail	**0,354860826**	
t Critical two-tail	2,570581836	

Gambar 5.41 Uji Statistik Variabel Sampah Masuk TPA

Berdasarkan uji statistik yang telah dilakukan terhadap kelima variabel utama pada gambar 5.37 hingga 5.41 didapatkan bahwa nilai *p-value* dari kelima variabel (data ber-*shading* biru muda) bernilai lebih dari 0,05 sehingga Ho diterima bahwa pada data kelima variabel tersebut tidak terdapat perbedaan antara data aktual dengan data hasil simulasi sehingga model dapat dinyatakan valid.

5.5.3.5 Analisis Validasi Model

Berdasarkan validasi model yang dilakukan pada sub-bab 5.5.3.1 hingga 5.5.3.4 didapatkan bahwa ke-empat metode validasi yang digunakan menyatakan bahwa model telah valid. Validasi yang dilakukan dengan ke-empat metode tersebut menunjukkan bahwa model telah valid secara struktur model melalui *parameter verification test* dan *extreme*

condition test serta model telah valid secara perilaku (*behavior*) melalui *Barlas's test* dan *statistical test*. Model yang telah valid tersebut menunjukkan bahwa data simulasi yang dihasilkan oleh model telah cukup representatif untuk menggambarkan aktivitas sistem dalam beberapa jangka waktu kedepan. Hal ini juga menunjukkan bahwa model yang telah dirancang dapat dipergunakan sebagai dasar dalam perancangan skenario kebijakan yang akan dijabarkan pada bab 6.

BAB 6
PERANCANGAN SKENARIO KEBIJAKAN

Bab ini akan menjelaskan mengenai skenario kebijakan yang dirancang untuk mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo. Perancangan skenario kebijakan didasari oleh hasil *running* simulasi yang telah dijelaskan pada sub-bab 5.5 sebelumnya dimana masih terdapat sekitar 200 ton sampah berlebih yang masuk ke TPA Benowo sehingga perlu direduksi untuk mencapai kesesuaian dengan kapasitas pengolahan sampah di TPA Benowo. Berikut merupakan perancangan skenario kebijakan yang dilakukan untuk mereduksi sampah tersebut.

6.1 Penentuan Alternatif Skenario Kebijakan

Skenario kebijakan yang akan diterapkan pada model simulasi kondisi eksisting ditetapkan dengan memerhatikan tujuan penelitian yang telah ditentukan sebelumnya. Penelitian ini memiliki tujuan utama untuk mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo sehingga sampah yang masuk ke TPA Benowo tidak melebihi kapasitas pengolahan sampah yakni 1.400 ton per hari. Selain itu, terdapat pula tujuan sekunder untuk mereduksi emisi sebesar 2,5 % sesuai dengan tujuan RAN-GRK yang telah ditetapkan oleh pemerintah pusat.

Berdasarkan analisis hasil *running* simulasi yang dilakukan pada sub-bab 5.5.2.9 didapatkan bahwa banyaknya sampah masuk TPA Benowo didominasi oleh banyaknya sampah rumah tangga yang tidak terjangkau oleh TPS 3R karena penyebaran TPS 3R yang tidak merata serta karena masih banyaknya sisa sampah TPS 3R yang diangkut akibat keterbatasan kapasitas pengolahan sampah terutama dalam proses pengomposan. Hal ini menunjukkan bahwa perlu adanya penambahan TPS 3R sehingga seluruh area pemukiman di Surabaya dapat dicakup oleh TPS 3R serta perlu adanya penambahan kapasitas pengolahan sampah. Terdapat dua skema utama yang digunakan dalam merancang alternatif skenario dalam model yang dirancang yakni (1) skema peningkatan cakupan area TPS 3R meliputi penambahan radius cakupan TPS 3R serta penambahan jumlah TPS 3R dan (2) peningkatan kapasitas pengolahan sampah untuk seluruh TPS 3R. Sebagai penjelasan

pendukung, berikut merupakan skenario yang akan dikembangkan pada model eksisting yang telah dirancang sebelumnya.

Tabel 6.1 Penentuan Skenario Kebijakan Pengelolaan Sampah di TPS 3R

Skenario		Rincian	Aspek
1	Peningkatan radius cakupan TPS 3R	Perubahan radius cakupan TPS 3R dari 2 km menjadi 3 km, meningkatkan cakupan area TPS 3R hingga 15%	Skema peningkatan cakupan TPS 3R
2	Penambahan jumlah TPS 3R	Penambahan jumlah TPS di area yang tidak terakomodasi TPS 3R sehingga cakupan TPS 3R menjadi 100%	
3	Penambahan kapasitas komposter untuk seluruh TPS 3R	Peningkatan kapasitas pengolahan kompos menjadi 2 kali lipat untuk mengurangi sisa sampah yang dihasilkan TPS 3R	Skema peningkatan kapasitas pengolahan sampah
4	Kombinasi skenario 2 dan 3	Penambahan kapasitas pengomposan dan penambahan jumlah TPS 3R	Skema peningkatan kapasitas dan peningkatan cakupan TPS 3R

Berdasarkan penentuan skenario pada tabel 6.1, terdapat empat jenis skenario yang akan diterapkan dalam model simulasi yang telah dirancang sebelumnya. Untuk aspek skema peningkatan cakupan TPS 3R, variabel yang akan diubah adalah prosentase cakupan TPS 3R sedangkan untuk skema peningkatan kapasitas pengolahan sampah, variabel yang akan diubah adalah kapasitas komposter per TPS. Selain itu, pada skenario empat yang merupakan kombinasi antara skenario dua dan tiga, maka baik variabel prosentase cakupan TPS 3R dan variabel kapasitas komposter akan diubah. Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing alternatif skenario beserta hasil *running* simulasinya.

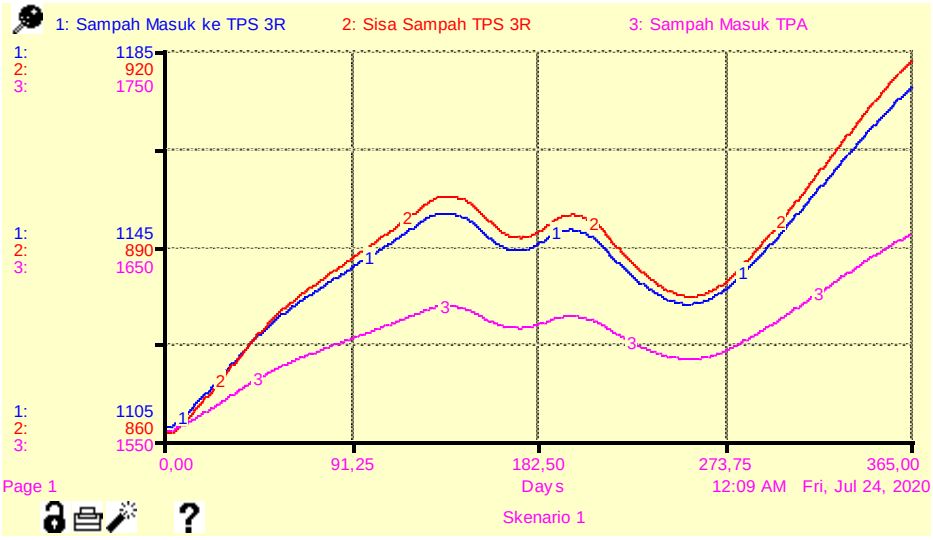
6.1.1 Skenario 1 – Peningkatan Radius Cakupan TPS 3R

Pada skenario pertama dilakukan penambahan radius cakupan TPS 3R dari semula per TPS 3R mengakomodasi sampah rumah tangga dengan radius 2 km, ditingkatkan menjadi 3 km dimana peningkatan 1 km ini didapatkan dari melakukan *running* simulasi dari peningkatan radius 100 meter hingga 1.500 meter dan disimpulkan peningkatan 1 km memberikan hasil paling optimal. Peningkatan radius cakupan TPS 3R ini secara otomatis akan meningkatkan jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R dimana akan terdapat area sampah rumah tangga yang

sebelumnya tidak tercakup TPS 3R akan dapat terakomodasi oleh TPS 3R tersebut. Pada skenario ini, variabel dalam model simulasi yang diubah adalah variabel prosentase cakupan TPS 3R. Selain itu, jumlah petugas TPS 3R juga bertambah seiring dengan peningkatan radius tersebut sehingga variabel jumlah petugas pengangkutan sampah, pengomposan, pengepresan, dan gasifikasi akan meningkat. Berikut merupakan hasil *running* dari penerapan skenario 1.

Tabel 6.2 Hasil *Running* Simulasi Skenario 1

Skenario 1					
Bulan	***Data Point* Simulasi**	**Sampah Masuk TPS 3R per Hari**	**Sisa Sampah TPS 3R**	**Sampah Masuk TPA per Hari**	**Emisi GRK Total**
0	0	1.107,58	861,14	1.554,50	66,85
1	30	1.119,74	870,70	1.571,82	67,49
2	59	1.131,69	880,76	1.589,31	68,00
3	90	1.140,30	887,94	1.601,86	68,41
4	120	1.148,59	894,78	1.613,90	68,81
5	151	1.149,13	895,85	1.615,12	68,87
6	181	1.145,02	891,90	1.608,78	68,72
7	212	1.145,37	892,77	1.609,68	68,77
8	243	1.134,39	883,52	1.593,61	68,29
9	273	1.135,79	884,16	1.595,28	68,29
10	304	1.149,03	894,95	1.614,41	68,80
11	334	1.163,79	907,17	1.635,86	69,55
12	365	1.177,14	918,32	1.655,35	70,27



Gambar 6.1 Hasil *Running* Simulasi Skenario 1

Berdasarkan data hasil *running* simulasi untuk skenario pertama baik pada tabel 6.2 maupun 6.1 didapatkan bahwa dengan menambah radius cakupan TPS 3R menjadi 3 km, TPS 3R menerima sampah hingga 1.100 ton sampah per harinya. Disisi lain, dengan bertambahnya jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R, sisa sampah TPS 3R meningkat menjadi 800 – 900 ton per. Hal ini terjadi karena kapasitas pengomposan tetap sedangkan jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R bertambah seiring dengan peningkatan radius cakupan TPS 3R. Selain itu, dengan adanya peningkatan radius cakupan TPS 3R menjadi 3 km dapat menghasulkan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo sebesar 1.550 – 1.650 ton sampah per hari. Jumlah tersebut masih berada di atas kapasitas TPA Benowo yakni 1.400 ton per hari sehingga skenario pertama ini dapat disimpulkan kurang memberikan pemecahan masalah atas kondisi yang dituju dalam penelitian ini. Selanjutnya, dari sektor emisi GRK yang dilepaskan oleh TPS 3R, penerapan skenario pertama ini menghasilkan total emisi GRK sebesar 57 – 59 ton CO_2 equivalent. Sebagai penjelasan pendukung, berikut merupakan komparasi antara hasil *running* simulasi untuk kondisi eksisting dan skenario pertama.

Tabel 6.3 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 1 Sektor Sampah TPS 3R

Bulan	***Data Point***	**Sampah Masuk TPS 3R per Hari**		**Sisa Sampah TPS 3R**	
	Simulasi	**Eksisting**	**Skenario 1**	**Eksisting**	**Skenario 1**
0	0	886,69	1.107,58	677,89	861,14
1	30	895,87	1.119,74	685,42	870,70
2	59	905,29	1.131,69	693,35	880,76
3	90	912,13	1.140,30	699,06	887,94
4	120	918,78	1.148,59	704,54	894,78
5	151	918,70	1.149,13	704,99	895,85
6	181	915,89	1.145,02	702,19	891,90
7	212	915,66	1.145,37	702,50	892,77
8	243	907,03	1.134,39	695,21	883,52
9	273	908,58	1.135,79	696,06	884,16
10	304	919,29	1.149,03	704,81	894,95
11	334	931,10	1.163,79	714,58	907,17
12	365	941,69	1.177,14	723,44	918,32

Berdasarkan data pada tabel 6.3 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan pada jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R dari semula pada kondisi eksisting hanya sekitar 880 – 940 ton sampah per hari meningkat menjadi 1.100 – 1.170 ton sampah

per hari dimana terjadi peningkatan sekitar 220 – 230 ton sampah per hari. Peningkatan jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R ini berdampak pada kuantitas pengolahan sampah yang ada di TPS 3R itu sendiri. Hal tersebut terbukti dengan adanya peningkatan sisa sampah TPS 3R dimana semula pada kondisi eksisting TPS 3R menghasilkan sisa sampah sebesar 670 – 720 ton sampah per hari namun pada skenario pertama ini TPS 3R dapat menghasilkan sisa sampah sebesar 860 – 920 ton sampah per hari. Bertambahnya sisa sampah yang dihasilkan oleh TPS 3R ini secara otomatis akan meningkatkan jumlah sampah yang diangkut ke TPA Benowo sehingga dapat meningkatkan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo sesuai dengan data pada tabel 6.4 berikut ini.

Tabel 6.4 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 1 Sektor TPA dan Emisi

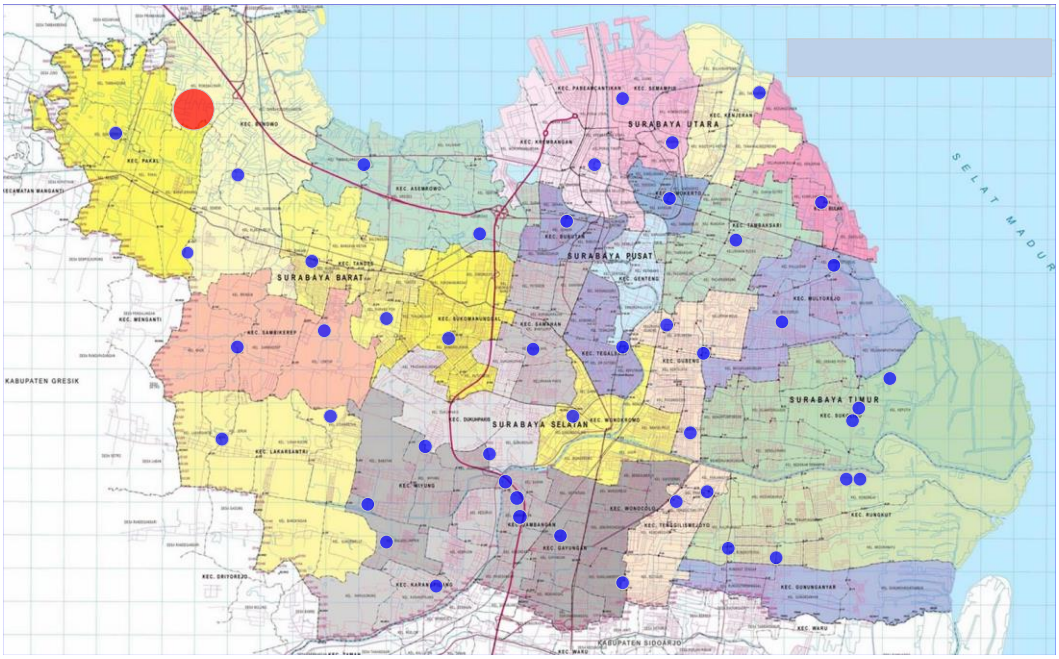
Bulan	***Data Point***	**Sampah Masuk TPA per Hari**		**Total Emisi GRK**	
	Simulasi	**Eksisting**	**Skenario 1**	**Eksisting**	**Skenario 1**
0	0	1.593,54	1.554,50	57,09	66,85
1	30	1.610,56	1.571,82	56,72	67,49
2	59	1.628,17	1.589,31	57,16	68,00
3	90	1.640,93	1.601,86	57,53	68,41
4	120	1.653,29	1.613,90	57,88	68,81
5	151	1.653,45	1.615,12	57,92	68,87
6	181	1.647,95	1.608,78	57,81	68,72
7	212	1.647,81	1.609,68	57,84	68,77
8	243	1.631,68	1.593,61	57,24	68,29
9	273	1.634,29	1.595,28	57,43	68,29
10	304	1.654,14	1.614,41	57,88	68,80
11	334	1.676,10	1.635,86	58,37	69,55
12	365	1.695,27	1.655,35	59,02	70,27

Berdasarkan hasil komparasi pada tabel 6.4 didapatkan bahwa terjadi penurunan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo namun terjadi peningkatan total emisi GRK yang dilepaskan oleh TPS 3R. Emisi GRK yang dihasilkan oleh sistem TPS 3R keseluruhan meningkat sebanyak 9 – 11 satuan emisi GRK dimana hal tersebut wajar terjadi karena terdapat peningkatan jumlah sampah yang diolah dan peningkatan jumlah pengangkutan sampahs secara simultan. Pada sektor persampahan di TPA, jumlah sampah yang masuk TPA berkisar antara 1.600 hingga 1.700 ton sampah per hari dimana menurun sekitar 50 ton menjadi 1.550 hingga 1.650 ton sampah per hari. Meskipun terjadi penurunan jumlah sampah yang

masuk ke TPA Benowo, namun jumlah sampah yang masuk ke TPA tersebut masih diatas kapasitas pengolahan sampah harian TPA Benowo yang hanya 1.400 ton per hari. Hal ini mengindikasikan bahwa skenario pertama ini belum dapat menjawab permasalahan yang ada sehingga penerapan skenario pertama ini masih berpotensi menimbulkan timbunan sampah di TPA Benowo hingga 150 – 250 ton sampah per harinya.

6.1.2 Skenario 2 – Penambahan Jumlah TPS 3R

Skenario kedua berfokus pada penyebaran TPS 3R dengan penambahan jumlah TPS 3R sehingga seluruh area pemukiman di Surabaya dapat tercakup TPS 3R. Penambahan TPS 3R dilakukan untuk area yang tidak tercakup TPS 3R sehingga prosentase cakupan TPS 3R di Surabaya meningkat menjadi 100%. Hal ini bertujuan agar seluruh sampah rumah tangga di Surabaya tidak langsung dikirimkan ke TPA Benowo melainkan diolah terlebih dahulu ke TPS 3R. Pada skenario ini, variabel yang akan diubah adalah prosentase cakupan TPS 3R yang ditingkatkan menjadi 100% serta variabel jumlah TPS 3R. Berdasarkan diskusi dengan pihak DKP Surabaya, diketahui bahwa untuk meningkatkan cakupan TPS 3R hingga 100%, Pemerintah Kota Surabaya perlu menambah TPS 3R sebanyak 19 unit sehingga TPS 3R yang ada di TPS 3R menjadi 47 unit dengan rincian persebaran sebagai berikut.

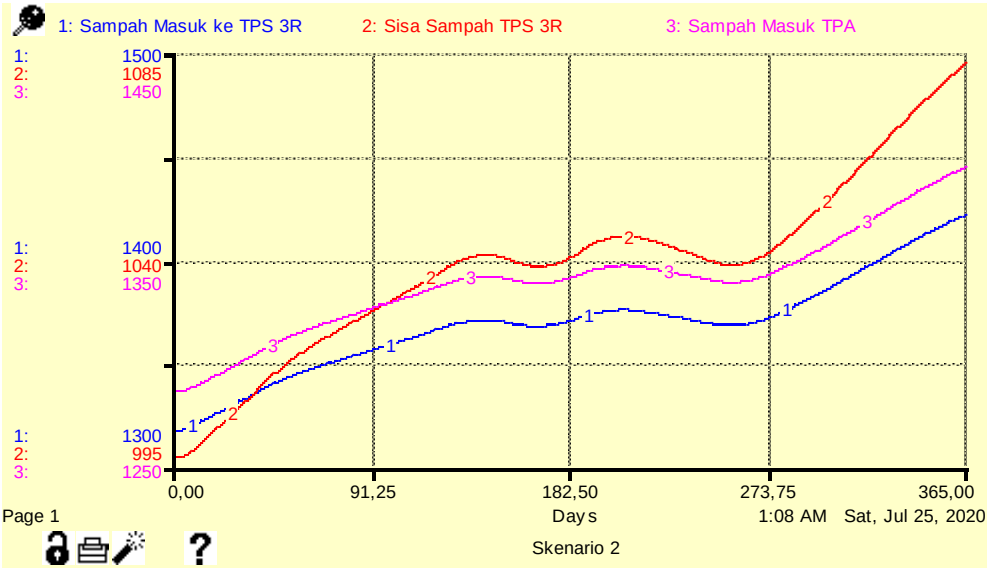


Gambar 6.2 Persebaran TPS 3R Skenario 2

Penentuan lokasi persebaran TPS 3R pada gambar 6.2 dilakukan dengan melakukan *forum group discussion* dengan pihak DKP Surabaya dimana lokasi TPS 3R tersebut ditentukan berdasarkan ketersediaan lahan milik Pemerintah Kota Surabaya. Berikut merupakan hasil *running* simulasi untuk skenario kedua.

Tabel 6.5 Hasil *Running* Simulasi Skenario 2

Skenario 2					
Bulan	***Data Point* Simulasi**	**Sampah Masuk TPS 3R per Hari**	**Sisa Sampah TPS 3R**	**Sampah Masuk TPA per Hari**	**Emisi GRK Total**
0	0	1.317,45	996,92	1.286,12	74,97
1	30	1.332,49	1.008,78	1.301,40	75,50
2	59	1.346,13	1.020,27	1.315,84	76,06
3	90	1.356,37	1.028,81	1.326,61	76,51
4	120	1.366,23	1.036,94	1.336,92	76,77
5	151	1.370,12	1.040,67	1.341,38	77,09
6	181	1.370,23	1.040,30	1.341,16	77,06
7	212	1.375,66	1.045,18	1.347,13	77,23
8	243	1.369,97	1.040,59	1.341,27	77,09
9	273	1.371,71	1.041,45	1.342,65	77,09
10	304	1.387,70	1.054,49	1.359,24	77,68
11	334	1.405,53	1.069,24	1.377,90	78,32
12	365	1.421,65	1.082,71	1.394,89	78,94



Gambar 6.3 Hasil *Running* Simulasi Skenario 2

Berdasarkan hasil *running* simulasi untuk skenario kedua pada tabel 6.5 dan gambar 6.3, didapatkan bahwa dengan peningkatan cakupan area TPS 3R hingga menjadi 100% dapat meningkatkan jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R secara signifikan. Total jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R berkisar antara 1.300 – 1.420 ton per hari dengan sisa sampah yang dikirimkan ke TPA Benowo sekitar 1.000 ton per harinya. Total sampah yang masuk ke TPA Benowo baik dari TPS 3R maupun dari sampah non rumah tangga pada skenario ini adalah sebanyak 1.280 hingga 1.400 ton per hari. Pada sektor dampak lingkungan, peningkatan cakupan area TPS 3R melalui penambahan jumlah TPS menghasilkan emisi GRK hingga 74 – 78 satuan emisi GRK per harinya. Sebagai penjelasan pendukung, berikut merupakan komparasi antara hasil *running* skenario kedua dengan kondisi eksisting.

Tabel 6.6 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 2 Sektor Sampah TPS 3R

Bulan	*Data Point* Simulasi	Sampah Masuk TPS 3R per Hari		Sisa Sampah TPS 3R	
		Eksisting	Skenario 2	Eksisting	Skenario 2
0	0	886,69	1.317,45	677,89	996,92
1	30	895,87	1.332,49	685,42	1.008,78
2	59	905,29	1.346,13	693,35	1.020,27
3	90	912,13	1.356,37	699,06	1.028,81
4	120	918,78	1.366,23	704,54	1.036,94
5	151	918,70	1.370,12	704,99	1.040,67

Tabel 6.6 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 2 Sektor Sampah TPS 3R (Lanjutan)

Bulan	*Data Point* Simulasi	Sampah Masuk TPS 3R per Hari		Sisa Sampah TPS 3R	
		Eksisting	Skenario 2	Eksisting	Skenario 2
6	181	915,89	1.370,23	702,19	1.040,30
7	212	915,66	1.375,66	702,50	1.045,18
8	243	907,03	1.369,97	695,21	1.040,59
9	273	908,58	1.371,71	696,06	1.041,45
10	304	919,29	1.387,70	704,81	1.054,49
11	334	931,10	1.405,53	714,58	1.069,24
12	365	941,69	1.421,65	723,44	1.082,71

Data pada tabel 6.6 menunjukkan komparasi antara kondisi eksisting dan penerapan skenario kedua dimana pada tabel tersebut dapat diketahui terjadi peningkatan jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R dengan cukup signifikan yakni hingga 400 ton per hari. Peningkatan tersebut terjadi seiring dengan semakin tersebarnya TPS 3R di area pemukiman Surabaya sehingga sampah rumah tangga yang dihasilkan penduduk Surabaya tidak langsung diangkut ke TPA Benowo melainkan akan diolah terlebih dahulu di TPS 3R. Selanjutnya, dengan bertambahnya jumlah sampah yang masuk ke TPS 3R meningkatkan jumlah sisa sampah yang dihasilkan oleh TPS 3R itu sendiri. Sisa sampah TPS 3R meningkat sekitar 300 ton menjadi sekitar 1.000 ton per hari dimana sisa sampah ini akan diangkut ke TPA Benowo. Komparasi jumlah sampah yang diangkut ke TPA Benowo dari skenario kedua ini dengan kondisi eksisting disajikan dalam tabel 6.7 berikut.

Tabel 6.7 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 2 Sektor TPA dan Emisi

Bulan	*Data Point* Simulasi	Sampah Masuk TPA per Hari		Total Emisi GRK	
		Eksisting	Skenario 2	Eksisting	Skenario 2
0	0	1.593,54	1.286,12	57,09	74,97
1	30	1.610,56	1.301,40	56,72	75,50
2	59	1.628,17	1.315,84	57,16	76,06
3	90	1.640,93	1.326,61	57,53	76,51
4	120	1.653,29	1.336,92	57,88	76,77
5	151	1.653,45	1.341,38	57,92	77,09
6	181	1.647,95	1.341,16	57,81	77,06
7	212	1.647,81	1.347,13	57,84	77,23
8	243	1.631,68	1.341,27	57,24	77,09
9	273	1.634,29	1.342,65	57,43	77,09

Tabel 6.7 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 2 Sektor TPA dan Emisi (Lanjutan)

Bulan	*Data Point* Simulasi	Sampah Masuk TPA per Hari		Total Emisi GRK	
		Eksisting	Skenario 2	Eksisting	Skenario 2
10	304	1.654,14	1.359,24	57,88	77,68
11	334	1.676,10	1.377,90	58,37	78,32
12	365	1.695,27	1.394,89	59,02	78,94

Berdasarkan data pada tabel 6.7 dapat diketahui bahwa terjadi penurunan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo hingga 300 ton menjadi hanya 1.300 – 1.400 ton per harinya dibandingkan dengan kondisi eksisting. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah TPS 3R telah cukup efektif untuk mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo hingga jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo tidak melebihi kapasitas pengolahan TPA Benowo yang hanya 1.400 ton per hari. Disisi lain, penambahan jumlah TPS 3R ini meningkatkan total emisi GRK yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R itu sendiri. Peningkatan tersebut terjadi hingga 20 ton satuan emisi GRK dari semula hanya 57 – 59 ton per hari menjadi 74 – 79 ton per hari. Hal ini wajar terjadi dikarenakan penambahan jumlah TPS 3R secara otomatis akan menambah jumlah pengelolaan sampah yang dilakukan seprti penambahan jumlah pengangkutan sampah, penambahan sistem pengomposan, gasifikasi, hingga penimbunan sampah plastik. Meskipun skenario kedua ini telah efektif mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo hingga tidak melebihi kapasitas pengolahan TPA, namun perlu dipertimbangkan total emisi yang dihasilkan oleh skenario kedua ini dimana terjadi peningkatan emisi GRK yang dilepas oleh TPS 3R dengan cukup signifikan.

6.1.3 Skenario 3 – Peningkatan Kapasitas Komposter untuk Seluruh TPS 3R

Skenario ketiga berfokus pada pengurangan sisa sampah pengomposan yang relatif banyak yakni hingga 80 ton dimana sisa sampah pengomposan ini terjadi karena keterbatasan kapasitas pengomposan. Sampah yang dikomposkan per hari sekitar 140 ton sedangkan kapasitas yang dimiliki seluruh TPS 3R untuk saat ini hanya 56 ton dengan rincian 2 ton komposter per TPS 3R. Pada skenario ini, variabel yang diubah dari model eksisting adalah kapasitas komposter per TPS 3R dari semula 2 ton menjadi 3 ton, 4 ton, dan 5 ton. Masing-masing skenario kapasitas

pengomposan akan di *running* dan akan dilakukan komparasi. Sebagai penjelasan pendukung, berikut merupakan rincian dari beberapa sub-skenario yang akan diuji dalam skenario ketiga ini.

Tabel 6.8 Rincian Sub-skenario Ketiga

Skenario	Variabel		
	Prosentase Cakupan TPS 3R	Jumlah TPS 3R	Kapasitas Komposter per TPS 3R
Skenario 3A	60%	28	3 ton
Skenario 3B	60%	28	4 ton
Skenario 3C	60%	28	5 ton

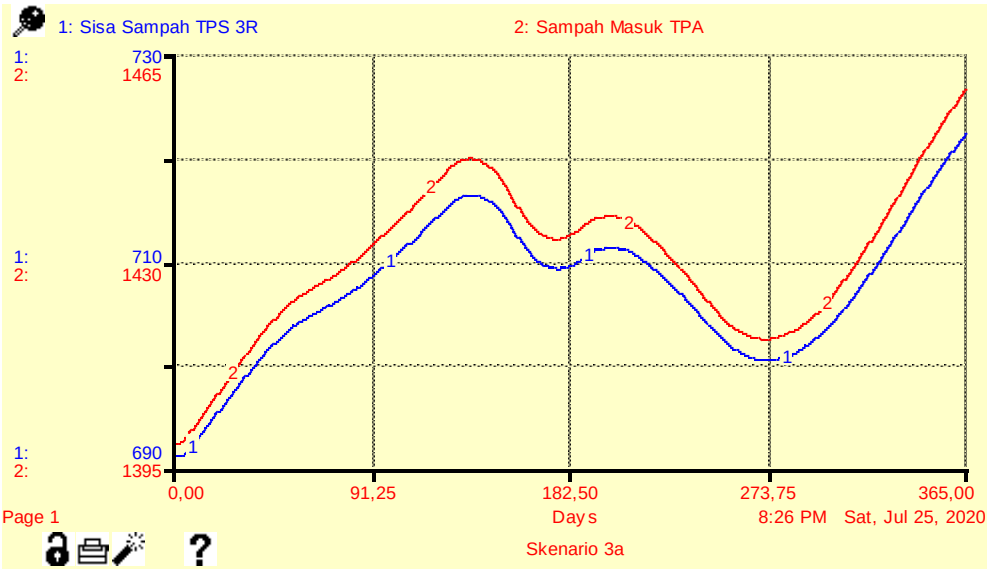
Berikut merupakan hasil *running* simulasi skenario ketiga untuk masing-masing sub-skenario.

- Skenario 3a – Peningkatan Kapasitas Komposter menjadi 3 Ton

Pada skenario ini, kapasitas komposter per TPS 3R ditingkatkan 1 ton dari semula hanya 2 ton menjadi 3 ton pengolahan sampah per hari. Berikut merupakan hasil *running* simulasi untuk skenario ini.

Tabel 6.9 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3A

Skenario 3A					
Bulan	*Data Point* Simulasi	Sisa Sampah Pengomposan	Sisa Sampah TPS 3R	Sampah Masuk TPA per Hari	Emisi GRK Total
0	0	59,10	691,11	1399,01	74,93
1	30	60,39	698,30	1413,20	75,43
2	59	61,53	704,36	1424,59	75,92
3	90	62,28	708,48	1432,52	76,27
4	120	63,33	714,18	1443,48	76,72
5	151	63,45	714,47	1443,30	76,78
6	181	62,47	709,43	1434,23	76,33
7	212	62,72	710,63	1436,18	76,42
8	243	61,61	704,53	1424,36	75,96
9	273	60,81	700,38	1416,78	75,70
10	304	61,47	704,15	1424,36	75,89
11	334	63,07	712,89	1441,20	76,63
12	365	64,78	722,09	1458,72	77,41



Gambar 6.4 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3A

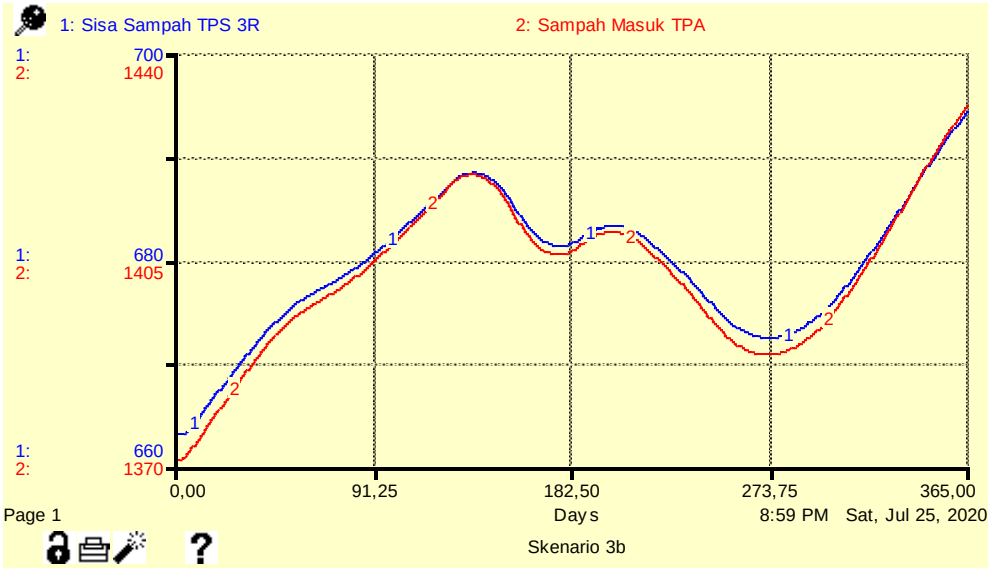
Berdasarkan hasil *running* simulasi skenario 3A pada tabel 6.9 serta pada gambar 6.4 diketahui bahwa peningkatan kapasitas komposter menjadi 3 ton belum dapat mengeliminasi sisa sampah pengomposan sehingga masih terdapat sisa sampah pengomposan sebanyak 59 – 64 ton per hari. Disisi lain, TPS 3R secara langsung dapat meningkatkan jumlah sampah yang diolah. Hal tersebut dapat dilihat dari penurunan jumlah sampah masuk TPA per hari dibandingkan kondisi eksisting. Namun, jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo masih di berada relative di atas kapasitas pengolahan sampah TPA yakni melebihi 1.400 ton dan memiliki tendensi untuk meningkat setiap bulannya. Hal ini menunjukkan bahwa skenario ini belum efektif sepenuhnya untuk mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo dengan target kurang dari 1.400 ton per hari. Selain itu, pada sektor dampak lingkungan dapat dilihat bahwa penerapan skenario ini dapat menghasilkan emisi GRK sebanyak 74 – 77 ton satuan emisi GRK per hari.

- Skenario 3B – Peningkatan Kapasitas Komposter menjadi 4 Ton

Pada skenario ini, kapasitas komposter per TPS 3R ditingkatkan 2 ton menjadi 4 ton pengolahan sampah per harinya. Berikut merupakan hasil *running* simulasi untuk skenario ini.

Tabel 6.10 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3B

Skenario 3B					
Bulan	***Data Point* Simulasi**	**Sisa Sampah Pengomposan**	**Sisa Sampah TPS 3R**	**Sampah Masuk TPA per Hari**	**Emisi GRK Total**
0	0	31,10	663,11	1.371,01	84,35
1	30	32,39	670,30	1.385,20	84,89
2	59	33,53	676,36	1.396,59	85,40
3	90	34,28	680,48	1.404,52	85,77
4	120	35,33	686,18	1.415,48	86,25
5	151	35,45	686,47	1.415,30	86,31
6	181	34,47	681,43	1.406,23	85,84
7	212	34,72	682,63	1.408,18	85,94
8	243	33,61	676,53	1.396,36	85,45
9	273	32,81	672,38	1.388,78	85,17
10	304	33,47	676,15	1.396,36	85,38
11	334	35,07	684,89	1.413,20	86,16
12	365	36,78	694,09	1.430,72	86,98



Gambar 6.5 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3B

Berdasarkan hasil *running* simulasi untuk skenario 3B pada tabel 6.10 dan gambar 6.5, dapat diketahui bahwa dengan meningkatkan kapasitas komposter menjadi 4 ton dapat menghasilkan sisa sampah pengomposan sebesar 31 – 36 ton per hari. Pada gambar 6.4 dapat dilihat bahwa jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo bersifat cukup fluktuatif dimana pada tabel 6.10 dapat diketahui bahwa sampah yang masuk ke TPA Benowo berkisar antara 1.370 – 1.430 ton per hari. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan skenario ini hanya dapat mereduksi jumlah

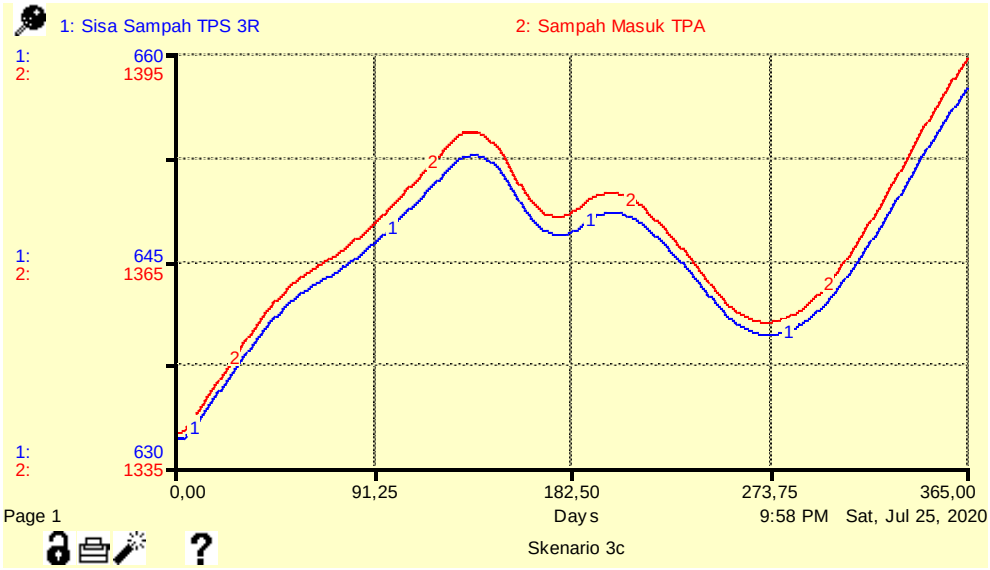
sampah yang masuk ke TPA Benowo sesuai target hanya untuk bulan ke 0 hingga bulan ke 2. Untuk bulan selanjutnya, sampah yang masuk ke TPA Benowo berada di atas 1.400 ton sehingga masih terdapat potensi penumpukan sampah karena kapasitas pengolahan sampah di TPA Benowo hanya 1.400 ton per hari. Sementara itu, pada sektor dampak lingkungan, dihasilkan emisi GRK sebanyak 84 – 86 ton per hari dari penerapan skenario ini.

- Skenario 3C – Peningkatan Kapasitas Komposter menjadi 5 Ton

Pada skenario ini, kapasitas komposter per TPS 3R ditingkatkan 3 ton menjadi 5 ton dari kondisi semula. Berikut merupakan hasil *running* simulasi untuk skenario ini.

Tabel 6.11 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3C

	Skenario 3C				
Bulan	***Data Point* Simulasi**	**Sisa Sampah Pengomposan**	**Sisa Sampah TPS 3R**	**Sampah Masuk TPA per Hari**	**Emisi GRK Total**
0	0	0	632,01	1.339,91	92,59
1	30	0	637,91	1.352,81	93,37
2	59	0	642,84	1.363,06	94,11
3	90	0	646,20	1.370,24	94,64
4	120	0	650,85	1.380,15	95,32
5	151	0	651,02	1.379,85	95,40
6	181	0	646,96	1.371,76	94,75
7	212	0	647,91	1.373,46	94,88
8	243	0	642,92	1.362,74	94,18
9	273	0	639,57	1.355,97	93,74
10	304	0	642,68	1.362,88	94,07
11	334	0	649,82	1.378,13	95,17
12	365	0	657,31	1.393,94	96,33



Gambar 6.6 Hasil *Running* Simulasi Skenario 3C

Berdasarkan hasil *running* simulasi untuk skenario 3C pada tabel 6.11 menunjukkan bahwa penambahan kapasitas komposter menjadi 5 ton dapat mereduksi sisa sampah pengomposan hingga habis. Dengan kata lain, penambahan kapasitas komposter menjadi 5 ton ini menyebabkan TPS 3R dapat memproses sampah yang dikomposkan secara menyeluruh. Hal ini berdampak pada jumlah sampah yang diangkut ke TPA Benowo semakin menurun pula. Terbukti pada tabel 6.11, dapat diketahui bahwa jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo hanya sekitar 1.300 – 1.400 ton per hari dimana kuantitas ini tidak melebihi kapasitas pengolahan sampah di TPA Benowo itu sendiri. Dari sektor persampahan, skenario 3C ini cukup efektif untuk mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo, namun dari sektor emisi, skenario ini menghasilkan emisi yang lebih besar dibandingkan skenario ketiga lainnya yakni hingga 92 – 96 ton satuan emisi GRK.

Untuk menganalisa lebih lanjut dari skenario penambahan kapasitas komposter ini, berikut merupakan komparasi hasil *running* simulasi dari ketiga sub-skenario baik untuk sektor persampahan dan sektor emisi.

Tabel 6.12 Komparasi Skenario 3 untuk Sektor Persampahan

Bulan	Jumlah Sampah Masuk TPA per Hari			
	Data Point Simulasi	Skenario 3A	Skenario 3B	Skenario 3C
0	0	1399,01	1.371,01	1.339,91
1	30	1413,20	1.385,20	1.352,81

Tabel 6.12 Komparasi Skenario 3 untuk Sektor Persampahan (Lanjutan)

Bulan	Jumlah Sampah Masuk TPA per Hari			
	Data Point Simulasi	Skenario 3A	Skenario 3B	Skenario 3C
2	59	1424,59	1.396,59	1.363,06
3	90	1432,52	1.404,52	1.370,24
4	120	1443,48	1.415,48	1.380,15
5	151	1443,30	1.415,30	1.379,85
6	181	1434,23	1.406,23	1.371,76
7	212	1436,18	1.408,18	1.373,46
8	243	1424,36	1.396,36	1.362,74
9	273	1416,78	1.388,78	1.355,97
10	304	1424,36	1.396,36	1.362,88
11	334	1441,20	1.413,20	1.378,13
12	365	1458,72	1.430,72	1.393,94

Tabel 6.13 Komparasi Skenario 3 untuk Sektor Emisi

Bulan	Total Emisi GRK			
	Data Point Simulasi	Skenario 3A	Skenario 3B	Skenario 3C
0	0	74,93	84,35	92,59
1	30	75,43	84,89	93,37
2	59	75,92	85,40	94,11
3	90	76,27	85,77	94,64
4	120	76,72	86,25	95,32
5	151	76,78	86,31	95,40
6	181	76,33	85,84	94,75
7	212	76,42	85,94	94,88
8	243	75,96	85,45	94,18
9	273	75,70	85,17	93,74
10	304	75,89	85,38	94,07
11	334	76,63	86,16	95,17
12	365	77,41	86,98	96,33

Berdasarkan hasil komparasi yang dilakukan pada tabel 6.12 dapat diketahui bahwa skenario 3A dan 3B tidak mampu mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo menjadi ≤ 1.400 ton per hari. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan skenario 3A dan 3B dapat berpotensi menimbulkan penumpukan sampah di TPA Benowo dikarenakan sampah yang masuk ke TPA masih berada di atas kapasitas pengolahan sampah harian TPA Benowo tersebut. Disisi lain, skenario 3C dapat mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo sehingga sampah yang diterima TPA Benowo tidak melebihi kapasitas pengolahan sampah harian. Disini dapat disimpulkan bahwa skenario paling efektif untuk mereduksi sampah yang masuk ke TPA Benowo adalah skenario 3C yakni dengan penambahan kapasitas

komposter sebanyak 3 ton untuk masing-masing TPS 3R sehingga kapasitas komposter untuk masing-masing TPS 3R menjadi 5 ton per hari.

Selain itu pada tabel 6.13 dapat dilihat bahwa skenario 3C memiliki dampak lingkungan yang paling besar dengan melepas total emisi GRK paling banyak diantara skenario lainnya. Hal ini dapat terjadi karena semakin besar kapasitas pengomposan, maka semakin banyak pula sampah yang dikomposkan. Emisi yang dilepaskan oleh sistem pengomposan sendiri bergantung pada jumlah sampah yang dikomposkan sehingga dengan penambahan kapasitas komposter menjadi 5 ton, maka terjadi peningkatan jumlah sampah yang diolah dan peningkatan pada emisi yang dilepaskan secara simultan.

Berdasarkan analisis yang dilakukan baik pada sektor persampahan dan sektor emisi, dapat disimpulkan bahwa skenario 3C merupakan satu-satunya skenario yang dapat mereduksi jumlah sampah masuk ke TPA hingga mencapai target kapasitas pengolahan sampah harian di TPA Benowo yakni 1.400 ton. Namun penerapan skenario ini meningkatkan jumlah emisi GRK yang dilepaskan oleh sistem pengolahan sampah di TPS 3R itu sendiri. Secara keseluruhan pada skenario ketiga ini, skenario yang paling tepat diterapkan di TPS 3R adalah skenario 3C yakni dengan menambah kapasitas komposter sebesar 3 ton sehingga kapasitas pengomposan di TPS 3R meningkat menjadi 5 ton. Peningkatan kapasitas komposter ini dilakukan untuk seluruh 28 TPS 3R yang ada di Surabaya.

Sebagai penjelasan pendukung, berikut merupakan komparasi antara hasil *running* simulasi skenario 3C dengan kondisi eksisting.

Tabel 6.14 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 4 Sektor TPA dan Emisi

Bulan	***Data Point***	**Sampah Masuk TPA per Hari**		**Total Emisi GRK**	
	Simulasi	**Eksisting**	**Skenario 3C**	**Eksisting**	**Skenario 3C**
0	0	1.593,54	1.339,91	57,09	92,59
1	30	1.610,56	1.352,81	56,72	93,37
2	59	1.628,17	1.363,06	57,16	94,11
3	90	1.640,93	1.370,24	57,53	94,64
4	120	1.653,29	1.380,15	57,88	95,32
5	151	1.653,45	1.379,85	57,92	95,40
6	181	1.647,95	1.371,76	57,81	94,75
7	212	1.647,81	1.373,46	57,84	94,88
8	243	1.631,68	1.362,74	57,24	94,18
9	273	1.634,29	1.355,97	57,43	93,74

Tabel 6.14 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 4 Sektor TPA dan Emisi (Lanjutan)

Bulan	*Data Point* Simulasi	Sampah Masuk TPA per Hari		Total Emisi GRK	
		Eksisting	Skenario 3C	Eksisting	Skenario 3C
10	304	1.654,14	1.362,88	57,88	94,07
11	334	1.676,10	1.378,13	58,37	95,17
12	365	1.695,27	1.393,94	59,02	96,33

Berdasarkan komparasi hasil *running* simulasi antara skenario 3C dengan kondisi eksisting pada tabel 6.14 diketahui bahwa penerapan skenario 3C ini dapat menurunkan jumlah sampah yang masuk sebesar 250 – 300 ton per hari dari semula 1.590 – 1.700 ton menjadi 1.350 – 1.400 ton per harinya. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan skenario 3C secara efektif dapat mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo sehingga TPA Benowo tidak menerima sampah diatas kapasitas pengolahan harian yang hanya 1.400 ton. Disisi lain, dengan penambahan kapasitas komposter menjadi 5 ton menyebabkan adanya kenaikan pada jumlah sampah yang diproses di TPS 3R khususnya pada proses pengomposan sehingga hal tersebut meningkatkan nilai emisi yang dilepaskan oleh TPS 3R itu sendiri. Berdasarkan tabel 6.14 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai emisi GRK total sebanyak 35 – 37 ton satuan emisi GRK dimana sistem TPS 3R semula hanya menghasilkan 57 – 59 ton emisi GRK meningkat menjadi 92 – 96 ton emisi GRK per harinya.

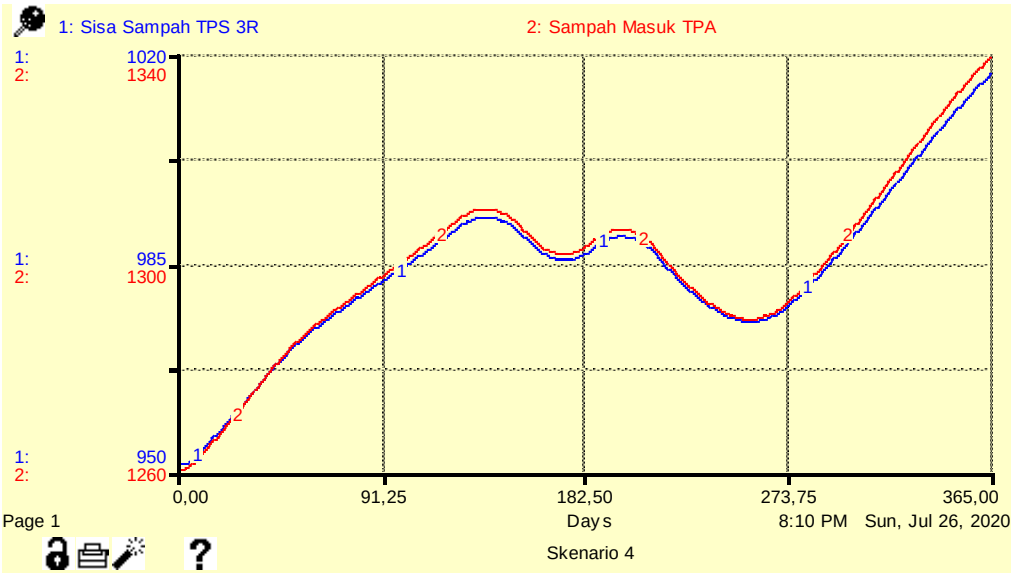
6.1.4 Skenario 4 – Penambahan Jumlah TPS 3R dan Kapasitas Komposter

Skenario keempat merupakan skenario kombinasi dari skenario kedua dan ketiga dimana jumlah TPS 3R ditambahkan sesuai dengan rincian pada skenario kedua dan kapasitas komposter ditambahkan sesuai dengan rincian pada skenario ketiga. Tujuan dari skenario ini adalah untuk mencakup seluruh sampah rumah tangga di Surabaya namun juga dengan meningkatkan kapasitas pengomposan sehingga sisa sampah pengomposan dapat diminimalisir. Skenario ini dilakukan dengan merancang beberapa sub-skenario dimana perubahan pada model simulasi dilakukan untuk variabel prosentase cakupan TPS 3R, jumlah TPS 3R, dan kapasitas komposter per TPS. Jumlah TPS 3R ditingkatkan berdasarkan analisis pada skenario kedua yakni menjadi 47 TPS 3R dengan prosentase cakupan TPS 3R

meningkat menjadi 100% sedangkan untuk kapasitas komposter ditingkatkan menjadi 3 ton. Berikut merupakan hasil *running* simulasi skenario keempat.

Tabel 6.15 Hasil *Running* Simulasi Skenario 4

Skenario 4					
Bulan	***Data Point* Simulasi**	**Sisa Sampah Pengomposan**	**Sisa Sampah TPS 3R**	**Sampah Masuk TPA per Hari**	**Emisi GRK Total**
0	0	0	951,25	1.260,36	86,78
1	30	0	962,23	1.273,81	87,53
2	59	0	973,66	1.287,54	88,24
3	90	0	981,82	1.297,37	88,80
4	120	0	989,61	1.306,78	89,34
5	151	0	990,72	1.307,87	89,44
6	181	0	986,32	1.302,78	89,20
7	212	0	987,21	1.303,62	89,28
8	243	0	976,70	1.291,00	88,61
9	273	0	977,52	1.292,20	88,60
10	304	0	989,84	1.307,14	89,33
11	334	0	1.003,75	1.323,93	90,33
12	365	0	1.016,43	1.339,20	91,10



Gambar 6.7 Hasil *Running* Simulasi Skenario 4

Berdasarkan hasil *running* simulasi pada tabel 6.14 dapat diketahui bahwa peningkatan kapasitas komposter menjadi 3 ton dengan penambahan jumlah TPS 3R dapat mengurangi sisa sampah pengomposan hingga habis. Penerapan skenario

ini menghasilkan sisa sampah TPS 3R sebanyak 950 – 1.016 ton per hari dimana sisa sampah ini hanya bersumber dari sampah yang tidak diolah sedangkan untuk sampah yang diolah, semua sampah diproses habis oleh TPS 3R. Pada skenario ini pula, dihasilkan sampah yang masuk ke TPA Benowo sebanyak 1.260 – 1.340 ton per hari dengan nilai emisi GRK total yang dilepaskan oleh TPS 3R keseluruhan adalah sebesar 86 – 91 ton per hari.

Sebagai penjelasan pendukung, berikut merupakan komparasi antara penerapan skenario keempat ini dengan kondisi eksisting.

Tabel 6.16 Komparasi Simulasi Eksisting dan Skenario 4 Sektor TPA dan Emisi

Bulan	*Data Point* Simulasi	Sampah Masuk TPA per Hari		Total Emisi GRK	
		Eksisting	Skenario 4	Eksisting	Skenario 4
0	0	1.593,54	1.260,36	57,09	86,78
1	30	1.610,56	1.273,81	56,72	87,53
2	59	1.628,17	1.287,54	57,16	88,24
3	90	1.640,93	1.297,37	57,53	88,80
4	120	1.653,29	1.306,78	57,88	89,34
5	151	1.653,45	1.307,87	57,92	89,44
6	181	1.647,95	1.302,78	57,81	89,20
7	212	1.647,81	1.303,62	57,84	89,28
8	243	1.631,68	1.291,00	57,24	88,61
9	273	1.634,29	1.292,20	57,43	88,60
10	304	1.654,14	1.307,14	57,88	89,33
11	334	1.676,10	1.323,93	58,37	90,33
12	365	1.695,27	1.339,20	59,02	91,10

Berdasarkan data pada table 6.15 dapat diketahui bahwa penerapan skenario keempat ini dapat mereduksi sampah masuk ke TPA Benowo hingga 340 – 360 ton dimana semula sampah masuk ke TPA Benowo sebanyak 1.600 – 1.700 ton per hari menurun menjadi 1.260 – 1.340 ton per hari. Hal ini menunjukkan bahwa sampah yang masuk ke TPA Benowo melalui skenario keempat ini sudah tidak melebihi kapasitas pengolahan sampah harian TPA Benowo yang hanya 1.400 per hari sehingga potensi penumpukan sampah di TPA tersebut dapat diminimalisir. Namun disisi lain, penerapan skenario keempat ini meningkatkan potensi dampak lingkungan. Hal tersebut dapat dilihat dari terjadinya peningkatan nilai emisi GRK total yang dilepaskan oleh TPS 3R yang semula hanya 57 – 59 ton satuan emisi GRK per hari meningkat menjadi 86 – 91 ton satuan emisi GRK per harinya.

Peningkatan emisi GRK ini terjadi karena terdapat peningkatan aktivitas operasional pada TPS 3R dengan penambahan jumlah TPS ataupun dengan peningkatan kapasitas komposter. Peningkatan aktivitas operasional yang dimaksud yakni adalah aktivitas pengangkutan sampah, pengolahan gasifikasi, pengomposan, dan penimbunan sampah plastik yang dimana emisi GRK yang dilepaskan oleh sistem TPS 3R bergantung pada jumlah sampah yang diolah pada aktivitas-aktivitas tersebut.

6.2 Perbandingan *Output* Skenario Kebijakan

Hasil *running* simulasi skenario kebijakan yang telah dilakukan pada sub-bab 6.1 kemudian dilakukan perbandingan antar skenario untuk didapatkan skenario paling sesuai untuk penyelesaian permasalahan yang ada. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo melalui sistem TPS 3R dengan memerhatikan dampak lingkungan yang dihasilkan. Pemilihan skenario terbaik ditentukan berdasarkan dua parameter sebagai berikut.

1. Reduksi sampah ke TPA – skenario kebijakan harus dapat mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo sehingga jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo tidak melebihi kapasitas pengolahan harian. Kapasitas pengolahan harian dari TPA Benowo sendiri hanya 1.400 ton sehingga parameter keberhasilan skenario kebijakan adalah dapat mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo menjadi ≤ 1.400 ton per hari.
2. Dampak lingkungan – skenario kebijakan yang diterapkan diharapkan dapat melepaskan emisi GRK seminimal mungkin sehingga kriteria skenario terbaik yang diterapkan adalah skenario dengan nilai total emisi GRK paling minimum (*smallest better*).

Berikut merupakan komparasi antar skenario baik untuk sektor persampahan serta sektor dampak lingkungan.

Tabel 6.17 Komparasi Skenario Kebijakan Sektor Persampahan

Jumlah Sampah Masuk TPA per Hari					
Bulan	**Eksisting**	**Skenario 1**	**Skenario 2**	**Skenario 3C**	**Skenario 4**
0	1.593,54	1.554,50	1.286,12	1.339,91	1.260,36
1	1.610,56	1.571,82	1.301,40	1.352,81	1.273,81
2	1.628,17	1.589,31	1.315,84	1.363,06	1.287,54

Tabel 6.17 Komparasi Skenario Kebijakan Sektor Persampahan (Lanjutan)

Jumlah Sampah Masuk TPA per Hari					
Bulan	**Eksisting**	**Skenario 1**	**Skenario 2**	**Skenario 3C**	**Skenario 4**
3	1.640,93	1.601,86	1.326,61	1.370,24	1.297,37
4	1.653,29	1.613,90	1.336,92	1.380,15	1.306,78
5	1.653,45	1.615,12	1.341,38	1.379,85	1.307,87
6	1.647,95	1.608,78	1.341,16	1.371,76	1.302,78
7	1.647,81	1.609,68	1.347,13	1.373,46	1.303,62
8	1.631,68	1.593,61	1.341,27	1.362,74	1.291,00
9	1.634,29	1.595,28	1.342,65	1.355,97	1.292,20
10	1.654,14	1.614,41	1.359,24	1.362,88	1.307,14
11	1.676,10	1.635,86	1.377,90	1.378,13	1.323,93
12	1.695,27	1.655,35	1.394,89	1.393,94	1.339,20

Berdasarkan hasil komparasi pada tabel 6.16 dapat diketahui bahwa skenario yang dapat mencapai target parameter pertama yakni skenario 2, skenario 3C, dan skenario 4 dimana ketiga skenario tersebut berhasil mereduksi sampah yang masuk ke TPA Benowo hingga menjadi kurang dari 1.400 ton sedangkan untuk skenario pertama tidak mencapai parameter tersebut dan hanya dapat mereduksi sampah hingga menjadi 1.550 – 1.650 ton per hari. Dapat disimpulkan bahwa dengan penilaian terhadap parameter pertama yakni reduksi sampah, skenario terbaik yang dapat diterapkan adalah skenario 2, skenario 3C, dan skenario 4 sedangkan skenario 1 tidak dapat menyelesaikan permasalahan reduksi sampah yang masuk ke TPA sehingga skenario 1 ini dieliminasi sebagai pilihan skenario terbaik.

Dari ketiga skenario yakni skenario 2, skenario 3C, dan skenario 4, diketahui bahwa skenario dengan reduksi sampah terbesar adalah skenario 4 dengan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo hanya berkisar antara 1.260 – 1.340 ton sampah per hari. Selanjutnya disusul oleh skenario 2 dengan jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo berkisar antara 1.280 – 1.400 ton per hari dan skenario 3C dengan reduksi sampah paling sedikit diantara dua skenario lainnya yakni hanya berkisar antara 1.340 – 1.400 ton sampah per hari. Dapat disimpulkan bahwa dari perspektif parameter pertama, skenario terbaik secara berurutan adalah (1) skenario 4, (2) skenario 2, dan (3) skenario 3C. Selanjutnya perlu dianalisis lebih lanjut mengenai parameter kedua yakni parameter dampak lingkungan. Berikut merupakan komparasi antar skenario untuk aspek dampak lingkungan.

Tabel 6.18 Komparasi Skenario Kebijakan Sektor Dampak Lingkungan

Emisi GRK Total					
Bulan	**Eksisting**	**Skenario 1**	**Skenario 2**	**Skenario 3C**	**Skenario 4**
0	57,09	66,85	74,97	92,59	86,78
1	56,72	67,49	75,50	93,37	87,53
2	57,16	68,00	76,06	94,11	88,24
3	57,53	68,41	76,51	94,64	88,80
4	57,88	68,81	76,77	95,32	89,34
5	57,92	68,87	77,09	95,40	89,44
6	57,81	68,72	77,06	94,75	89,20
7	57,84	68,77	77,23	94,88	89,28
8	57,24	68,29	77,09	94,18	88,61
9	57,43	68,29	77,09	93,74	88,60
10	57,88	68,80	77,68	94,07	89,33
11	58,37	69,55	78,32	95,17	90,33
12	59,02	70,27	78,94	96,33	91,10

Berdasarkan hasil komparasi dampak lingkunan antar skenario pada tabel 6.17 dapat diketahui bahwa dari keempat skenario kebijakan yang disimulasikan, total emisi GRK yang paling terkecil dilepaskan oleh TPS 3R adalah skenario 1 namun skenario ini tidak dapat menyelesaikan permasalahan pada parameter reduksi sampah sehingga skenario 1 ini dieliminasi dari opsi skenario terbaik. Dari ketiga skenario lainnya yakni skenario 2, skenario 3C, dan skenario 4 diketahui bahwa emisi GRK terkecil yang dihasilkan oleh TPS 3R adalah skenario 2 dengan emisi GRK dilepaskan sebesar 74 – 78 ton disusul oleh skenario 4 dengan emisi yang dilepaskan sebanyak 86 – 91 ton per hari dan diakhiri oleh skenario 3C dengan melepaskan emisi sebanyak 92 – 96. Dapat disimpulkan dari parameter kedua yakni parameter dampak lingkungan, skenario terbaik adalah (1) skenario 2, (2) skenario 4, dan (3) skenario 3C secara berurutan.

Untuk menganalisis lebih lanjut mengenai skenario terbaik yang dapat diterapkan, berikut merupakan komparasi urutan skenario terbaik dari masing-masing parameter.

Tabel 6.19 Komparasi Urutan Skenario Terbaik

Skenario	**Parameter Reduksi Sampah**	**Parameter Dampak Lingkungan**
Skenario 1	Tidak memberikan solusi penyelesaian masalah	
Skenario 2	2	1
Skenario 3C	3	3
Skenario 4	1	2

Berdasarkan perbandingan urutan skenario terbaik pada tabel 6.18 dapat diketahui bahwa skenario terbaik untuk menyelesaikan permasalahan jumlah sampah yang masuk ke TPA adalah skenario 4 namun memiliki dampak lingkungan yang tidak sekecil skenario 2. Untuk skenario 3C, baik dari parameter reduksi sampah maupun parameter dampak lingkungan memiliki urutan paling rendah dibandingkan skenario 4 dan skenario 2. Disini dapat diketahui bahwa pilihan skenario terbaik terletak pada skenario 4 dan skenario 2 dimana keduanya saling memiliki *trade-off* satu sama lain antara parameter reduksi sampah dan parameter dampak lingkungan.

Disisi lain, berdasarkan hasil komparasi jumlah masuk TPS 3R pada tabel 6.16 dapat dilihat bahwa skenario 2 memang dapat mereduksi sampah hingga menjadi kurang dari 1.400 ton namun pada bulan ke-12, sampah yang masuk ke TPA Benowo hampir menyentuh 1.400 ton dimana jumlah tersebut memiliki tendensi untuk meningkat di bulan ke-13 dan seterusnya. Berbeda dengan skenario 4 dimana pada bulan ke-12 sampah yang masuk ke TPA Benowo masih berada di angka 1.340 ton. Hal ini menunjukkan bahwa skenario 2 tidak memberikan keberlanjutan reduksi sampah ke TPA Benowo sebanyak skenario 4 sehingga skenario 4 memiliki potensi lebih baik dibandingkan skenario 2. Namun dari sisi dampak lingkungan, skenario 2 memiliki potensi untuk lebih ramah lingkungan dibandingkan skenario 4. Disimpulkan bahwa skenario terbaik yang dapat diterapkan adalah skenario 4 atau skenario 2 dan disusul dengan skenario 3C. Untuk memilih antar skenario 4 atau skenario 2 yang lebih sesuai untuk diterapkan di sistem persampahan kota Surabaya, perlu diperhatikan aspek lain seperti aspek finansial/ekonomi dimana penambahan jumlah TPS dan/atau penambahan kapasitas komposter tentunya melibatkan anggaran dana pemerintah. Maka dari itu, perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui skenario paling ideal yakni dengan menggunakan metode Analitycal Hirearchy Process (AHP).

Dalam menentukan skenario terbaik dengan menggunakan metode AHP, perlu ditentukan skor dari masing-masing skenario berdasarkan kedua parameter yang telah disebutkan sebelumnya yakni parameter reduksi sampah dan parameter dampak lingkungan. Skor tersebut didapatkan berdasarkan hasil *survery* dengan

responden dari pihak DKP Surabaya. Berikut merupakan perbandingan parameter antar skenario.

Tabel 6.20 Perbandingan Parameter Antar Skenario

	Skenario 1	**Skenario 2**	**Skenario 3**	**Skenario 4**
Skenario 1		Skenario 1 tidak lebih baik dalam reduksi sampah namun lebih sedikit menghasilkan emisi	Skenario 1 tidak lebih baik dalam reduksi sampah namun lebih sedikit menghasilkan emisi	Skenario 1 tidak lebih baik dalam reduksi sampah namun lebih sedikit menghasilkan emisi
Skenario 2			Skenario 2 dapat mereduksi sampah lebih banyak dengan menghasilkan emisi GRK lebih sedikit	Skenario 2 tidak mereduksi sampah lebih baik namun menghasilkan emisi GRK lebih sedikit
Skenario 3				Skenario 3 tidak mereduksi sampah maupun menghasilkan emisi GRK lebih baik
Skenario 4				

Selanjutya berdasarkan data pada tabel 6.20 kemudian dilakukan *survey* dengan responden dari pihak DKP Surabaya untuk mendapatkan skor perbandingan antar skenario. Skor yang digunakan menggunakan skala Saaty yakni skala 1 – 9 dengan keterangan sebagai berikut.

Tabel 6.21 Skala Saaty

Intensitas Kepentingan	**Definisi**	**Penjelasan**
1	*Equal Importance*	Kedua elemen memiliki kepentingan yang sama
3	*Moderate Importance*	Elemen yang satu sedikit lebih penting daripada yang lainnya
5	*Strong Importance*	Elemen yang satu lebih penting daripada yang lainnya
7	*Very Strong Importance*	Elemen yang satu jelas lebih penting daripada yang lainnya
9	*Extreme Importance*	Elemen yang satu mutlak lebih penting daripada yang lainnya
2,4,6,8		Nilai di antara dua nilai pertimbangan yang berdekatan

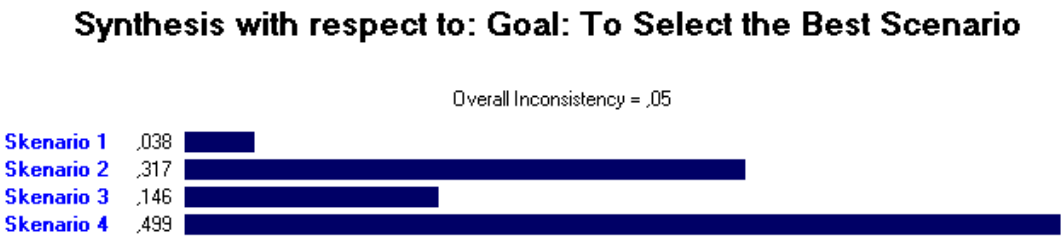
Sumber: (Saaty & Vargas, 2012)

Berikut merupakan hasil skor yang didapatkan untuk perbandingan antar skenario kebijakan.

Tabel 6.22 Skor Perbandingan Skenario

	Skenario 1	**Skenario 2**	**Skenario 3**	**Skenario 4**
Skenario 1		8 (skenario 2 lebih baik)	6 (skenario 2 lebih baik)	9 (skenario 2 lebih baik)
Skenario 2			3 (skenario 2 lebih baik)	2 (skenario 4 lebih baik)
Skenario 3				4 (skenario 4 lebih baik)
Skenario 4				

Selanjutnya, skor pada tabel 6.22 tersebut akan digunakan sebagai *input* dalam *software* ExpertChoice. Berikut merupakan hasil dari AHP pada *software* ExpertChoice.



Gambar 6.8 Hasil AHP Skenario Terbaik

Berdasarkan hasil AHP pada gambar 6.7 tersebut, dapat diketahui bahwa bobot paling besar didapatkan oleh skenario 4 dengan nilai 0,499 disusul skenario 2 dengan nilai sebesar 0,317, skenario 3 dengan nilai 0,146 dan skenario 1 dengan nilai sebesar 0,038. Nilai *inconsistency* yang didapatkan sebesar 0,05 dimana masih kurang dari 0,1 sehingga hasil AHP tersebut dapat dinyatakan konsisten dan dapat dipergunakan untuk mengambil keputusan. Disimpulkan bahwa skenario terbaik yang didapatkan adalah skenario 4 sehingga pihak DKP Surabaya disarankan untuk melakukan penambahan jumlah TPS 3R beserta peningkatan kapasitas komposter.

BAB 7
KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan dari penelitian yang dilakukan beserta saran terhadap *stakeholder* terkait dan terhadap penelitian selanjutnya.

7.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil *running* simulasi yang telah dilakukan untuk kondisi eksisting maupun skenario kebijakan beserta analisis yang dilakukan pada masing-masing simulasi terkait, berikut merupakan kesimpulan yang dapat diambil dalam penelitian ini.

1. Pada kondisi eksisting, TPS 3R menerima sampah sebesar 880 – 940 ton sampah per hari dimana dari 880 – 940 ton sampah tersebut, TPS 3R mengolah sampah sebanyak 290 – 310 ton sampah per harinya untuk diolah dalam tiga jenis proses pengolahan sampah yang berbeda yakni pengomposan, gasifikasi, dan penimbunan sampah plastik. Untuk pengolahan sampah secara gasifikasi dan penimbunan sampah plastik tidak terdapat sisa sampah sehingga pengolahan pada kedua metode ini telah efektif. Namun untuk proses pengomposan, terdapat sisa sampah pengomposan sebanyak 120 – 130 ton sampah per hari dimana sisa sampah ini terjadi karena adanya keterbatasan kapasitas pengomposan. Sisa sampah tersebut kemudian akan dikirimkan ke TPA Benowo untuk diproses lebih lanjut karena TPS 3R tidak dapat menimbun sampah. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan sampah di TPS 3R khususnya untuk pengomposan belum bekerja secara efektif untuk mereduksi jumlah sampah yang diangkut ke TPA Benowo terbukti dengan masih adanya sisa sampah pengomposan yang seharusnya dapat diproses lebih dahulu di TPS 3R terkait. Selain itu, jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo untuk kondisi eksisting masih cukup tinggi yakni sekitar 1.550 – 1.650 ton sampah per hari dimana kapasitas pengolahan sampah harian TPA Hanya 1.400 ton. Hal ini menunjukkan bahwa perlu adanya skenario

kebijakan baru dalam pengelolaan sampah di TPS 3R sehingga dapat mereduksi jumlah sampah yang masuk ke TPA Benowo.

2. Terdapat empat skenario kebijakan yang dirancang yakni (1) skenario peningkatan radius cakupan TPS 3R, (2) skenario penambahan jumlah TPS 3R, (3) skenario peningkatan kapasitas komposter, dan (4) skenario penambahan TPS beserta peningkatan kapasitas komposter. Hasil *running* simulasi untuk masing-masing skenario menunjukkan bahwa skenario pertama tidak dapat mereduksi sampah yang masuk ke TPA Benowo hingga kurang dari kapasitas pengolahan sampah harian di TPA Benowo sehingga skenario pertama disimpulkan tidak dapat memberikan solusi atas permasalahan yang ada. Disisi lain, skenario kedua, ketiga, dan keempat dapat memberikan jumlah reduksi sampah yang masuk ke TPA Benowo secara cukup memuaskan yakni hingga kurang dari kapasitas pengolahan harian TPA Benowo. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, skenario terbaik yang dapat diterapkan adalah skenario kedua yakni penambahan jumlah TPS 3R ataupun skenario keempat yakni penambahan jumlah TPS 3R beserta peningkatan kapasitas pengomposan.
3. Pada kondisi eksisting, sistem di TPS 3R secara keseluruhan dapat menghasilkan emisi GRK total sebanyak 57 – 59 ton satuan emisi GRK per harinya. Selanjutnya pada skenario kebijakan yang dirancang, terjadi peningkatan emisi GRK yang dihasilkan untuk masing-masing skenario kebijakan yakni skenario pertama menghasilkan 66 – 70 ton , skenario kedua menghasilkan 74 – 78 ton, skenario ketiga menghasilkan 92 – 96 ton, dan skenario keempat menghasilkan 86 – 91 ton satuan emisi GRK per hari. Peningkatan emisi GRK pada skenario kebijakan wajar terjadi dikarenakan pada masing-masing skenario dilakukan penambahan fasilitas dan/atau penambahan kapasitas pengolahan sampah sehingga secara otomatis akan meningkatkan jumlah pengolahan sampah yang dilakukan oleh TPS 3R terkait. Hal ini kemudian dapat meningkatkan jumlah emisi GRK yang dihasilkan oleh sistem TPS 3R dimana total emisi GRK ini menjadi salah satu parameter dalam pengambilan keputusan skenario kebijakan mana yang terbaik.

7.2 Saran

Berikut merupakan saran yang diberikan terhadap *stakeholder* terkait dalam penelitian ini.

1. Skenario terbaik yang dihasilkan dari peneltian ini adalah skenario keempat dan skenario kedua dimana pada kedua skenario tersebut dilakukan penambahan jumlah TPS 3R sehingga Pemerintah Kota Surabaya khususnya DKP Surabaya dapat memertimbangkan untuk menambah jumlah TPS 3R pada area yang belum tercakup oleh TPS 3R tersebut terutama untuk daerah Surabaya Barat dan Surabaya Utara.
2. Dalam penerapan skenario kebijakan pada pengelolaan sampah khususnya TPS 3R, Pemerintah Kota Surabaya dapat memertimbangkan dampak lingkungan yang dihasilkan dalam perspektif jangka panjang sesuai dengan *sustainable development goals* (SDG's) sehingga tidak hanya berfokus pada reduksi sampah yang masuk ke TPA Benowo saja.

Selain itu, berikut merupakan saran yang diberikan terhadap pengembangan penelitian selanjutnya.

1. Penelitian ini tidak memerhitungkan dampak biaya yang timbul akibat kebijakan skenario yang dirancang sehingga pengembangan penelitian selanjutnya dapat memerhatikan variabel biaya dan anggaran Pemerintah Kota Surabaya dalam mengelola sampah khususnya TPS 3R.
2. Penelitian ini bertujuan untuk mereduksi sampah namun hanya berfokus pada reduksi sampah di TPS 3R tanpa memerhatikan fluktuasi tingkat konsumsi masyarakat Surabaya sehingga penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model fluktuasi tingkat konsumsi dan skenario yang ditawarkan lebih mengarah ke kebijakan dalam menstabilkan tingkat konsumsi tersebut.
3. Pada pengembangan skenario penyebaran TPS 3R tidak dilakukan analisis sensitivitas mengenai pergeseran lokasi TPS 3R sehingga penelitian selanjutnya dapat memertimbangkan sensitivitas mengenai perubahan lokasi TPS 3R tersebut dengan menggunakan metode yang relevan seperti *set-covering*, *centre of gravity*, dan sebagainya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

Abraham, R. (2017). *Model Simulasi Dinamik Pengelolaan Sampah Padat Pemukiman Berbasis Program 3R di Kota Bogor.* Bogor: Intitut Pertanian Bogor.

Addinsyah, A., & Herumurti, W. (2017). Studi Timbulan dan Reduksi Sampah Rumah Kompos Serta Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca di Surabaya Timur. *Jurnal Teknik ITS, Vol. 6*, D62-D67.

Agustia, Y. P. (2014). *Model Sistem Dinamik pada Pengembangan Pengelolaan Sampah Kecamatan Gubeng, Kota Surabaya.* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

An, B., Cahya, L. M., & Fudhla, A. F. (2013). Analisis Potensi Utilisasi Sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Kota Metropolis: Suatu Pendekatan Model Berbasis Sistem Dinamik (Studi Kasus: TPA Kota Surabaya). *Proceedings 7th National Industrial Engineering Conference*, pp 84-90.

BAPPENAS. (2012). *Rencana Aksi Nasional Penurunan Gas Emisi Rumah Kaca (RAN-GRK).* Jakarta: Badan Perencanaan Pembangunan Nasional.

BPS. (2019). *Statistik Daerah Kota Surabaya 2018.* Surabaya: Badan Pusat Statistik.

BSNI. (2002). *Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan.* Jakarta: Badan Standarisasi Nasional Indonesia.

Chandra, B. (2006). *Pengantar Kesehatan Lingkungan.* Jakarta: EGC.

Daellenbach, H. G., & McNickle, D. C. (2005). *Management Science Decision Making Through System Thinking.* New York: Palgrave Macmillan.

DKP Surabaya. (2019). *Sistem Pengelolaan Sampah Surabaya.* Surabaya: Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Surabaya.

Elagroudy, S., Warith, M., & El Zayat, M. (2016). *Municipal Solid Waste Management and Green Economy.* Berlin: Global Young Academy.

El-Haggar, S. (2007). *Sustainable Industrial Design and Waste Management: Cradle-to-cradle for Sustainable Development.* London: Elsevier.

European Comission. (2018). *Brief on the use of Life Cycle Assessment (LCA) to Evaluate Environmental Impacts of the Bioeconomy.* The European Comission's Knowledge Centre for Bioeconomy.

Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., & Moberg, A. (2000). *Life Cycle Assessment of Energy from Solid Waste.* Stockholm: FMS.

Forrester, J. W., & Senge, P. M. (1980). Test for Building Confidence in System Dynamics Models. *TIMS Studies in the Management Sciences 14*, pp 209-228.

Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management.* World Bank.

IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.* Geneva: Intergovernmental Climate on Climate Change.

ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principal and Framework.* International Organization for Standardization.

Kementrian Pekerjaan Umum. (2010). *Modul Pengolahan Sampah Berbasis 3R.* Bandung: Badan Penelitian dan Pengembangan PUPR.

Kiani, B., Gholamian, M. R., Hamzehei, A., & Hosseini, S. H. (2009). Using Causal Loop Diagram to Achieve a Better Understanding of E-Business Models. *International Journal of Electronic Business Management, Vol. 7*, pp 159-167.

KLH. (2012). *Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional.* Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.

Lin, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2018). Improving the Sustainability of Organic Waste Management Practices in the Food-energy-water Nexus: a Comparative Review of Anaerobic Digestion and Composting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 89*, pp 151-167.

Nuhoglu, H., & Nuhoglu, M. (2007). System Dynamic Approach in Science and Technology Education. *Journal of Turkish Science Education, Vol. 4*, pp 91-108.

Pringgajaya, K. A., & Ciptomulyono, U. (2012). Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) dan Pendekatan Analytical Network Process (ANP)

untuk Pengembangan Produk Hetric Lamp yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Teknik ITS, Vol. 1*, pp A515-A520.

Richardson, G. P., & Pugh, A. L. (1986). *Introduction to System Dynamics Modeling with Dynamo.* Massachusetts: The MIT Press.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, Methods, Concepts, & Applications of the Analytic Hierarchy Process.* New York: Springer.

Sasongko, S. B. (2008). Simulasi Pengelolaan Sampah Kota dengan Powersim. *Jurnal Teknik, Vol. 29, No. 2*, pp 97-103.

SIPSN. (2020). *Peta Persebaran TPS 3R*. Retrieved from Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional: http://sipsn.menlhk.go.id/

Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamic System Thinking and Modeling for a Complex World.* New York: McGraw-Hill.

Sucipto, C. D. (2012). *Teknologi Pengolahan Daur Ulang Sampah.* Jakarta: Goysen Publishing.

Suprapto. (2016). Peran Daur Ulang Untuk Meningkatkan Pengelolaan Sampah Terpadu di Kota Surabaya. *Jurnal Rekayasa Lingkungan, Vol. 9*, pp 127-142.

Surjandari, I., Hidayanto, A., & Supriatna, A. (2009). Model Dinamis Pengelolaan Sampah Untuk Mengurangi Beban Penumpukan. *Jurnal Teknik Industri, Vol. 11, No. 2*, pp 134-147.

Tapia, M., Siebel, M. A., van der Helm, A. W., Baars, E. T., & Gijzen, H. J. (2008). Environmental, Financial, and Quality Assessment of Drinking Water Processes at Waternet. *Journal of Cleaner Production, Vol. 16*, pp 401-409.

Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management.* New York: McGraw-Hill.

UNEP. (2009). *Developing Integrated Solid Waste Management Plan.* Japan: United Nation Environment Programme.

WHO. (2017). *Self Management of Waste from Health-care Activities.* Geneva: World Health Organization.

Windrianto, Y., Rachmawati, D., & Berlianty, I. (2016). Pengukuran Tingkat Eko-Efisiensi Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA) untuk

Menciptakan Produksi Batik yang Efisien dan Ramah Lingkungan (Studi Kasus di UKM Sri Kuncoro Bantul). *Jurnal OPSI, Vol. 9*, pp 143-149.

Yuen, F. T., & Chan, S. L. (2010). System Dynamic Modeling in CRM: Window Fashions Gallery. *International Journal of Engineering Business Management, Vol. 2*, pp 77-84.

LAMPIRAN

Lampiran I – Formulasi Matematis Model Simulasi

Akumulasi_Kompos(t) = Akumulasi_Kompos(t - dt) + (Pengomposan - Pemakaian_Kompos - Penjualan_Kompos) * dt
INIT Akumulasi_Kompos = 0.40
INFLOWS:
Pengomposan = IF(Sampah_Dikomposkan>Kapasitas_Pengomposan)THEN(Kapasitas_Pengomposan*Konversi_Sampah_ke_Kompos)ELSE(Sampah_Dikomposkan*Konversi_Sampah_ke_Kompos)
OUTFLOWS:
Pemakaian_Kompos = Tingkat_Pemakaian_Kompos*Jumlah_TPS_3R
Penjualan_Kompos = Tingkat_Penjualan_Kompos*Jumlah_TPS_3R

Akumulasi_Sampah_diangkut_ke_TPA_dari_TPS_3R(t) = Akumulasi_Sampah_diangkut_ke_TPA_dari_TPS_3R(t - dt) + (Sisa_Sampah_TPS_3R) * dt
INIT Akumulasi_Sampah_diangkut_ke_TPA_dari_TPS_3R = 0
INFLOWS:
Sisa_Sampah_TPS_3R = Sampah_Tidak_Diolah+Sisa_Sampah_Pengomposan

Akumulasi_Sampah_Diolah(t) = Akumulasi_Sampah_Diolah(t - dt) + (Sampah_Diolah - Sortir_Sampah_Proses - Sortir_Sampah_Non_Proses) * dt
INIT Akumulasi_Sampah_Diolah = 292
INFLOWS:
Sampah_Diolah = Timbunan_Sampah_di_TPS_3R*Prosentase_Sampah_Diolah
OUTFLOWS:
Sortir_Sampah_Proses = Akumulasi_Sampah_Diolah*Prosentase_Sampah_Diproses
Sortir_Sampah_Non_Proses = Akumulasi_Sampah_Diolah*(1-Prosentase_Sampah_Diproses)

Akumulasi_Sampah_Kering(t) = Akumulasi_Sampah_Kering(t - dt) + (Pengeringan_Sampah - Sampah_Dibakar) * dt
INIT Akumulasi_Sampah_Kering = 69
INFLOWS:
Pengeringan_Sampah = Sampah_Gasifikasi*Konversi_Sampah_Pengeringan
OUTFLOWS:
Sampah_Dibakar = Akumulasi_Sampah_Kering

Jumlah_Sampah_Surabaya(t) = Jumlah_Sampah_Surabaya(t - dt) + (Pembentukan_Sampah - Sampah_Rumah_Tangga - Sampah_Non_Rumah_Tangga) * dt
INIT Jumlah_Sampah_Surabaya = 1800
INFLOWS:
Pembentukan_Sampah = Populasi_Surabaya*Produksi_Sampah_per_Kepala
OUTFLOWS:
Sampah_Rumah_Tangga = Prosentase_Sampah_RT*Jumlah_Sampah_Surabaya
Sampah_Non_Rumah_Tangga = Jumlah_Sampah_Surabaya*(1-Prosentase_Sampah_RT)

Populasi_Surabaya(t) = Populasi_Surabaya(t - dt) + (Kelahiran - Kematian) * dt
INIT Populasi_Surabaya = 2904751
INFLOWS:
Kelahiran = Populasi_Surabaya*(Tingkat_Pertumbuhan_Penduduk*Konverter_Persen)
OUTFLOWS:
Kematian = Populasi_Surabaya*(Tingkat_Kematian_Pendududk*Konverter_Persen)

Sampah_Plastik_Disimpan(t) = Sampah_Plastik_Disimpan(t - dt) + (Pengepresan - Sampah_Plastik_Dijual) * dt
INIT Sampah_Plastik_Disimpan = 0.45
INFLOWS:
Pengepresan = Konversi_Sampah_Pengepresan*Sortir_Sampah_Non_Proses
OUTFLOWS:
Sampah_Plastik_Dijual = Tingkat_Penjualan_Sampah_Plastik*Jumlah_TPS_3R

Timbunan_Sampah_di_TPS_3R(t) = Timbunan_Sampah_di_TPS_3R(t - dt) + (Sampah_Masuk_ke_TPS_3R - Penyusutan_Sampah - Sampah_Diolah - Sampah_Tidak_Diolah) * dt
INIT Timbunan_Sampah_di_TPS_3R = 884
INFLOWS:
Sampah_Masuk_ke_TPS_3R = Sampah_Area_TPS_3R
OUTFLOWS:
Penyusutan_Sampah = Tingkat_Penyusutan_Sampah
Sampah_Diolah = Timbunan_Sampah_di_TPS_3R*Prosentase_Sampah_Diolah
Sampah_Tidak_Diolah = Timbunan_Sampah_di_TPS_3R*(1-Prosentase_Sampah_Diolah)

Total_Sampah_Rumah_Tangga(t) = Total_Sampah_Rumah_Tangga(t - dt) + (Sampah_Rumah_Tangga - Sampah_Area_TPS_3R - Sampah_Area_Non_TPS_3R) * dt
INIT Total_Sampah_Rumah_Tangga = 1474
INFLOWS:
Sampah_Rumah_Tangga = Prosentase_Sampah_RT*Jumlah_Sampah_Surabaya
OUTFLOWS:
Sampah_Area_TPS_3R = Total_Sampah_Rumah_Tangga*Prosentase_Cakupan_TPS_3R
Sampah_Area_Non_TPS_3R = Total_Sampah_Rumah_Tangga*(1-Prosentase_Cakupan_TPS_3R)

Total_Sampah_TPA(t) = Total_Sampah_TPA(t - dt) + (Sampah_Masuk_TPA) * dt
INIT Total_Sampah_TPA = 1438
INFLOWS:
Sampah_Masuk_TPA = Sisa_Sampah_TPS_3R+Sampah_Non_Rumah_Tangga+Sampah_Area_Non_TPS_3R

Dampak_Lingkungan_Gasifikasi = (Gasifikasi*LCA_Gasifikasi)+(LCA_Gasifikasi*Gas_CH4_Pengomposan)

Dampak_Lingkungan_Pengangkutan_Sampah = Jumlah_Trip_Pengangkutan*LCA_Pengangkutan_Sampah

- Dampak_Lingkungan_Pengomposan = Pengomposan*LCA_Pengomposan
- Dampak_Lingkungan_Penimbunan_Sampah_Plastik = Pengepresan*LCA_Penimbunan_Sampah_Plastik
- Emisi_GRK_Total = Dampak_Lingkungan_Gasifikasi+Dampak_Lingkungan_Pengangkutan_Sampah+Dampak_Lingkungan_Pengomposan+Dampak_Lingkungan_Penimbunan_Sampah_Plastik
- Gasifikasi = Sampah_Dibakar*Konversi_Sampah_ke_Listrik
- Gas_CH4_Pengomposan = Pengomposan*Konversi_Kompos_ke_Gas_CH4
- Jumlah_Kendaraan_Pengangkut = Jumlah_Kendaraan_per_TPS_3R*Jumlah_TPS_3R
- Jumlah_Kendaraan_per_TPS_3R = 3
- Jumlah_Pengangkutan_Sampah_ke_TPS_3R = INT(Sampah_Masuk_ke_TPS_3R/(Jumlah_Kendaraan_Pengangkut*Kapasitas_Kendaraan))
- Jumlah_TPS_3R = 28
- Jumlah_Trip_Pengangkutan = Jumlah_Pengangkutan_Sampah_ke_TPS_3R*Kebutuan_Trip
- Kapasitas_Kendaraan = 0.1
- Kapasitas_Komposter_per_TPS = 2
- Kapasitas_Pengomposan = Jumlah_TPS_3R*Kapasitas_Komposter_per_TPS
- Kebutuan_Trip = 2
- Konversi_Kompos_ke_Gas_CH4 = 1.824
- Konversi_Sampah_ke_Kompos = 0.3386
- Konversi_Sampah_ke_Listrik = 1.6
- Konversi_Sampah_Pengepresan = 0.96
- Konversi_Sampah_Pengeringan = 0.83
- Konverter_Persen = 1/100
- LCA_Gasifikasi = 0.210
- LCA_Pengangkutan_Sampah = 0.0907
- LCA_Pengomposan = 0.356
- LCA_Penimbunan_Sampah_Plastik = 0.00237
- Listrik = Gasifikasi
- Produksi_Sampah_per_Kepala = 0.00062
- Prosentase_Cakupan_TPS_3R = 0.6
- Prosentase_Sampah_Dikomposkan = 0.63
- Prosentase_Sampah_Diolah = 0.3311
- Prosentase_Sampah_Diproses = 0.763
- Prosentase_Sampah_Gasifikasi = 1-Prosentase_Sampah_Dikomposkan
- Prosentase_Sampah_RT = 0.82
- Sampah_Dikomposkan = Prosentase_Sampah_Dikomposkan*Sortir_Sampah_Proses
- Sampah_Gasifikasi = Prosentase_Sampah_Gasifikasi*Sortir_Sampah_Proses
- Sisa_Sampah_Pengomposan = IF(Sampah_Dikomposkan>Kapasitas_Pengomposan)THEN(Sampah_Dikomposkan-Kapasitas_Pengomposan)ELSE(0)
- Tingkat_Penyusutan_Sampah = 0.035
- Tingkat_Kematian_Pendududk = GRAPH(TIME)
  (0.00, 0.057), (30.4, 0.043), (60.8, 0.032), (91.3, 0.051), (122, 0.062), (152, 0.07), (183, 0.054), (213, 0.056), (243, 0.061), (274, 0.022), (304, 0.032), (335, 0.041), (365, 0.049)
- Tingkat_Pemakaian_Kompos = GRAPH(TIME)
  (0.00, 0.15), (1.00, 0.18), (2.00, 0.2), (3.00, 0.13), (4.00, 0.09), (5.00, 0.1), (6.00, 0.15), (7.00, 0.21), (8.00, 0.15), (9.00, 0.15), (10.0, 0.15), (11.0, 0.18), (12.0, 0.16), (13.0, 0.16), (14.0, 0.17), (15.0, 0.18), (16.0, 0.2), (17.0, 0.19), (18.0, 0.13), (19.0, 0.16), (20.0, 0.09), (21.0, 0.1)
- Tingkat_Penjualan_Kompos = GRAPH(TIME)
  (0.00, 0.1), (1.00, 0.06), (2.00, 0.07), (3.00, 0.02), (4.00, 0.12), (5.00, 0.11), (6.00, 0.11), (7.00, 0.09), (8.00, 0.04), (9.00, 0.03), (10.0, 0.00), (11.0, 0.02), (12.0, 0.02), (13.0, 0.00), (14.0, 0.22), (15.0, 0.04), (16.0, 0.05), (17.0, 0.11), (18.0, 0.04), (19.0, 0.1), (20.0, 0.05), (21.0, 0.05)
- Tingkat_Penjualan_Sampah_Plastik = GRAPH(TIME)
  (0.00, 0.32), (1.00, 0.41), (2.00, 0.25), (3.00, 0.41), (4.00, 0.44), (5.00, 0.4), (6.00, 0.34), (7.00, 0.51), (8.00, 0.32), (9.00, 0.44), (10.0, 0.39), (11.0, 0.41), (12.0, 0.28), (13.0, 0.41), (14.0, 0.39), (15.0, 0.39), (16.0, 0.31), (17.0, 0.34), (18.0, 0.44), (19.0, 0.44)
- Tingkat_Pertumbuhan_Penduduk = GRAPH(TIME)
  (0.00, 0.092), (30.4, 0.087), (60.8, 0.057), (91.3, 0.074), (122, 0.088), (152, 0.032), (183, 0.083), (213, 0.014), (243, 0.045), (274, 0.056), (304, 0.075), (335, 0.083), (365, 0.081)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS

Penulis memiliki nama lengkap Rochmat Agung Febrilianto, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis lahir di Surabaya, tanggal 10 Februari 1998. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Kedurus V Surabaya, SMPN 16 Surabaya, SMAN 6 Surabaya, hingga menempuh pendidikan tinggi di Teknik Sistem dan Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam organisasi sosial "Sekitar Kita Community" berbasis di Surabaya. Penulis pernah melakukan kerja praktik di ECCO Shoes Indonesia, Sidoarjo. Penulis sangat tertarik dengan bidang keilmuan optimasi dan simulasi serta menyukai kegiatan yang melibatkan diskusi. Untuk informasi lebih lanjut, penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* r.agoeng.f@gmail.com.