

**ANALISIS POTENSI DAMPAK LINGKUNGAN DARI PRODUK
KEMASAN BERBAHAN *POLYSTYRENE FOAM* DENGAN
PENDEKATAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT***

SKRIPSI

TEKNIK INDUSTRI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**MEYLANYA CHRISTIANY GUNTUR NOYA
NIM. 145060700111055**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Potensi Dampak Lingkungan dari Produk Berbahan *Polystyrene Foam* dengan Pendekatan *Life Cycle Assessment***” dengan baik.

Skripsi ini disusun sebagai bagian dari proses memperoleh gelar Sarjana Strata Satu (S-1) pada Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Setelah melewati berbagai tahap, skripsi ini dapat diselesaikan berkat bantuan, semangat, motivasi, dan dorongan dari berbagai pihak. Penulis sepatutnya menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi.
2. Bapak Oyong Novareza, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Industri Universitas Brawijaya.
3. Ibu Rahmi Yuniarti, ST., MT. sebagai Sekretaris Jurusan atas kesediaannya dalam membimbing tahapan pembuatan skripsi ini.
4. Bapak Marudut Sirait, ST., MT. sebagai Dosen Pembimbing atas kesediaannya dalam meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan masukan dan saran, serta arahan yang sangat berharga bagi penulis selama masa pengerjaan skripsi.
5. Bapak Rio Prasetyo, S.T., MT. sebagai Dosen Pembimbing Akademik atas masukan, bimbingan, serta arahan selama masa studi penulis di Jurusan Teknik Industri.
6. Bapak Ir. Purnomo Budi Santoso, M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing KKN-P.
7. Bapak Arif Rahman, ST., MT. dan Bapak Wisnu Wijayanto, ST., M.Eng. selaku dosen pengamat Seminar Proposal Skripsi atas masukan dan saran yang diberikan.
8. Bapak Ir. Mochamad Choiri, MT. dan Ibu Ceria Farela Mada Tantrika, ST., MT. selaku dosen pengamat Seminar Hasil Skripsi atas masukan dan saran yang diberikan.
9. Bapak dan Ibu dosen, serta karyawan Jurusan Teknik Industri yang telah membagi ilmu akademik maupun non-akademik dan berbagai pengalaman hidup selama dalam dunia perkuliahan.
10. Asisten Laboratorium Simulasi dan Aplikasi Industri periode tahun 2017 atas pelajaran, dukungan, dan kebersamaan selama menjabat sebagai asisten.
11. PMK Yehezkiel yang selalu memberikan dukungan secara emosional dan spiritual.

12. Seluruh mahasiswa angkatan 2014 Jurusan Teknik Industri Universitas Brawijaya atas semangat dan kerja sama selama ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna karena keterbatasan ilmu dari penulis dan kendala-kendala yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di waktu yang akan datang. Harapannya tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk penelitian dan pengembangan yang lebih lanjut.

Malang, Juli 2018



Penulis

DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
RINGKASAN	xv
SUMMARY	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	5
1.3 Rumusan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
1.6 Batasan Masalah.....	6
1.7 Asumsi Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 <i>Polystyrene Foam</i>	8
2.2.1 Struktur dan Ikatan Kimia.....	8
2.2.2 Penggunaan <i>Polystyrene Foam</i>	9
2.3 <i>Life Cycle Assessment</i>	10
2.3.1 Varian <i>Life Cycle Assessment</i>	10
2.3.2 Fase Utama <i>Life Cycle Assessment</i>	11
2.3.2.1 Fase Pendefinisian Tujuan dan Ruang Lingkup.....	11
2.3.2.2 Fase Analisis Inventori.....	12
2.3.2.3 Fase Penilaian Dampak.....	13
2.3.2.4 Fase Interpretasi.....	14
2.4 SimaPro 8.2.....	14
2.5 <i>Cleaner Production</i>	14
2.6 <i>Waste Management</i>	16
BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Jenis Penelitian.....	21



3.2	Tempat dan Waktu Penelitian.....	21
3.3	Langkah-langkah Penelitian	21
3.3.1	Tahap Pendahuluan.....	21
3.3.2	Tahap Pengumpulan Data.....	22
3.3.3	Tahap Pengolahan Data (Pelaksanaan LCA)	22
3.3.4	Tahap Analisis dan Kesimpulan	23
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		25
4.1	Produk Kemasan Berbahan PS <i>Foam</i>	25
4.1.1	Proses Produksi.....	26
4.1.2	Proses Distribusi	28
4.1.3	Siklus Akhir Hidup	29
4.2	Tujuan dan Ruang Lingkup LCA	29
4.3	<i>Life Cycle Inventory</i>	30
4.3.1	Proses Ekstraksi Butiran Plastik.....	30
4.3.2	Transportasi Resin <i>Polystyrene</i>	31
4.3.3	Proses Produksi	32
4.3.4	Distribusi Produk.....	35
4.3.5	<i>Disposal</i> dan <i>End-life Treatment</i>	36
4.3.6	Gabungan Proses	38
4.4	<i>Life Cycle Impact Assessment</i>	39
4.4.1	<i>Network</i>	41
4.4.2	Penilaian Dampak	42
4.4.3	Perbandingan Nilai Dampak	56
4.4.3.1	Perbandingan Nilai Dampak Proses.....	56
4.4.3.2	Perbandingan Nilai Dampak Skenario <i>Disposal</i>	58
4.4.3.3	Perbandingan Nilai Dampak Siklus Hidup	60
4.5	<i>Life Cycle Interpretation</i>	60
4.5.1	Identifikasi dan Analisis Dampak Signifikan	61
4.5.2	Rekomendasi Perbaikan.....	64
4.5.2.1	Rekomendasi Perbaikan Proses.....	64
4.5.2.2	Rekomendasi Penanganan Limbah	65
BAB V PENUTUP.....		69
5.1	Kesimpulan.....	69



5.2 Saran..... 70

DAFTAR PUSTAKA 71

LAMPIRAN 73





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat ini	7
Tabel 4.1	Fasilitas Pendukung Proses Produksi	28
Tabel 4.2	Data Proses <i>Extrusion</i>	33
Tabel 4.3	Data Proses <i>Forming</i>	33
Tabel 4.4	Data Proses <i>Cutting</i>	34
Tabel 4.5	Kategori Dampak Metode ReCiPe <i>Midpoint</i>	40
Tabel 4.6	Potensi Kategori Dampak Terbesar	61
Tabel 4.7	Penataan Nilai Dampak	61
Tabel 4.8	Persen Kontribusi Tiap Proses.....	62
Tabel 4.9	Peringkat Kontribusi Tiap Proses	62
Tabel 4.10	Persen Kontribusi Skenario <i>Disposal</i>	62





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Grafik perkembangan urbanisasi di Indonesia.....	1
Gambar 1.2	Grafik penambahan volume timbulan sampah plastik	2
Gambar 1.3	Produksi resin plastik.....	3
Gambar 1.4	Proses produksi PS <i>foam</i>	4
Gambar 2.1	Polistirena	8
Gambar 2.2	Varian LCA.....	10
Gambar 2.3	Tahap-tahap dalam LCA.....	12
Gambar 2.4	Elemen fase LCIA.....	13
Gambar 2.5	Bagan alir <i>waste</i>	16
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	24
Gambar 4.1	Produk boks makanan.....	25
Gambar 4.2	Produk boks pendingin	25
Gambar 4.3	Skema siklus hidup produk PS <i>foam</i>	26
Gambar 4.4	Gambaran mesin <i>extruder</i> plastik.....	27
Gambar 4.5	Skema lini mesin produksi.....	28
Gambar 4.6	Ekstraksi resin <i>polystyrene</i>	31
Gambar 4.7	Transportasi bahan baku	32
Gambar 4.8	Proses <i>extrusion</i>	33
Gambar 4.9	Proses <i>forming</i>	34
Gambar 4.10	Proses <i>cutting</i>	35
Gambar 4.11	Proses <i>packaging</i>	35
Gambar 4.12	Distribusi produk	36
Gambar 4.13	<i>Landfill</i>	37
Gambar 4.14	<i>Incineration</i>	38
Gambar 4.15	<i>Recycle</i>	38
Gambar 4.16	Gabungan proses	39
Gambar 4.17	Kalkulasi LCIA.....	41
Gambar 4.18	<i>Network</i>	42
Gambar 4.19	Karakterisasi nilai dampak proses ekstraksi	43
Gambar 4.20	Normalisasi nilai dampak proses ekstraksi	43
Gambar 4.21	Skor tunggal proses ekstraksi.....	44
Gambar 4.22	Karakterisasi nilai dampak transportasi bahan baku.....	44



Gambar 4.23	Normalisasi nilai dampak transportasi bahan baku	44
Gambar 4.24	Skor tunggal transportasi bahan baku.....	45
Gambar 4.25	Karakterisasi nilai dampak proses ekstrusi.....	46
Gambar 4.26	Normalisasi nilai dampak proses ekstrusi	46
Gambar 4.27	Skor tunggal proses ekstrusi	46
Gambar 4.28	Karakterisasi nilai dampak proses <i>forming</i>	47
Gambar 4.29	Normalisasi nilai dampak proses <i>forming</i>	47
Gambar 4.30	Skor tunggal proses <i>forming</i>	48
Gambar 4.31	Karakterisasi nilai dampak proses <i>cutting</i>	48
Gambar 4.32	Normalisasi nilai dampak proses <i>cutting</i>	49
Gambar 4.33	Skor tunggal proses <i>cutting</i>	49
Gambar 4.34	Karakterisasi nilai dampak proses <i>packaging</i>	50
Gambar 4.35	Normalisasi nilai dampak proses <i>packaging</i>	50
Gambar 4.36	Skor tunggal proses <i>packaging</i>	50
Gambar 4.37	Karakterisasi nilai dampak distribusi produk	51
Gambar 4.38	Normalisasi nilai dampak distribusi produk.....	51
Gambar 4.39	Skor tunggal distribusi produk	52
Gambar 4.40	Karakterisasi nilai dampak <i>incineration</i>	52
Gambar 4.41	Normalisasi nilai dampak <i>incineration</i>	53
Gambar 4.42	Skor tunggal <i>incineration</i>	53
Gambar 4.43	Karakterisasi nilai dampak <i>recycle</i>	54
Gambar 4.44	Normalisasi nilai dampak <i>recycle</i>	54
Gambar 4.45	Skor tunggal <i>recycle</i>	54
Gambar 4.46	Karakterisasi nilai dampak <i>landfill</i>	55
Gambar 4.47	Normalisasi nilai dampak <i>landfill</i>	55
Gambar 4.48	Skor tunggal <i>landfill</i>	56
Gambar 4.49	Perbandingan nilai karakterisasi proses.....	56
Gambar 4.50	Perbandingan nilai normalisasi proses	57
Gambar 4.51	Perbandingan skor tunggal proses	58
Gambar 4.52	Perbandingan nilai karakterisasi skenario <i>disposal</i>	58
Gambar 4.53	Perbandingan nilai normalisasi skenario <i>disposal</i>	59
Gambar 4.54	Perbandingan skor tunggal skenario <i>disposal</i>	59
Gambar 4.55	Perbandingan skor tunggal tahap siklus hidup	60
Gambar 4.56	Pembakaran bahan bakar fosil.....	63



Gambar 4.57 Perbandingan skor tunggal skenario daur ulang 65
Gambar 4.58 Insinerator 66
Gambar 4.59 *Compactor*..... 67





Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	<i>Network</i>	73
Lampiran 2	Hasil Pembobotan (<i>Weighting</i>) Nilai Dampak	78
Lampiran 3	Hasil Penilaian Dampak.....	82





Halaman ini sengaja dikosongkan

RINGKASAN

Meylanya Christiany Guntur Noya, Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Analisis Potensi Dampak Lingkungan dari Produk Kemasan Berbahan Polystyrene Foam dengan Pendekatan Life Cycle Assessment*, Dosen Pembimbing: Marudut Sirait, S.T., M.T.

Polystyrene merupakan plastik golongan 6 dalam klasifikasi plastik yang diproduksi dalam jumlah 122,8 ribu ton per tahunnya (PT. Citra Cendekia Indonesia, 2016). Sifat material *polystyrene* yang sulit terurai secara alamiah membuat penanganan limbah *polystyrene* yang sebatas pembuangan saja akan membebani alam dalam penguraiannya. Selain sulit terurai, *polystyrene* juga berdampak negatif terhadap lingkungan karena proses pembuatannya hingga kini masih menggunakan *chloro fluoro carbon* (CFC) yang menjadi penyebab pemanasan global. Selain berbahaya bagi lingkungan, *polystyrene* juga berbahaya bagi kesehatan karena memiliki komponen benzena yang merupakan salah satu penyebab kanker. *Polystyrene* juga bersifat mikroplastik yang dapat dimakan oleh ikan dan kemudian dikonsumsi manusia. Dengan berbagai dampak dan bahaya yang dimiliki oleh produk berbahan PS *foam* ini, produk ini masih sangat digemari oleh berbagai kalangan sehingga masih terdapat banyak produsen dari produk tersebut. Selain itu, proses produksi dan distribusi produk ini menghasilkan berbagai jenis limbah, antara lain limbah sisa material PS *foam*, emisi gas seperti karbon dioksida dan karbon monoksida. *International Energy Agency* (IEA) pada tahun 2009 memprediksi bahwa jika tidak ada perubahan pada tren penggunaan transportasi, gas rumah kaca yang akan dihasilkan pada tahun 2050 akan naik sebesar 113% dari tahun 2007. Untuk merespons permasalahan akibat produk kemasan PS *foam* tersebut, maka perlu dilakukan kajian untuk mengidentifikasi dampak lingkungan dan bagaimana solusi untuk menangani dampak tersebut.

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengukur dampak lingkungan dari suatu produk mencakup siklus hidup produk mulai dari awal siklusnya hingga akhir siklus atau *disposal* dengan bantuan perangkat lunak SimaPro 8.2 dengan mengacu pada metode ReCiPe *Endpoint (Hierarchist)*. Data yang digunakan berasal dari salah satu perusahaan *polystyrene foam* yang terletak di Pasuruan, Jawa Timur. Langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan tujuan dan ruang lingkup dari LCA. Setelah itu, data-data terkait *supplier*, proses produksi, proses distribusi, dan penanganan limbah dikumpulkan untuk dinilai kontribusinya terhadap indikator dampak lingkungan tertentu. Nilai dampak hasil kalkulasi melalui proses karakterisasi, normalisasi, dan pembobotan untuk kemudian dianalisis. Hasil analisis digunakan sebagai acuan pada pemberian rekomendasi perbaikan terhadap proses produksi maupun penanganan limbah dengan mengacu pada konsep *Cleaner Production* dan *Waste Management*.

Penelitian ini menunjukkan bahwa tahap produksi memberikan dampak terbesar dengan nilai 647 pt, kemudian diikuti oleh tahap ekstraksi (165,88 pt) dan *disposal* (48,13 pt) dari siklus hidup produk kemasan *polystyrene foam*. Potensi dampak lingkungan terbesar terdapat pada kategori dampak *particulate matter formation*, *fossil depletion*, dan *climate change (human health)*. Rekomendasi yang diberikan terkait proses produksi adalah dengan menggunakan mesin yang memiliki daya lebih kecil dan/atau kapasitas lebih besar, sementara untuk tahap *disposal*, rekomendasi yang diberikan adalah pembakaran sampah dengan insinerator khusus, menerapkan *open-loop recycling*, mengadakan sarana pengumpulan sampah, serta menerapkan prinsip 3R.

Kata Kunci: *Life Cycle Assessment, Cleaner Production, Waste Management, Analisis Cradle-to-Grave, Polystyrene Foam*



Halaman ini sengaja dikosongkan

SUMMARY

Meylanya Christiany Guntur Noya, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, June 2018, *Analysis of Potential Environmental Impact of Polystyrene Foam Based Packaging Products Using Life Cycle Assessment*, Academic Supervisor: Marudut Sirait, S.T., M.T.

Polystyrene is a grade 6 plastic in plastic classification produced in the amount of 122.8 thousand tons per year. The non-biodegradable nature of polystyrene makes its disposal a problem to the environment. In addition to that, polystyrene also has a negative impact on the environment because the manufacturing process is still using chloro fluoro carbon (CFC), which is the main cause of global warming. Moreover, polystyrene is also harmful to human health due to its benzene component which is a potential cause of cancer. Polystyrene is also microplastic which means it can break down and be eaten by fish, then consumed by humans. With the various impacts and dangers of this product, it is still very popular in the industry that it is manufactured in large scale. Additionally, the production and distribution process of this product creates various types of waste, such as waste of *polystyrene* foam material, gas emissions such as carbon dioxide and carbon monoxide. The International Energy Agency (IEA) in 2009 predicts that if there is no change in trends in transportation usage, greenhouse gases to be generated by 2050 will increase by 113% from 2007. To respond to these problems, a study was conducted to identify the potential environmental impacts and give recommendations based on the analysis.

In this research, Life Cycle Assessment (LCA) approach is used to measure environmental impact of the product. The LCA involves the product life cycle from the beginning of the cycle to the end of the cycle or its disposal phase with the help of SimaPro 8.2 using the ReCiPe Endpoint (Hierarchist) method. The data used in this research are collected from a polystyrene foam company located in Pasuruan, East Java. The first step is to define the goals and scope of the LCA. Subsequently, data related to suppliers, production processes, distribution processes, and waste management are collected to assess their contributions to certain environmental impact indicators. The value of the impact calculation resulted through the process of characterization, normalization, and weighting are later used for analysis. The results of the analysis are used as a reference on the provision of recommendations on improvements to the production process and waste management in accordance to the Cleaner Production and Waste Management concept.

This study shows that the production stage has the greatest impact with a value of 647 pt, followed by the extraction stage (165.88 pt) and disposal (48.13 pt) of the life cycle of polystyrene foam packaging product. The greatest potential environmental impacts are in the impact category of particulate matter formation, fossil depletion, and climate change (human health). The recommendations to the production process are to use a machine that has less power and/or greater capacity, while for the disposal stage, it is recommended to use special incinerators, conduct open-loop recycling, provide garbage collection facilities, and apply 3R principle.

Keywords: Life Cycle Assessment, Cleaner Production, Waste Management, Cradle-to-Grave Analysis, Polystyrene Foam



Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS POTENSI DAMPAK LINGKUNGAN DARI PRODUK
KEMASAN BERBAHAN *POLYSTYRENE FOAM* DENGAN
PENDEKATAN *LIFE CYCLE ASSESSMENT***

SKRIPSI

TEKNIK INDUSTRI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MEYLANYA CHRISTIANY GUNTUR NOYA

NIM. 145060700111055

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing pada
tanggal 18 Juli 2018

Dosen Pembimbing

Marudut Sirait, ST., MT.
NIP. 19730316 200604 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Industri



Oyong Novareza, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19741115 200604 1 002



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 18 Juli 2018

Mahasiswa



Meylanya Christiany Guntur Noya
NIM. 145060700111055

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

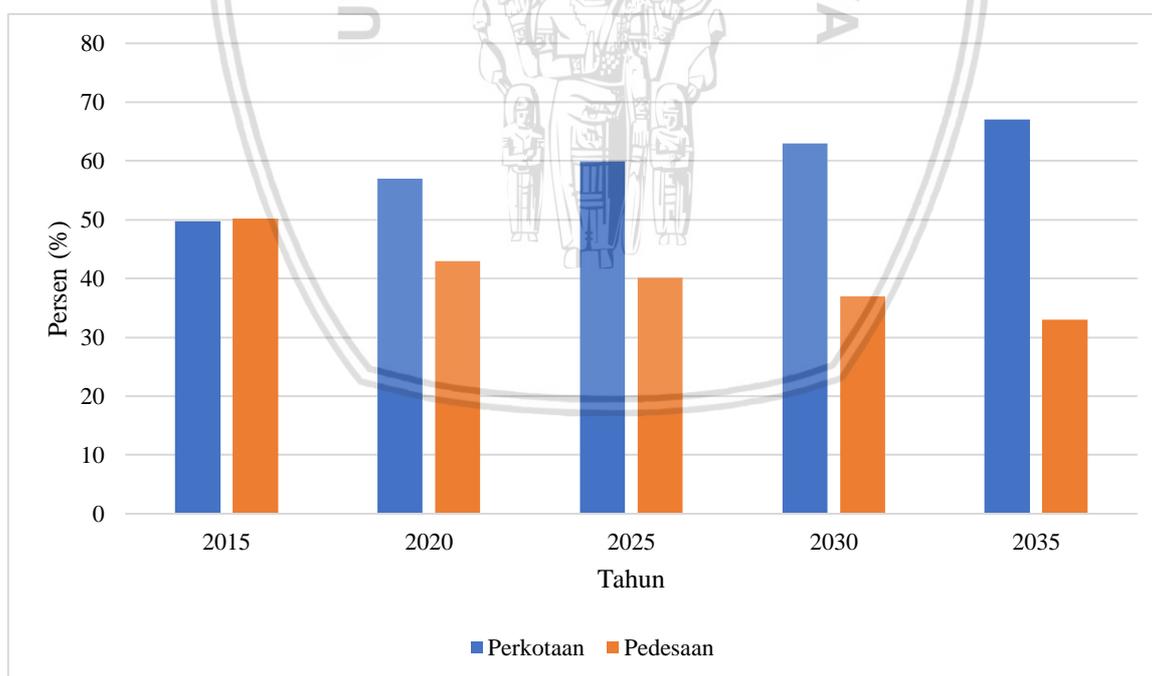


BAB I PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini akan dijelaskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan ruang lingkup penelitian.

1.1 Latar Belakang

Pada zaman modern ini, banyak orang berpindah dari desa ke kota dengan berbagai tujuan, baik untuk mencari nafkah maupun mengejar impian. Pada tahun 2015 saja, jumlah penduduk yang tinggal di desa sebesar 50,2 persen sementara sisanya sudah tinggal di kota. Padahal pada tahun 1980-an, sekitar 78 persen jumlah penduduk Indonesia tinggal di pedesaan. Apabila tren urbanisasi ini dibiarkan, maka menurut data pada Gambar 1.1 dari Badan Pusat Statistik, pada tahun 2025 diperkirakan sekitar 60% persen penduduk Indonesia akan tinggal di kota.

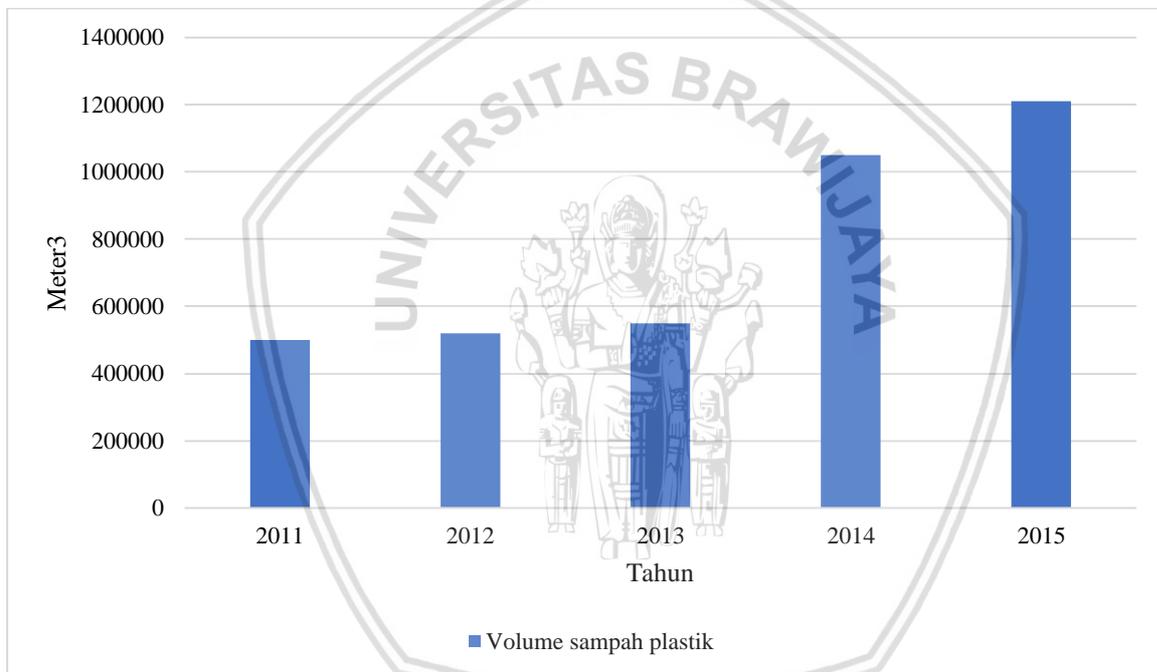


Gambar 1.1 Grafik perkembangan urbanisasi di Indonesia

Sumber: BPS, Proyeksi Penduduk Indonesia 2010-2035 (2013)

Semakin tinggi populasi suatu wilayah, maka jumlah kebutuhan barang pun akan semakin meningkat. Hal ini secara otomatis berarti bahwa sampah dan limbah pun akan meningkat jumlahnya. Menurut penjelasan Sekretariat Adipura Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2017), terhitung jumlah timbunan sampah nasional per harinya

mencapai 175 ribu ton di mana jumlah tersebut didominasi oleh sampah organik (60%), sampah plastik (15%), sampah kertas (10%), dan lainnya (logam, kaca, kain, kulit) sekitar 25%. Data tersebut menunjukkan bahwa sampah plastik mendominasi di antara sampah non-organik lainnya. Permasalahan sampah di Indonesia pun menjadi semakin kompleks dan meluas terutama terkait isu pencemaran sampah di laut. Hasil penelitian Jenna R. Jambeck pada tahun 2015 yang berjudul “*Plastic waste inputs from land into the ocean*” (www.sciencemag.org, 2015) menyatakan bahwa sampah plastik di lautan Indonesia berpotensi mencapai 187,2 juta ton/tahun. Hasil penelitian ini juga menyatakan bahwa setelah Cina, Indonesia merupakan penyumbang sampah plastik terbesar di dunia. Terlepas dari hasil penelitian tersebut, Gambar 1.2 berikut ini menunjukkan indikasi pertambahan volume timbunan sampah plastik di kota-kota besar di Indonesia.

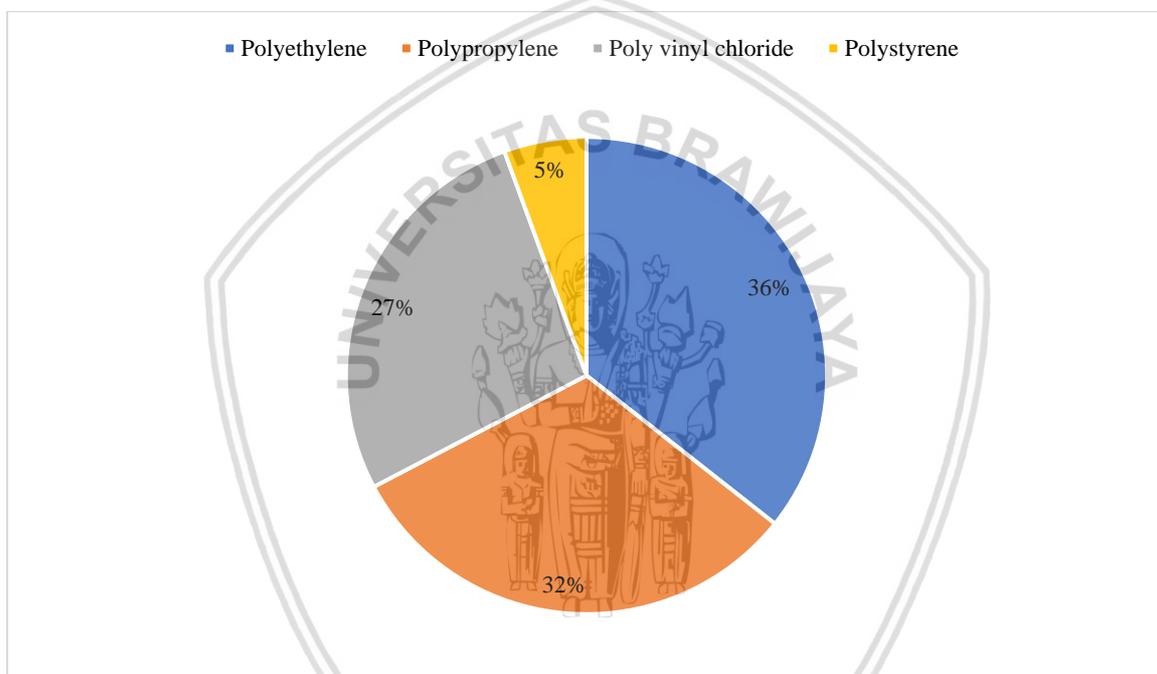


Gambar 1.2 Grafik pertambahan volume timbunan sampah plastik
Sumber: Sekretariat Adipura, KLHK (2017)

Salah satu jenis sampah plastik yang sering ditemui adalah *styrofoam* atau biasanya dikenal sebagai gabus atau dengan nama ilmiahnya disebut *polystyrene foam* (PS foam). Meskipun umumnya disebut *styrofoam*, *styrofoam* sendiri merupakan merek dagang dari *Dow Chemical Company* dan mengacu secara khusus pada jenis EPF keras berwarna biru yang digunakan dalam produksi perahu. PS foam yang berasal dari kopolimer stirena ini umumnya berwarna putih bersih, kaku dan sangat ringan serta tersedia dalam berbagai tingkat kepadatan. Selain itu, PS foam juga mampu mempertahankan panas dan dingin sehingga kerap digunakan sebagai insulator. Bahan ini juga sering dijadikan sebagai pembungkus makanan dan minuman karena tidak mudah bocor dan gampang dibawa.

Dengan segala kelebihan tersebut, *PS foam* ternyata memiliki biaya yang murah sehingga sangat digemari oleh para pedagang. *PS foam* banyak digunakan oleh masyarakat untuk berbagai keperluan seperti kemasan, bahan kerajinan, dekorasi, bahan bangunan, dan sebagainya.

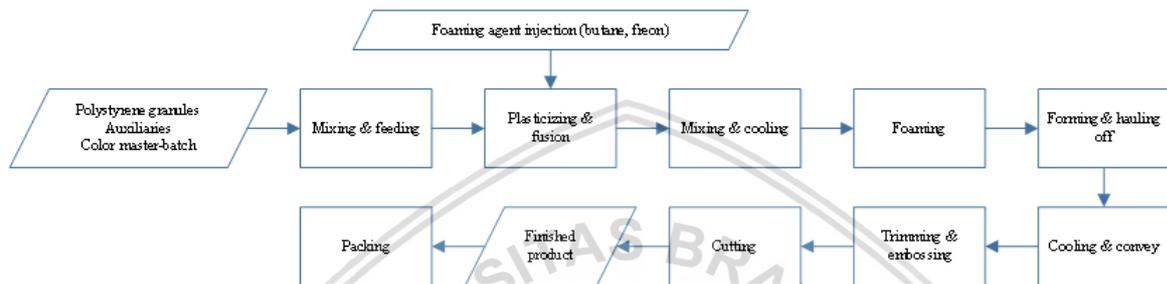
Polystyrene sendiri merupakan plastik golongan 6 dalam klasifikasi plastik sehingga sama berbahayanya dengan plastik. Di Indonesia sendiri, industri resin plastik dalam beberapa tahun terakhir dapat memproduksi hingga 2,2 juta ton plastik per tahun yang terdiri dari 790.000 ton plastik jenis PE, 700.000 ton jenis PP, 602.000 ton jenis PVC, dan 122.800 ton jenis PS. Gambar 1.3 menunjukkan persentase jumlah setiap jenis plastik terhadap jumlah totalnya.



Gambar 1.3 Produksi resin plastik
Sumber: PT. Citra Cendekia Indonesia (2016)

Dengan jumlah sebanyak 122,8 ribu ton per tahunnya dan sifat material *polystyrene* yang sulit terurai secara alamiah, hal ini membuat penanganan limbah *polystyrene* yang sebatas pembuangan saja akan membebani alam dalam penguraiannya (Fitidarini, 2011). Selain sulit terurai, *polystyrene* juga berdampak negatif terhadap lingkungan karena proses pembuatannya hingga kini masih menggunakan *chloro fluoro carbon* (CFC) yang menjadi penyebab pemanasan global. Selain berbahaya bagi lingkungan, *polystyrene* juga berbahaya bagi kesehatan karena memiliki komponen benzena yang merupakan salah satu penyebab kanker. *Polystyrene* juga bersifat mikroplastik yang dapat dimakan oleh ikan dan kemudian dikonsumsi manusia.

Dengan berbagai dampak dan bahaya yang dimiliki oleh produk berbahan PS *foam* ini, produk ini masih sangat digemari oleh berbagai kalangan sehingga masih terdapat banyak produsen dari produk tersebut. Pada umumnya, proses produksi *polystyrene foam* melalui beberapa tahap yaitu, *extrusion* di mana butiran *polystyrene* dilelehkan dan dibentuk menjadi lembaran; *forming* di mana lembaran PS *foam* dibentuk sesuai cetakan yang ada; *cutting* di mana terjadi proses pemotongan lembaran PS *foam* sesuai dengan ukuran yang ditentukan; *packaging* di mana kemasan PS *foam* tersebut dikumpulkan dan dimasukkan ke dalam suatu wadah. Skema proses produksinya dapat dilihat pada Gambar 1.4.



Gambar 1.4 Proses produksi PS *foam*
Sumber: Perusahaan PS *foam* (2018)

Selain menghasilkan produk PS *foam*, proses produksi ini menghasilkan berbagai jenis limbah, antara lain limbah sisa material PS *foam*, emisi gas seperti karbon dioksida dan karbon monoksida. Proses distribusi produk PS *foam* yang menggunakan kendaraan bermotor juga menimbulkan limbah berupa emisi gas karbon. *International Energy Agency* (IEA) pada tahun 2009 memprediksi bahwa jika tidak ada perubahan pada tren penggunaan transportasi, gas rumah kaca yang akan dihasilkan pada tahun 2050 akan naik sebesar 113% dari tahun 2007. Untuk merespons permasalahan akibat produk kemasan PS *foam* tersebut, maka perlu dilakukan kajian untuk mengidentifikasi dampak lingkungan dan bagaimana solusi untuk menangani dampak tersebut.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur dampak lingkungan dari suatu produk adalah *Life Cycle Assessment* atau disingkat LCA. Menurut ISO 14040, LCA merupakan seperangkat prosedur sistematis untuk mengumpulkan dan memeriksa *input* dan *output* bahan dan energi serta dampak lingkungan yang berkaitan dengan penggunaan suatu produk atau sistem layanan sepanjang siklus hidupnya. Pada awalnya, LCA digunakan terutama untuk membandingkan produk, misalnya untuk membandingkan dampak lingkungan dari produk sekali pakai dengan produk yang dapat digunakan kembali. Saat ini, penerapannya meliputi kebijakan pemerintah, perencanaan strategis, pemasaran, perbaikan proses, dan perancangan produk (Demers & Lewis, 1996). Pendekatan LCA yang dilakukan mencakup siklus hidup produk mulai dari awal siklusnya hingga akhir siklus atau *disposal*.

Pendekatan jenis ini disebut dengan analisis *cradle-to-grave*. Hal ini dilakukan untuk memberikan tinjauan menyeluruh dari siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam* dan mengkaji permasalahan secara sistematis dari sudut pandang yang lebih luas sehingga dapat memberikan usulan perbaikan yang turut mempertimbangkan seluruh rangkaian siklus hidup produk. Pendekatan ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SimaPro 8.2.

Life Cycle Assessment pada penelitian ini menggunakan data dari salah satu perusahaan *polystyrene foam* yang terletak di Pasuruan, Jawa Timur (yang kemudian disebut sebagai perusahaan PS *foam*). Data-data yang didapat dijadikan sebagai *input* dalam LCA untuk menunjukkan hasil terkait dengan penggunaan energi dan dampak lingkungan selama siklus hidup produk PS *foam*. Setelah itu, diharapkan dapat memberikan usulan perbaikan terkait penanggulangan limbah, kebijakan pemerintah, serta perbaikan proses produksi.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan sebelumnya, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan yang ada, antara lain:

1. Tingginya jumlah produksi PS *foam* di Indonesia.
2. Terdapat limbah yang dihasilkan dari siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam*.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah di atas, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut.

1. Apa saja potensi dampak yang dihasilkan dari siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam*?
2. Bagaimana rekomendasi untuk mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam*?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam*.
2. Memberikan rekomendasi untuk mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dapat tercapai dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui proses yang memberikan dampak lingkungan terbesar.
2. Mengurangi dampak lingkungan dan limbah dari siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam*.

1.6 Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan tetap berada dalam topik yang dibahas maka berikut merupakan beberapa batasan dalam penelitian ini.

1. Penelitian dilakukan dengan analisis *cradle to grave* di mana lingkup penelitian dimulai dari proses ekstraksi hingga *disposal* produk boks PS *foam* tanpa melibatkan proses transportasi dari kilang ke lokasi ekstraksi dan di dalam pabrik.
2. Proses daur ulang yang dimaksud dalam penelitian ini mencakup perubahan produk menjadi bentuk bahan baku dan tidak sampai menjadi bentuk produk baru yang lain.
3. Proses perbaikan hanya sampai tahap usulan saja.

1.7 Asumsi Penelitian

Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Penggunaan energi didapatkan dari perhitungan perangkat lunak SimaPro 8.2.
2. Distribusi produk dari *wholeseller* ke konsumen tidak diperhatikan.
3. Jarak yang digunakan disesuaikan dengan peta pada Google *maps*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas terkait teori yang mendukung dalam penelitian ini dan hanya berkaitan dengan pokok permasalahan yang dibahas agar perhitungan, analisis, dan pembahasan dapat diselesaikan secara benar.

2.1 Penelitian Terdahulu

Berikut merupakan beberapa penelitian terdahulu yang memiliki relevansi dengan penelitian ini dari segi metode maupun obyek penelitian.

1. Yani, Warsiki, dan Wulandari (2013) melakukan penelitian untuk menilai daur hidup botol berbahan *polyethylena terephthalate* (PET) khususnya pada produk minuman.
2. Palupi, Tama, dan Sari (2014) mengevaluasi dampak lingkungan produk kertas dengan menggunakan *life cycle assessment* dan *analytic network process* dalam penelitiannya.
3. Ilhamdika (2017) meneliti tentang dampak lingkungan dari proses daur ulang plastik dengan menggunakan metode *life cycle assessment*.

Rangkuman dan perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian saat ini tertera dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Penelitian Terdahulu dan Penelitian Ini

	Peneliti			
	Yani, Warsiki, & Wulandari (2013)	Palupi, Tama, & Sari (2014)	Ilhamdika (2017)	Penelitian ini
Obyek	Botol minuman berbahan PET	Produk kertas	Proses daur ulang plastik di CV Saam Jaya	Kemasan berbahan PS FOAM
Tujuan	Mengevaluasi siklus hidup botol PET pada produk minuman jenis teh.	Mengidentifikasi dampak lingkungan terbesar dan memilih alternatif terbaik untuk menanggulangnya.	Mengetahui dampak lingkungan selama proses produksi biji plastik daur ulang jenis <i>polyethylene</i> serta guna evaluasi dan rekomendasi.	Mengidentifikasi potensi dampak lingkungan terbesar dan memberikan alternatif <i>waste management</i> .
Metode	LCA	LCA dan ANP	LCA	LCA
Hasil	Dampak lingkungan dari siklus produksi kemasan menghasilkan cemaran udara, kebisingan, dan air limbah yang masih terbilang baik, tapi berkontribusi dalam pemanasan global, penipisan lapisan ozon, dan hujan asam.	Dampak terbesar pada distribusi batu bara menggunakan truk muatan 40 ton dan penggunaan bahan pemutih <i>optical brightening agent</i> . Alternatif yang dipilih adalah mengganti truk dengan kereta api.	Proses distribusi produk memberikan dampak terbesar sebesar 56,8% kemudian diikuti oleh proses pemanasan sebesar 30,7%. Potensi dampak terbesar yakni pada penipisan lapisan ozon dengan presentasi 43,7% dari keseluruhan nilai dampak.	Tahap produksi memberikan dampak terbesar kemudian diikuti oleh ekstraksi dan <i>disposal</i> dengan potensi terbesar pada kategori dampak <i>particulate matter formation</i> .



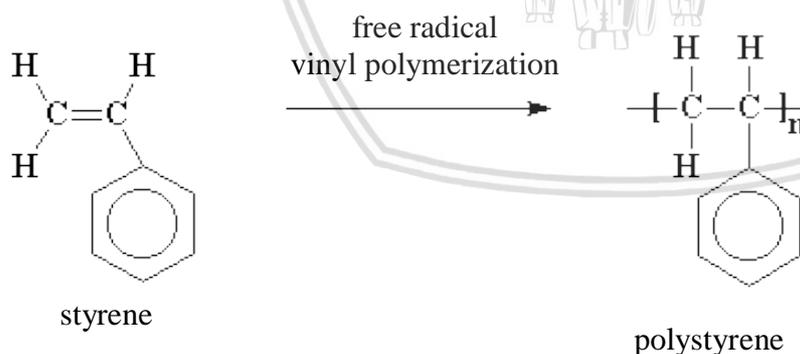
2.2 Polystyrene Foam

Polystyrene foam merupakan busa berbahan *polystyrene* yang berharga akibat sifat isolasi dan bantalannya. *PS foam* dapat terdiri dari 95-98 persen udara dan banyak digunakan untuk membuat isolasi pada peralatan rumah tangga, kemasan pelindung, papan selancar, jasa makanan dan kemasan makanan, suku cadang mobil, sistem stabilisasi jalan raya dan banyak lagi (*American Chemistry Council*, 2014).

2.2.1 Struktur dan Ikatan Kimia

Polystyrene (PS) adalah jenis plastik yang murah dan keras, dan mungkin hanya polietilena yang lebih umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Cangkir minum plastik bening terbuat dari PS. Begitu juga banyak bagian cetakan di bagian dalam mobil seperti tombol radio. *Polystyrene* juga digunakan dalam mainan dan perabotan seperti pengering rambut, komputer, dan peralatan dapur.

Polystyrene adalah polimer vinil. Secara struktural, PS terdiri atas rantai hidrokarbon yang panjang, dengan gugus fenil yang menempel pada setiap atom karbon lainnya. PS dihasilkan oleh polimerisasi vinil radikal bebas, dari stirena monomer. Dalam istilah kimia, *polystyrene* adalah hidrokarbon rantai panjang di mana pusat karbon dilekatkan pada gugus fenil (nama yang diberikan pada benzena cincin aromatik). Rumus kimia PS adalah $(C_8H_8)_n$ yang mana mengandung unsur kimia karbon dan hidrogen dengan ikatannya seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Polistirena

Sumber: *Polymer Science Learning Center* (2017)

Sifat material ditentukan oleh ikatan van der Waals antara rantai polimer. Karena molekulnya merupakan rantai hidrokarbon panjang yang terdiri dari ribuan atom, kekuatan tarik total antara molekul sangat besar. Bila dipanaskan (atau dibentuk pada kecepatan tinggi, karena kombinasi sifat insulasi viskoelastik dan termal), rantai dapat menghasilkan tingkat konformasi yang lebih tinggi dan saling meluncur satu sama lain. Kelemahan antarmolekul ini memberi fleksibilitas dan elastisitas. Kemampuan sistem untuk mengalami

deformasi di atas suhu transisi kaca memungkinkan polistiren (dan polimer termoplastik pada umumnya) mudah dilembutkan dan dibentuk pada saat pemanasan.

2.2.2 Penggunaan *Polystyrene Foam*

Polystyrene dibuat dengan merangkai bersama, atau mempolimerisasi stirena, bahan kimia yang digunakan dalam pembuatan banyak produk. Stirena juga terjadi secara alami pada makanan seperti stroberi, kayu manis, kopi dan daging sapi. *American Chemistry Council* (2014) mengemukakan beberapa penggunaan dari *PS foam*, yakni sebagai berikut.

1. Peralatan rumah

Lemari pendingin, AC, oven, *microwave*, penyedot debu, blender dan peralatan lainnya sering dibuat dengan polistirena (padat dan busa) karena bersifat inert (tidak bereaksi dengan bahan lain), hemat biaya, dan tahan lama.

2. Otomotif

Polystyrene (padat dan busa) digunakan untuk membuat banyak bagian mobil, termasuk tombol, panel instrumen, trim, panel pintu penyerap energi dan busa peredam suara. *Foam polystyrene* juga banyak digunakan di kursi pelindung anak.

3. Elektronik

Polystyrene digunakan untuk perumahan dan bagian lain untuk televisi, komputer dan semua jenis peralatan IT, di mana kombinasi bentuk, fungsi dan estetika sangat penting.

4. Jasa makanan

Kemasan jasa makanan *polystyrene* biasanya menyimpan makanan lebih baik, menjaga makanan lebih segar lebih lama dan dengan biaya yang murah.

5. Isolasi

Polystyrene foam ringan menyediakan isolasi termal yang sangat baik dalam berbagai aplikasi, seperti dinding bangunan dan lemari pendingin, lemari es dan *freezer*, dan fasilitas penyimpanan dingin industri. Selain itu, *PS foam* juga tahan lama dan tahan terhadap kerusakan air.

6. Medis

Karena kejelasan dan kemudahan sterilisasi, *polystyrene* digunakan untuk berbagai aplikasi medis, termasuk nampan kultur jaringan, tabung reaksi, piring petri, komponen diagnostik, rumah untuk alat tes, dan alat kesehatan.

7. *Packaging*

Polystyrene (padat dan busa) banyak digunakan untuk melindungi produk konsumen. Kasus CD dan DVD, kemasan kacang kapsul untuk pengiriman, kemasan makanan,

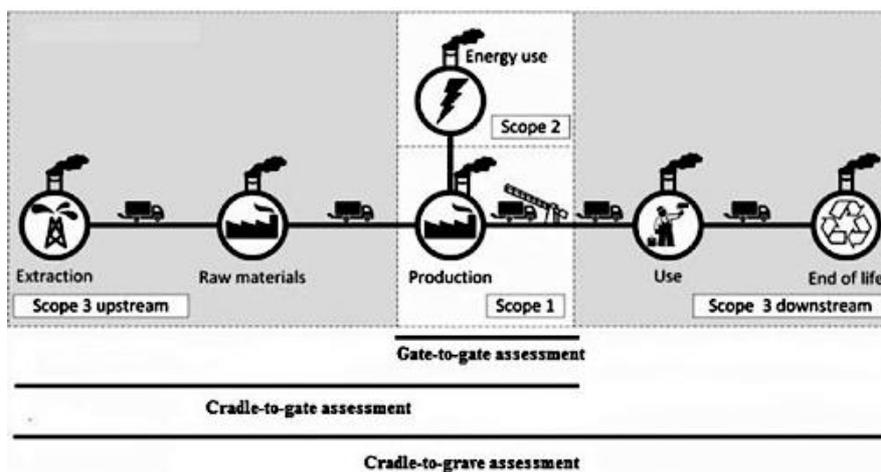
baki daging/unggas dan karton telur biasanya dibuat dengan *polystyrene* untuk melindungi dari kerusakan atau pembusukan.

2.3 Life Cycle Assessment

Meningkatnya kesadaran akan pentingnya perlindungan lingkungan serta produk yang diproduksi dan dikonsumsi menimbulkan banyak pengembangan metode yang bertujuan untuk lebih memahami dan mengatasi dampak ini. Salah satu teknik yang dikembangkan untuk tujuan ini adalah *life cycle assessment* (LCA). Dalam ISO 14040, *life cycle assessment* didefinisikan sebagai kompilasi dan evaluasi *input*, keluaran dan dampak lingkungan potensial dari sistem produk sepanjang siklus hidupnya. LCA dapat membantu dalam mengidentifikasi peluang untuk memperbaiki kinerja lingkungan dari produk pada berbagai titik dalam siklus hidupnya dan menginformasikan pengambil keputusan di industri, organisasi pemerintah atau organisasi non-pemerintah (misalnya untuk tujuan perencanaan strategis, penetapan prioritas, perancangan produk atau proses). LCA juga membantu pemilihan indikator kinerja lingkungan yang relevan, termasuk teknik pengukuran, dan pemasaran (misalnya menerapkan skema ekolabel, membuat klaim lingkungan, atau menghasilkan deklarasi produk lingkungan). LCA membahas aspek lingkungan dan dampak lingkungan yang potensial (misalnya penggunaan sumber daya) sepanjang daur hidup produk mulai dari bahan baku yang melalui produksi, penggunaan, perlakuan akhir, daur ulang dan pembuangan akhir.

2.3.1 Varian Life Cycle Assessment

LCA memiliki sejumlah varian yang menandakan ruang lingkup dan skala analisis yang dilakukan seperti terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Varian LCA
Sumber: Filimonau (2015)

Terdapat 4 varian utama dalam lingkup *life cycle assessment*, yakni *cradle-to-grave*, *cradle-to-gate*, *gate-to-gate*, dan *cradle-to-cradle*.

1. *Cradle-to-grave*

Pendekatan ini berusaha untuk memperhitungkan semua proses dan dampak lingkungan terkait yang dikaitkan dengan siklus hidup produk atau jasa yang dimulai dengan *cradle* (yaitu ekstraksi bahan baku), sepanjang proses produksi, perakitan, distribusi dan penggunaan konsumen hingga *finishing* sampai proses pembuangan akhir, seperti insinerasi, penimbunan, daur ulang atau penggunaan kembali.

2. *Cradle-to-gate*

Kara dalam Filimonau (2015) mengemukakan bahwa konsep LCA ini berkaitan dengan penilaian dampak lingkungan yang dikaitkan dengan proses industri hulu saja, yaitu sampai pada titik ketika sebuah produk meninggalkan gerbang pabrik tempat pembuatan dan perakitannya. Pemikiran '*cradle-to-gate*' tidak lengkap karena tidak menangkap keseluruhan dampak lingkungan yang terkait dengan sistem produk atau jasa karena tahap 'hilir' (penggunaan dan akhir masa pakai) dari siklus hidupnya dikesampingkan.

3. *Gate-to-gate*

Konsep ini berkaitan dengan dampak lingkungan yang diakibatkan oleh operasi perusahaan tertentu. Ini tidak termasuk semua 'hulu' dan juga semua beban lingkungan 'hilir', sehingga hanya berfokus pada dampak lingkungan di tempat saja.

4. *Cradle-to-cradle*

Van Dijk dalam Filimonau (2015) mengemukakan bahwa konsep *cradle-to-cradle* atau *closed-loop* LCA berkaitan dengan meminimalkan jumlah limbah yang dihasilkan pada akhir siklus hidup produk atau jasa dan mempertahankan statusnya sebagai sumber daya atau bahkan nilai lebih tinggi, yaitu proses yang dikenal sebagai *upcycling*.

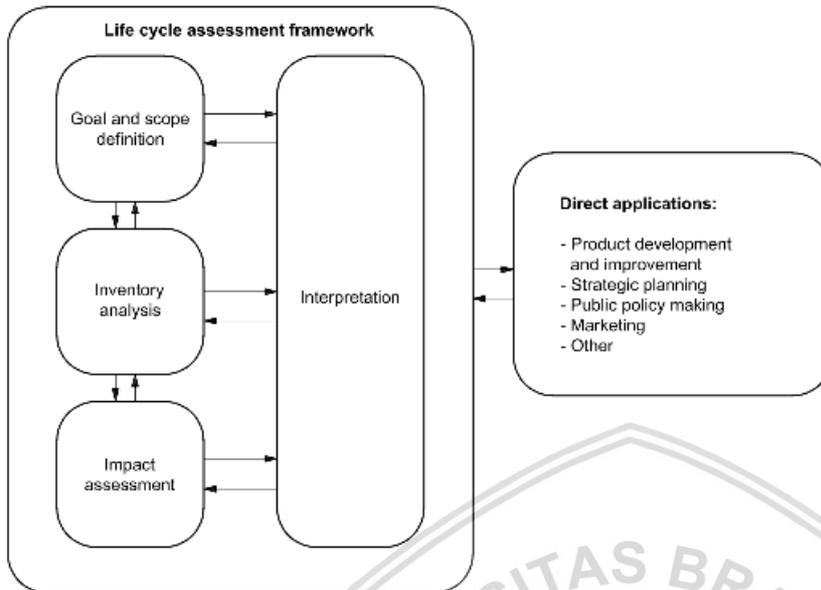
2.3.2 Fase Utama *Life Cycle Assessment*

Berdasarkan ISO 14040, terdapat empat fase utama dalam studi LCA, yakni sebagaimana tertera pada Gambar 2.3.

2.3.2.1 Fase Pendefinisian Tujuan dan Ruang Lingkup

Ruang lingkup, termasuk batasan sistem dan tingkat kedetailan, dari LCA tergantung pada subyek dan tujuan penelitian. Kompleksitas LCA dapat bervariasi tergantung pada tujuan dari LCA tersebut. Tujuan dari suatu LCA menyatakan hal-hal mengenai penerapan yang dimaksud, alasan melakukan penelitian, khalayak yang dituju (kepada siapa hasil

penelitian dimaksudkan untuk dikomunikasikan) dan apakah hasilnya dimaksudkan untuk digunakan sebagai perbandingan yang diungkapkan kepada publik.



Gambar 2.3 Tahap-tahap dalam LCA
Sumber: ISO 14040 (2006)

Ruang lingkup harus didefinisikan dengan baik untuk memastikan bahwa luas, kedalaman dan detail penelitiannya kompatibel dan memadai untuk memenuhi tujuan yang dinyatakan. Ruang lingkup LCA meliputi beberapa item antara lain, sistem produk yang akan dipelajari, fungsi sistem produk, unit fungsional, batasan sistem, prosedur alokasi, kategori dampak yang dipilih dan metodologi penilaian dampak, dan interpretasi selanjutnya yang digunakan, persyaratan data, asumsi, keterbatasan, persyaratan kualitas data awal, jenis tinjauan kritis (jika ada), jenis dan format laporan yang diperlukan untuk penelitian terkait. LCA adalah teknik iteratif, sehingga ketika data dan informasi telah dikumpulkan, berbagai aspek dari ruang lingkup LCA mungkin membutuhkan modifikasi agar dapat memenuhi tujuan awal penelitian.

2.3.2.2 Fase Analisis Inventori

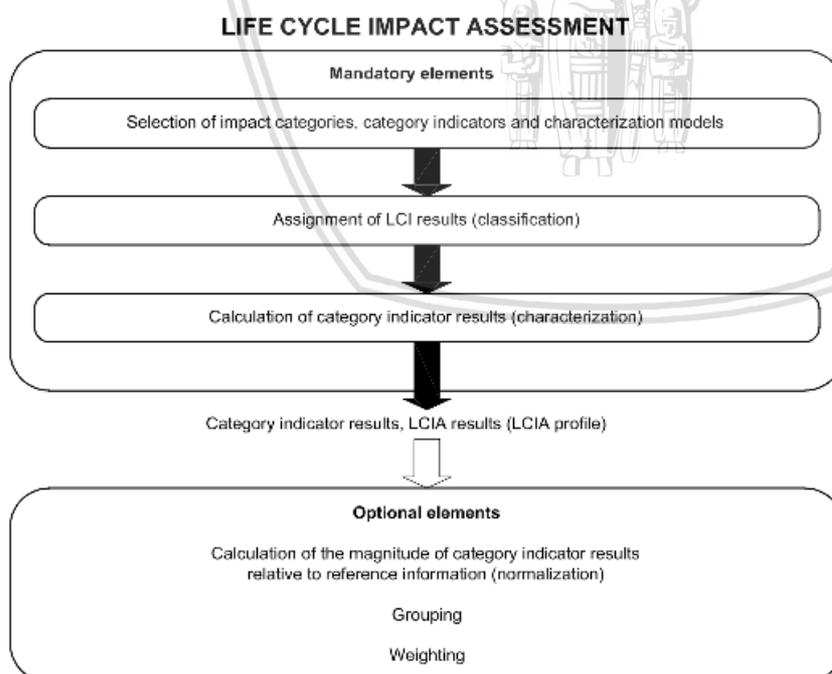
Tahap analisis persediaan siklus hidup (fase LCI atau *life cycle inventory*) adalah fase kedua dari LCA. Pada tahap ini, yang dilakukan adalah inventarisasi data *input/output* yang berkaitan dengan sistem yang sedang dipelajari dan juga prosedur perhitungan untuk menghitung *input* dan keluaran yang relevan dari sistem produk. Hal ini melibatkan pengumpulan data yang diperlukan untuk memenuhi tujuan studi yang ditentukan.

Data untuk setiap unit proses dalam sistem dapat diklasifikasikan berdasarkan kategori, di antaranya adalah *input* energi, *input* bahan baku, *input* tambahan; produk, ko-produk dan limbah; emisi ke udara, pembuangan ke air dan tanah; serta aspek lingkungan lainnya.

Setelah pengumpulan data, dilakukan prosedur perhitungan yang di dalamnya termasuk validasi data yang dikumpulkan, hubungan data dengan unit proses, dan hubungan data dengan arus referensi dari unit fungsional. Semuanya diperlukan untuk menghasilkan inventaris dari sistem yang ditetapkan untuk setiap unit proses dan untuk unit fungsional dari sistem produk yang akan dimodelkan.

2.3.2.3 Fase Penilaian Dampak

Tahap penilaian dampak siklus hidup (fase LCIA) adalah fase ketiga dari LCA. Tujuan LCIA (*life cycle impact assessment*) adalah untuk memberikan informasi tambahan untuk membantu penilaian hasil LCI sistem produk sehingga dapat lebih memahami signifikansi lingkungannya. Secara umum, proses ini mengaitkan data inventaris dengan kategori dampak lingkungan yang spesifik dan indikator kategori, sehingga berusaha memahami dampak tersebut. Fase LCIA juga menyediakan informasi untuk tahap interpretasi siklus hidup. Fase ini memiliki beberapa elemen wajib dan opsional seperti yang tertera pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Elemen fase LCIA

Sumber: ISO 14040 (2006)

LCIA memiliki kelemahan karena hanya dapat membahas masalah lingkungan yang ditentukan dalam tujuan dan ruang lingkup penelitian. Oleh karena itu, LCIA bukanlah

penilaian lengkap terhadap seluruh masalah lingkungan dari sistem produk yang dipelajari. LCIA tidak selalu dapat menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kategori dampak dan indikator hasil terkait dari sistem produk alternatif.

2.3.2.4 Fase Interpretasi

Interpretasi siklus hidup adalah fase akhir dari prosedur LCA, di mana hasil LCI atau LCIA atau keduanya diringkas dan didiskusikan sebagai dasar untuk pengambilan kesimpulan, pemberian rekomendasi dan pengambilan keputusan sesuai dengan definisi tujuan dan ruang lingkup yang telah ditetapkan di tahap awal dari LCA. Interpretasi harus mencerminkan fakta bahwa hasil LCIA didasarkan pada pendekatan relatif, bahwa hal itu mengindikasikan dampak lingkungan yang potensial, dan tidak memprediksi dampak aktual pada titik akhir kategori atau ambang batas.

2.4 SimaPro 8.2

SimaPro merupakan sebuah perangkat lunak untuk penilaian dampak lingkungan yang dikembangkan oleh PRE' Consultants yang berasal dari Belanda. SimaPro merupakan salah satu perangkat lunak LCA yang paling banyak digunakan dengan penggunaannya di lebih dari 60 negara. Kelebihannya terletak pada transparansi dalam penyajian data dan hasil. Terlebih lagi, berbeda dengan perangkat lunak LCA lainnya, SimaPro dapat menghitung dengan tepat probabilitas suatu alternatif adalah lebih baik dibandingkan alternatif lain. SimaPro juga dikatakan sebagai perangkat yang andal dan *user-friendly* serta secara rutin mengadakan pembaruan perangkatnya. Keuntungan lainnya adalah SimaPro dapat digunakan oleh beberapa pengguna pada waktu yang sama terlepas dari lokasi geografisnya. Hasil dari sejumlah studi kasus LCA dipublikasikan setiap tahunnya (Andrae, 2009).

SimaPro telah berada di pasaran selama hampir 17 tahun dan dibanderol dengan kisaran harga beberapa ribu Euro atau sekitar belasan juta Rupiah. SimaPro menghitung sistem produk dalam matriks inversi, yang berarti menggunakan algoritma yang efisien dan menyelesaikan ribuan proses dalam satu kalkulasi. Lanjutnya, Curran (2015) mengemukakan bahwa SimaPro mampu menyelesaikan sejumlah besar proses unit dalam satu kalkulasi, namun tiap langkah permodelan hingga hasil akhirnya hanya akan tersedia setelah dilakukan perhitungan. Algoritma tersebut mengizinkan SimaPro untuk menggunakan hanya proses unit dalam perhitungannya, kemudian menindaklanjuti hubungan suatu proses dengan proses lainnya secara dinamis saat melakukan perhitungan. Oleh sebab demikian, hasil yang ditampilkan selalu menunjukkan status data terkini.

2.5 *Cleaner Production*

Upaya untuk meminimalkan dampak lingkungan dari proses produksi, produk, dan jasa selama dekade terakhir telah didukung oleh komitmen pemerintah dan industri terhadap perlindungan lingkungan. Agenda yang mendasarinya adalah pengembangan strategi untuk pembangunan berkelanjutan baik dalam bisnis maupun masyarakat luas. UNEP sendiri menciptakan istilah *Cleaner Production* (CP) untuk menggambarkan konsep tersebut. CP menggambarkan pendekatan preventif hingga pengelolaan lingkungan. Meski demikian, ini bukan merupakan definisi legal atau ilmiah untuk dibedah, dianalisis atau mengalami perselisihan teoretis. Definisi ini lebih mengacu pada bagaimana barang dan jasa diproduksi dengan dampak minimal dengan keterbatasan teknologi dan ekonomi (Nelsson, 2007).

Definisi *Cleaner Production* yang diambil oleh UNEP (*United Nations Environment Programme*) adalah penerapan berkelanjutan dari strategi lingkungan terpadu terhadap proses, produk, dan jasa untuk meningkatkan efisiensi secara keseluruhan dan mengurangi risiko bagi manusia dan lingkungan. CP dapat diterapkan pada proses yang digunakan dalam industri apa pun, hingga produk dan beberapa jenis jasa yang ada di masyarakat. Untuk proses produksi, CP didapatkan melalui sejumlah ukuran seperti konservasi bahan baku, air dan energi; menghilangkan bahan baku beracun dan berbahaya; dan mengurangi kuantitas dan toksisitas semua emisi dan limbah selama proses produksi. Untuk produk, CP bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan, kesehatan, dan keselamatan dari produk selama seluruh siklus hidupnya, mulai dari ekstraksi bahan baku, melalui pembuatan dan penggunaan hingga pembuangan akhir produk.

Cleaner Production sendiri mengharuskan agar sumber daya dapat diolah secara efisien, sehingga dapat dikatakan bahwa CP memiliki lima prinsip dasar dalam penerapannya, yakni:

1. *Input Substitution*

Prinsip ini ditandai dengan penggunaan bahan baku atau bahan pembantu atau alat operasional yang kurang berbahaya, serta penggunaan bahan operasi dengan masa pakai lebih lama.

2. *Good Housekeeping*

Prinsip ini dicapai dengan cara meningkatkan efisiensi material dan energi dari tindakan dalam proses, misalnya dengan mengurangi kerugian akibat kebocoran. Dalam prinsip ini, perlu dilakukan pelatihan bagi karyawan.

3. *Internal Recycling*

Prinsip ini dilakukan dengan membuat *closed loop* aliran material untuk air, pelarut, dan sebagainya.

4. *Technological Optimisation/Change*

Prinsip ini ditandai dengan penggunaan teknologi terbaru, perbaikan kontrol proses, perancangan ulang proses, dan perubahan atau pergantian proses berbahaya.

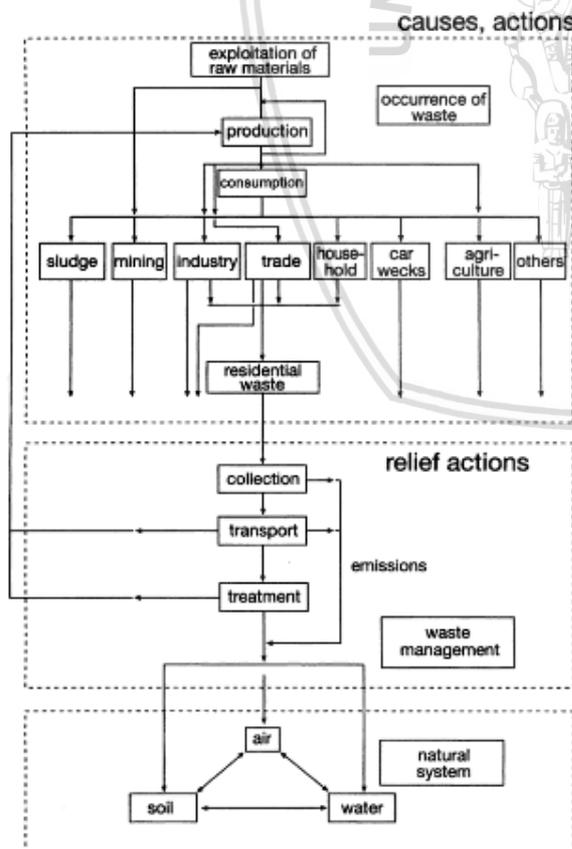
5. *Optimisation of the Product*

Prinsip mengarahkan agar produk memiliki siklus hidup lebih panjang, lebih mudah diperbaiki atau didaur ulang, serta penggunaan material yang tidak berbahaya dalam pembuatan produk tersebut.

Dalam jangka panjang, CP akan beralih dari proses perbaikan terus menerus menjadi proses perancangan ulang produksi. Tujuannya adalah untuk mencapai nol emisi, yaitu proses di mana semua bahan masukan berubah menjadi produk, baik untuk dijual atau digunakan dalam proses lain.

2.6 *Waste Management*

Lemann (2008) dalam bukunya mendefinisikan *waste* sebagai benda portabel, tidak diinginkan oleh pemiliknya, yang mana harus ditiadakan demi kepentingan umum. Lemann kemudian membuat bagan alir *waste* seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bagan alir *waste*
Sumber: Lemann (2008)

Dari sudut pandang keuangan, *waste* terdiri dari bahan dan benda yang tidak memiliki nilai ekonomi baik saat ini atau di masa yang akan datang, karena tidak terdapat permintaan di pasar. Penyimpanan limbah biasanya menimbulkan kerugian finansial atau kerugian lainnya bagi pemiliknya.

Pengelolaan limbah meliputi pembentukan, pengolahan, dan pembuangan bahan limbah dan produknya. Menganalisis keseluruhan aliran material pada seluruh kegiatan manusia dapat membantu memecahkan akar masalah dari pengelolaan limbah. Setiap hal yang mempengaruhi masing-masing bahan diisolasi dan dianalisis untuk setiap lingkungan. Lingkungan dapat berupa rumah tangga, industri, atau alat transportasi.

Pemerintah negara dan lokal dapat memilih rangkaian teknologi dan program untuk menangani limbah, mulai dari mengumpulkan sampah dan membuangnya hingga proses teknis yang digunakan dalam penelitian untuk menentukan keefektifannya. Berikut merupakan beberapa pilihan jenis *waste management* yang dapat dilakukan pada jenis limbah non-organik (Vaughn, 2009).

1. *Collection*

Sebagian besar masyarakat mengandalkan truk atau jenis kendaraan lain untuk membawa limbah dari tempat penghasilnya ke tempat lain untuk disortir dan diolah. Pengumpulan limbah adalah unsur pengelolaan limbah yang paling mahal, terhitung antara 50 hingga 70 persen dari biaya operasi. Pada sebagian besar wilayah, sampah perumahan dikumpulkan oleh kendaraan besar yang mengumpulkan limbah yang telah ditempatkan di beberapa jenis tempat sampah.

2. *Incineration* (pembakaran)

Salah satu cara umum di mana volume limbah dikurangi melalui proses pembakaran terkendali yang digunakan oleh pemerintah dan perusahaan swasta di seluruh dunia. Beberapa fasilitas mengubah panas hasil pembakaran dengan air untuk menghasilkan uap, yang kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, disebut *waste-to-energy*. Cara ini sangat cocok untuk limbah yang tidak berbahaya, karena menghancurkan senyawa kimia dan organisme penyebab penyakit terkadang sulit, bahkan saat membakar bahan pada suhu yang sangat tinggi.

3. *Integrated waste management*

Beberapa negara telah mengadopsi sebuah proses untuk memilih jenis teknik, teknologi, dan program pengelolaan yang harus digunakan untuk mencapai tujuan pengelolaan limbah, termasuk empat metode yang diidentifikasi oleh EPA (*Environmental*

Protection Agency), yaitu pengurangan sumber limbah, daur ulang dan pengomposan, pembakaran, dan tempat pembuangan sampah.

4. *Landfills*

Tempat pembuangan sampah pada awalnya hanya berupa parit terbuka di mana sampah ditumpuk menjadi tumpukan dan kadang ditutup dengan tanah berukuran 12 sampai 15 inci dan kemudian dilapisi dengan sampah lain seperti abu. Namun, pada saat ini TPA telah mengalami perkembangan dan berbeda dari yang dibangun seratus tahun yang lalu. Teknologi dan desain yang canggih diterapkan untuk membuat tempat pembuangan sampah menjadi salah satu cara yang paling sering digunakan untuk menangani limbah. Terdapat beberapa jenis *landfill*, di antaranya adalah *sanitary landfill* dan *secure landfill*.

5. *Recycling*

Daur ulang umumnya mengacu pada pemisahan bahan dalam aliran limbah sehingga beberapa bahan tersebut dapat digunakan kembali. Daur ulang sangat bergantung pada dua faktor, yakni ketersediaan barang daur ulang dan pasar untuk barang tersebut. Daur ulang dianggap sebagai salah satu jenis pengelolaan limbah terbaik karena dapat meregangkan kapasitas dan kehidupan *landfill* dengan mengurangi jumlah bahan yang dibutuhkan untuk produk dan kemasan.

6. *Source reduction*

Salah satu strategi baru untuk mengurangi volume limbah atau untuk mengurangi tingkat toksisitas limbah adalah *source reduction*. Berbagai cara agar pengurangan sumber dapat dilakukan, seperti merancang kemasan sedemikian rupa sehingga produk dapat diisi ulang, contohnya pada produk sabun cair atau sampo. Sebagian besar penekanan dalam pengurangan sumber ditempatkan pada pilihan konsumen, membuat konsumen bertanggung jawab atas jumlah limbah yang mereka hasilkan. *Source reduction* juga memerlukan perubahan perilaku yang tidak dapat diatur oleh pemerintah, hanya oleh tekanan sosial dari masyarakat sekitar.

7. *Waste transfer stations*

Pada banyak komunitas, baik di perkotaan maupun di pedesaan, limbah padat melewati titik pemrosesan tertentu yang disebut stasiun pemindah sampah. Truk pengumpul sampah mungkin membawa muatannya ke salah satu fasilitas ini, tempat sampah disimpan sementara sampai dapat dimuat ke truk atau kendaraan pengangkut yang lebih besar untuk dikirim ke tempat pembuangan. Menggunakan stasiun transfer dapat mengurangi jarak yang ditempuh ke dan dari tempat pembuangan sampah, sehingga

truk yang lebih kecil melakukan perjalanan yang lebih pendek melalui jalan perkotaan. Stasiun pemindahan sampah di dalamnya dapat termasuk *loading dock*, area parkir, atau fasilitas penyimpanan.





Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai tahap-tahap yang dilakukan dalam penelitian agar terarah dan sistematis. Pada bab ini juga dibahas mengenai metode penelitian, tempat dan waktu penelitian, serta metode pengumpulan data dan pengolahan data.

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk jenis penelitian deskriptif yang mana menurut Sugiyono (2008), penelitian deskriptif merupakan penelitian yang bertujuan untuk memberikan gambaran dari variabel penelitian. Sedangkan Hasan (2002) mengemukakan bahwa metode deskriptif bertujuan untuk menguraikan atau memberikan keterangan-keterangan mengenai suatu data atau keadaan atau fenomena yang ada. Penelitian ini dilakukan untuk menemukan potensi dampak lingkungan yang diakibatkan oleh siklus hidup produk kemasan berbahan PS *foam* berdasarkan data-data yang didapat.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian akan dilaksanakan di perusahaan kemasan PS *foam* yang terletak di Randupitu, Gempol, Pasuruan, Jawa Timur dimulai dari bulan Desember 2017 hingga Juni 2018.

3.3 Langkah-langkah Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini dibagi ke dalam beberapa tahapan sebagai berikut.

3.3.1 Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Studi lapangan

Melakukan pengamatan awal pada obyek penelitian di perusahaan untuk mengetahui ranti pasokan produk kemasan PS *foam*. Metode pengumpulan data yang dilakukan adalah wawancara dengan pihak perusahaan.

2. Studi pustaka

Dilakukan untuk mempelajari teori dan ilmu pengetahuan yang berkaitan dengan permasalahan yang diteliti. Pustaka yang digunakan dapat berasal dari buku, jurnal, prosiding, dan situs web.

3. Identifikasi masalah

Setelah menentukan studi lapangan, maka didapatkan gambaran dari permasalahan yang ada, sehingga dapat diidentifikasi masalah yang difokuskan untuk diteliti.

4. Menentukan tujuan penelitian

Setelah masalah teridentifikasi, selanjutnya tujuan penelitian dapat ditetapkan berdasarkan apa yang ingin dicapai dari meneliti permasalahan tersebut, misalnya saja penelitian ini bertujuan menganalisis potensi dampak lingkungan dari kemasan berbahan PS *foam*.

3.3.2 Tahap Pengumpulan Data

Data yang digunakan adalah data primer dan data sekunder. Berikut merupakan data yang digunakan dalam penelitian ini.

1. *Supplier* dan lokasinya
2. Jenis limbah yang dihasilkan
3. Jumlah produksi bulanan
4. Tujuan pengiriman dan jaraknya
5. Alat transportasi yang digunakan beserta kapasitasnya
6. Masukan dan keluaran tiap proses
7. Data proses produksi
8. Data energi yang digunakan
9. Basis data SimaPro 8.2

3.3.3 Tahap Pengolahan Data (Pelaksanaan LCA)

Pada tahap pengolahan data, dilakukan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) pada produk kemasan PS *foam* dengan bantuan perangkat lunak SimaPro 8.2. Berdasarkan ISO 14040, pelaksanaan LCA melalui empat tahap, yakni:

1. Menentukan tujuan dan ruang lingkup LCA

Pada tahap ini, dilakukan penentuan tujuan, ruang lingkup dari LCA, yaitu *cradle-to-grave* dan pendefinisian unit fungsional.

2. Perhitungan *Life-Cycle Inventory* (LCI)

Pada perhitungan LCI, dilakukan perhitungan untuk mengkuantifikasi *input* dan *output* pada suatu proses produksi. Terdapat 4 langkah yang dapat dilakukan yaitu:

- a. Membuat diagram alir dari proses yang sedang dievaluasi.
- b. Membuat rencana pengumpulan data.
- c. Mengumpulkan data.
- d. Mengevaluasi dan melaporkan hasil.

3. Melakukan *Life Cycle Impact Analysis* (LCIA)

Dalam tahap LCIA, dilakukan evaluasi terhadap potensi dampak yang dapat terjadi. Tahap-tahap dalam melakukan LCIA sebagai berikut.

- a. Pemilihan dan Pendefinisian Kategori Dampak
- b. *Classification*
- c. *Characterization*
- d. *Normalization*
- e. *Grouping*
- f. *Weighting*
- g. Evaluasi

4. Melakukan *Life Cycle Interpretation*

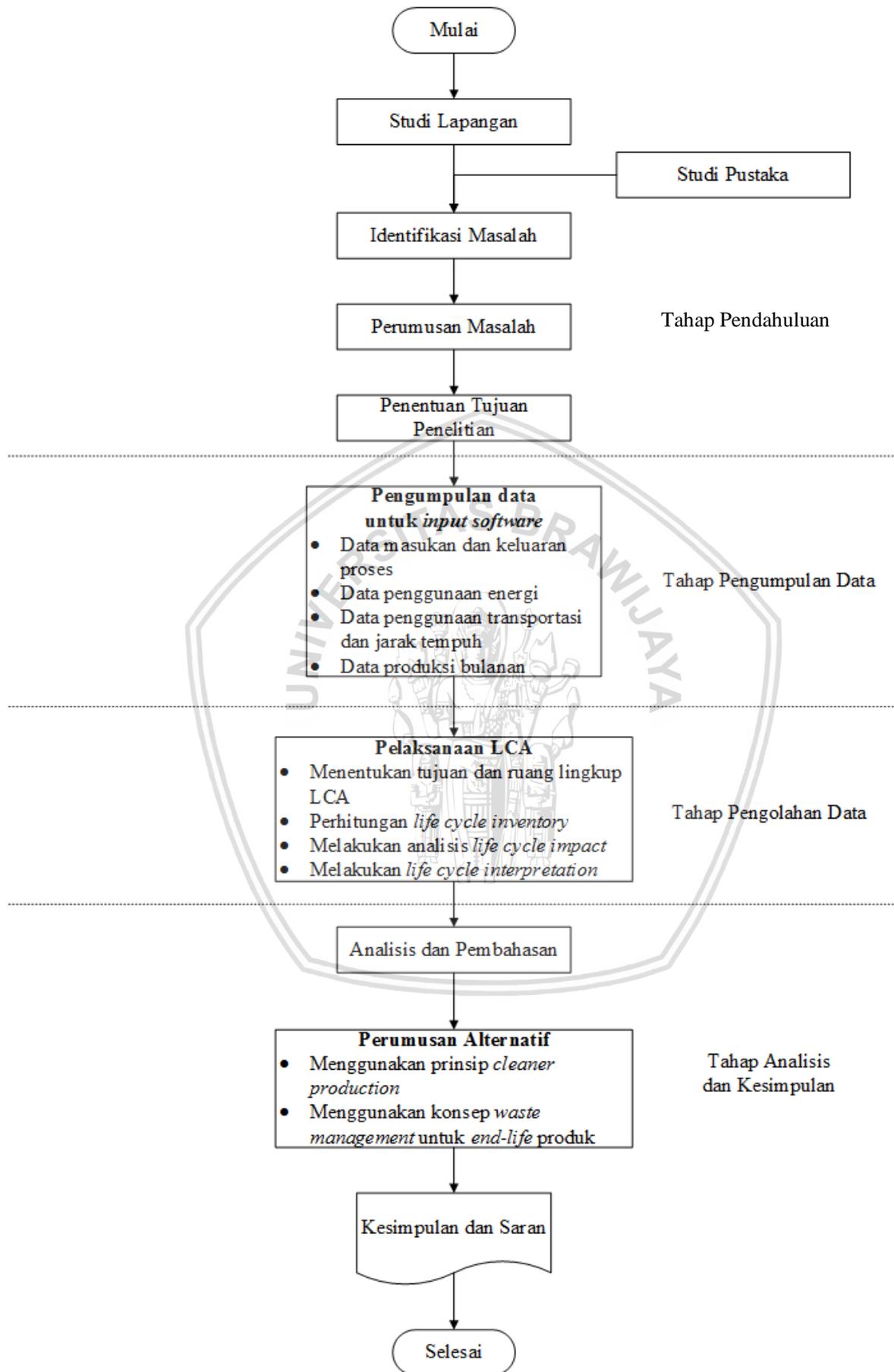
Pada tahap *Life Cycle Interpretation*, dilakukan analisis hasil dan kesimpulan.

3.3.4 Tahap Analisis dan Kesimpulan

Pada tahap ini dijelaskan hasil pengolahan data dari tahap sebelumnya untuk kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan usulan perbaikan. Perumusan usulan perbaikan dilakukan berdasarkan lima prinsip dasar konsep *cleaner production* untuk daur hidup produk dan konsep *waste management* untuk siklus akhir hidupnya. Tahap akhir dari penelitian ini adalah penarikan kesimpulan dan pemberian saran terhadap seluruh proses penelitian yang telah dilakukan.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang telah dijabarkan pada sub-bab sebelumnya digambarkan dalam diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan mengenai pengolahan data-data yang telah dikumpulkan menggunakan teori dan metode yang dijelaskan pada bab sebelumnya sehingga didapatkan hasil penelitian yang sesuai dengan tujuan dari penelitian ini.

4.1 Produk Kemasan Berbahan PS Foam

Perusahaan *styrofoam* pada umumnya memproduksi beberapa produk dengan bentuk dan fungsi yang berbeda tetapi bahan dasarnya sama, yakni dari biji plastik *polystyrene*. Beberapa produk perusahaan *styrofoam*, antara lain:

1. Kemasan makanan berbahan PS Foam

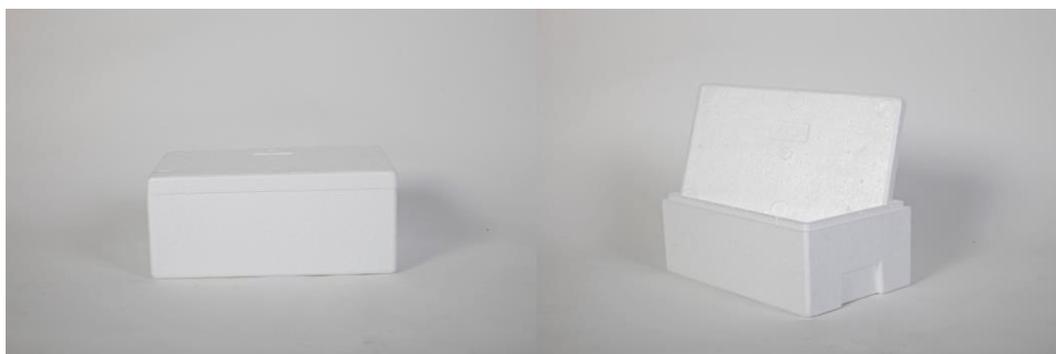
Untuk produk kemasan seperti pada Gambar 4.1, terdapat beberapa ukuran, yakni $27 \times 19,5 \times 6,5$ cm; $20 \times 14 \times 7$ cm; $19 \times 19 \times 8$ cm; dan $13,5 \times 13,5 \times 7,5$ cm.



Gambar 4.1 Produk boks makanan
Sumber: Perusahaan PS foam

2. Boks ikan dan buah

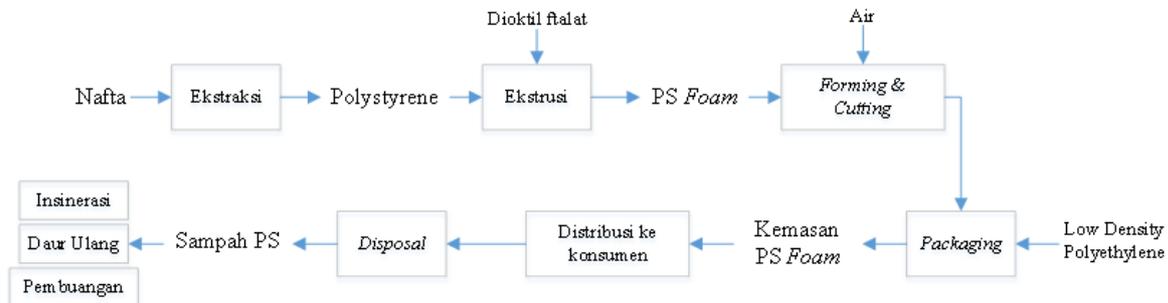
Untuk produk kemasan seperti pada Gambar 4.2, terdapat beberapa ukuran, antara lain $25 \times 20 \times 31$ cm; $40 \times 25 \times 30$ cm; $33,5 \times 24,5 \times 30$ cm; dan $26,5 \times 20,5 \times 10,5$ cm.



Gambar 4.2 Produk boks pendingin
Sumber: Perusahaan PS foam

3. Pelindung barang elektronik
4. Bahan pelindung helm

Untuk memproduksi produk-produk tersebut, perusahaan beroperasi selama kurang lebih 8 jam dari hari Senin hingga Sabtu tiap minggunya.



Gambar 4.3 Skema siklus hidup produk PS foam

Gambar 4.3 menunjukkan secara sederhana skema dari siklus hidup produk kemasan berbahan *polystyrene foam* dimulai dari tahap ekstraksi hingga tahap *disposal*.

4.1.1 Proses Produksi

Untuk membuat produk kemasan tersebut, biji plastik harus melalui beberapa proses yakni sebagai berikut.

1. Ekstraksi bahan baku

Kilang minyak menyaring minyak mentah dalam jumlah besar untuk menghasilkan bahan bakar yang dibutuhkan seperti diesel, bensin, dan minyak pemanas. Namun, beberapa bahan baku untuk memproduksi plastik seperti *polystyrene* juga diekstrak dari minyak. Ketika minyak mentah dimurnikan, sejumlah 4% berakhir sebagai bahan baku untuk produksi plastik. Nafta disuling dari minyak mentah dan diproses untuk menghasilkan *polystyrene*. Minyak mentah dipompa dari sumur minyak di laut, kemudian diangkut melalui pipa atau tanker ke kilang minyak. Minyak mentah mengalami distilasi dan selama proses ini, bahan bakar, bahan kimia, dan nafta disuling dari minyak mentah. Nafta diproses di pabrik untuk menghasilkan berbagai plastik, termasuk *polystyrene*. *Polystyrene* biasanya dalam bentuk butiran kecil (granula) pada tahap ini. Granula *polystyrene* kemudian diangkut ke pabrik untuk diproses menjadi produk-produk *polystyrene*.

2. Pemanasan (*Heating*)

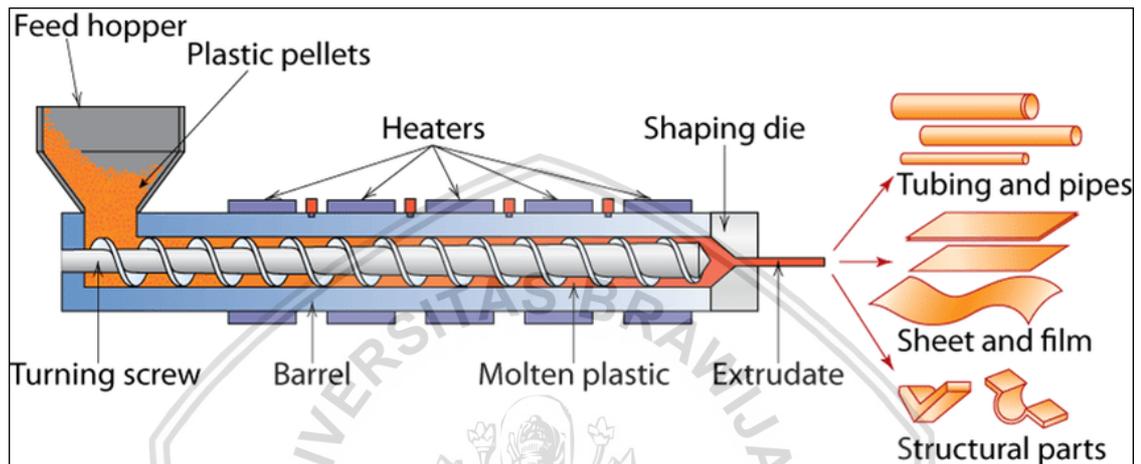
Proses produksi dimulai ketika pelet resin *polystyrene* dimasukkan ke dalam mesin melalui *feed hopper*. Pelet plastik ini kemudian dipanaskan dengan bantuan energi listrik hingga meleleh.

3. *Foaming*

Proses *foaming* terjadi pada saat gas *blowing agent* berupa butana (C_4H_{10}) bereaksi dengan plastik yang meleleh kemudian menjadi busa.

4. *Extrusion*

Busa *polystyrene* yang meleleh ditarik dan diperpanjang menjadi lembaran *PS foam*. Lembaran ini kemudian digulung menjadi suatu ukuran gulungan tertentu. Mesin yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Gambaran mesin *extruder* plastik
Sumber: Bacalhau & Cunha (2017)

5. Pendinginan (*Cooling*)

Proses pendinginan lembaran *PS foam* dilakukan pada suhu ruangan dengan bantuan air. Sebelum masuk ke mesin berikutnya, lembaran ini disemprotkan air dan didinginkan selama proses perpindahannya dari *extruder machine* ke *forming machine*.

6. Pencetakan (*Forming*)

Lembaran busa *polystyrene* dilanjutkan ke proses pencetakan pada mesin *forming*. Pada proses ini, lembaran busa dibentuk sesuai bentuk kemasan makanan seperti pada Gambar 4.1.

7. Pemotongan (*Cutting*)

Pada proses ini, lembaran busa *polystyrene* yang telah diberikan bentuk sebelumnya dipotong sesuai ukurannya dengan bantuan mesin *cutting*. Lembaran yang telah dipotong langsung terlepas dari bagian lembaran dan ikut membentuk tumpukan kemasan.

8. Pengemasan

Kemasan *PS foam* yang menumpuk dikelompokkan dalam jumlah tertentu (biasanya 100) kemudian dikemas secara manual menggunakan kemasan plastik bening (berbahan *Low Density Polyethylene*).

9. Recycling

Limbah dari proses produksi kemasan PS *foam* biasanya dilelehkan kembali dan dibentuk kembali menjadi granula sebagaimana bentuk semulanya. Granula hasil daur ulang ini dapat dipakai sebagai bahan baku untuk proses produksi kemasan lagi.

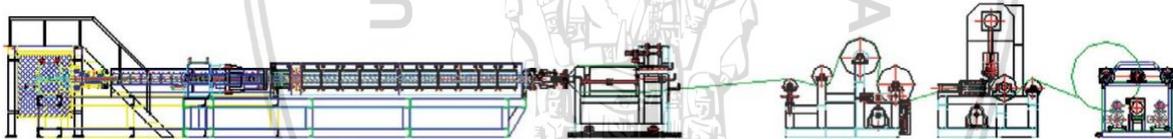
Tabel 4.1 berisi penjelasan mengenai mesin-mesin yang digunakan pada proses produksi kemasan PS *foam*.

Tabel 4.1
Fasilitas Pendukung Proses Produksi

No.	Nama	Fungsi	Energi	Keterangan
1.	<i>Extruder</i>	Mengubah bahan baku biji plastik PS menjadi lembaran busa	120 kWh	50 kg/h
2.	<i>Forming machine</i>	Mencetak bentuk kemasan makanan pada lembaran busa PS	100 kWh	8 s/die
3.	<i>Cutting machine</i>	Memotong lembaran busa PS yang telah dibentuk sesuai ukurannya	68 kWh	5 s
4.	<i>Recycling machine</i>	<i>Motor</i> : menggerakkan tumpukan lembaran <i>foam</i> secara horizontal	30 kWh	90 kg/h
		<i>Heater</i> : memanaskan dan melelehkan limbah PS <i>foam</i>	25 kWh	
		<i>Granule cutting motor</i> : berfungsi membentuk granula	2.2 kWh	

Sumber: Perusahaan PS *Foam*

Secara umum, mesin-mesin yang tertera pada Tabel 4.1 saling tersambung seperti pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Skema lini mesin produksi
Sumber: Perusahaan PS *foam*

4.1.2 Proses Distribusi

Selain proses produksi, proses distribusi juga memiliki peran yang tidak kalah pentingnya. Proses distribusi untuk siklus hidup kemasan PS *foam* sendiri secara umum terdiri dari dua jenis, yakni distribusi bahan baku dari pemasok dan distribusi produk jadi ke konsumen.

1. Transportasi bahan baku

Bahan baku yang digunakan dalam produksi kemasan PS adalah biji plastik PS berukuran antara 0.5-1.5 mm yang diproduksi oleh PT. Kofuku Plastic Indonesia. Biji plastik tersebut dikirimkan dari Babelan, Jawa Barat menuju Pasuruan, Jawa Timur dengan menggunakan jalur darat dengan truk Tronton berkapasitas 25 ton. Aktivitas pengiriman bahan baku ini pada umumnya dilakukan 4 kali dalam kurun waktu 1 bulan

dengan jumlah dalam satu kali kedatangan sejumlah 50 karung atau setara dengan 25 ton.

2. Transportasi produk jadi

Kemasan PS *foam* dalam kemasan plastik didistribusikan ke *wholesaler* yang berada di Surabaya. Alat transportasi yang digunakan untuk melakukan pengiriman ke daerah tersebut adalah truk Tronton bervolume 10 m³ atau berkapasitas sekitar 20 ton. Dalam satu bulan, rata-rata jumlah produk yang dikirimkan ke daerah tersebut adalah 3000 unit.

4.1.3 Siklus Akhir Hidup

Kemasan PS *foam* yang sampai pada pelanggan akhir pada umumnya digunakan dalam satu kali pemakaian kemudian dibuang ke tempat pembuangan sampah setempat. Masih belum ada penanganan limbah plastik, terkhususnya jenis PS *foam*, yang dilakukan sehingga masyarakat awam membiarkan atau bahkan melakukan pembakaran terhadap limbah tersebut. Sementara itu, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Fitidarini (2011) terkait penanganan limbah *polystyrene* pada industri dan rumah tangga di Kota Bandung, ditemukan bahwa 76,76% limbah PS dibuang, 20,42% dibakar, dan sisanya diberikan kepada pemulung untuk didaur ulang. Data ini kemudian digunakan sebagai acuan gambaran umum dalam penentuan skenario penanganan limbah pada penelitian ini.

4.2 Tujuan dan Ruang Lingkup LCA

Tujuan dari dilakukannya pendekatan *life cycle assessment* pada penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi potensi dampak lingkungan dari siklus hidup produk kemasan PS *foam* dan yang mana di antaranya memiliki pengaruh terbesar sehingga dapat diberikan alternatif perbaikan untuk mengurangi dampak tersebut. Tujuan lainnya adalah untuk membandingkan jenis penanganan limbah *polystyrene* dan memberikan rekomendasi terkait hasilnya. Khalayak yang dituju dari penelitian ini adalah pemerintah selaku pembuat kebijakan, pelaku bisnis selaku pengambil keputusan di bidang produksi PS *foam*, dan masyarakat selaku pengguna produk kemasan PS *foam*.

Sistem produk yang diteliti dimulai dari proses ekstraksi bahan baku, pengadaan bahan baku (pengiriman), proses produksi hingga distribusi produk jadi ke konsumen, dan proses penanganan limbah pada akhir siklus hidup produk kemasan PS *foam*. Dengan demikian, varian LCA yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisis *cradle-to-grave*. Siklus hidup diamati dari produk boks makanan PS *foam* berukuran 19×19×8 cm dengan berat 25 gram

karena produk ini merupakan yang paling umum dan paling banyak diproduksi. Unit fungsional yang digunakan adalah 267,75 kg boks makanan PS *foam* per hari (waktu kerja adalah 8 jam dalam 6 hari setiap minggu) karena dalam satu bulan total produk yang mampu diproduksi adalah sebanyak 6,4 ton. Sistem yang diteliti hanya sebatas pada proses yang telah disebutkan sebelumnya tanpa memerhatikan operasi tambahan seperti pencahayaan, *air conditioning*, perawatan mesin.

4.3 Life Cycle Inventory

Pada tahap *life cycle inventory* (LCI) ini, dilakukan pengumpulan data dan pemodelan sistem dari produk. Keduanya harus dilakukan sesuai dengan tujuan yang didefinisikan pada tahap sebelumnya. Hasil dari LCI kemudian dijadikan sebagai masukan untuk tahap berikutnya, yakni *life cycle impact assessment* (LCIA). Hasil dari LCI juga dapat memberikan umpan balik untuk fase pertama yang mana sering memerlukan penyesuaian.

Data berupa *input*, *output*, dan proses dimasukkan pada perangkat lunak SimaPro dan disesuaikan dengan basis data pada SimaPro agar dapat mendekati kondisi sebenarnya. Selain itu, data berupa penggunaan energi juga dimasukkan dan kemudian diolah untuk penilaian dampak lingkungan. Berikut merupakan data bahan baku dan energi yang dibutuhkan pada setiap proses untuk memproduksi 267,75 kg kemasan boks PS *foam*.

4.3.1 Proses Ekstraksi Butiran Plastik

Pada proses ini, bahan baku yang dianalisis adalah bahan baku biji plastik *polystyrene*. Perusahaan PS *foam* tidak memproduksi biji plastik sendiri dan selalu melakukan kegiatan pemasokan bahan baku tersebut dari pihak eksternal. Oleh sebab itu, data untuk proses ekstraksi butiran plastik dari minyak mentah diambil dari basis data Ecoinvent 3 pada perangkat lunak SimaPro 8.2.

Menurut data pada SimaPro 8.2, untuk membuat 1 kg resin *polystyrene* dibutuhkan 1,0425 kg minyak mentah ditambah bahan lainnya dan limbah plastik akibat proses adalah sekitar 0,00189 kg. Sementara untuk membuat 267,75 kg boks PS *foam* dibutuhkan 385 kg resin *polystyrene* yang mana resin tersebut akan mengalami penyusutan massa pada saat proses produksi.

Kebutuhan minyak mentah: $385 \text{ kg} \times 1,0425 \text{ kg/1 kg} = 401 \text{ kg}$

Perhitungan data lainnya dapat dilihat pada Gambar 4.6.

Products									
Known outputs to technosphere. Products and co-products									
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Waste type	Category	Comment		
Polystyrene beads	Beads = 385	kg	Mass	100 %	PS	Plastics(Th...Transformation			
(Insert line here)									
Known outputs to technosphere. Avoided products									
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^SDMin	Max	Comment			
(Insert line here)									
Inputs									
Known inputs from nature (resources)									
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^SDMin	Max	Comment		
Peat	biotic	0,000852338551501171	Beads = 0,328	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Sulfur	in ground	0,000197739344929547	Beads = 0,0761	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Wood, unspecified, standing/m3	biotic	(8,2695633730622E-8)	Beads = 3,18E-5	m3			Uncertainty for LCI results cannot be		
Iron	in ground	0,00034731346418313	Beads = 0,134	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore	in ground	0,000189002025037311	Beads = 0,0728	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Water, cooling, unspecified natural origin, RoW	in water	0,165039375401511	Beads = 63,5	m3			(5,5,5,5,5,na)		
Dolomite	in ground	4,26359217487373E-6	Beads = 0,00164	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Sodium nitrate	in ground	7,34694637894957E-10	Beads = 2,83E-7	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Magnesite	in ground	2,44894880320481E-10	Beads = 9,43E-8	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Potassium chloride	in ground	6,42203009012846E-6	Beads = 0,00247	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Water, river, RoW	in water	0,00066786513734622	Beads = 0,257	m3			(5,5,5,5,5,na)		
Clay, unspecified	in ground	1,15344618897731E-7	Beads = 4,4E-5	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Uranium	in ground	6,53829442690958E-8	Beads = 0,00252	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Granite	in ground	4,9377853711350E-13	Beads = 1,9E-10	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Calcite	in ground	0,000387791047985948	Beads = 0,149	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Barite	in ground	1,29060411680508E-6	Beads = 0,000497	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Water, well, in ground, RoW	in water	2,78394604529728E-10	Beads = 1,07E-7	m3			(5,5,5,5,5,na)		
Anhydrite	in ground	8,42011719180027E-6	Beads = 0,00324	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Manganese	in ground	4,48112544816326E-6	Beads = 0,000173	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Clay, bentonite	in ground	8,2852855868098E-5	Beads = 0,0319	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Shale	in ground	2,38376879668607E-5	Beads = 0,00918	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Gravel	in ground	1,281306968636E-6	Beads = 0,000493	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Water, unspecified natural origin, RoW	in water	0,0047268500739655	Beads = 1,82	m3			(5,5,5,5,5,na)		
Sodium chloride	in ground	0,00226950384660797	Beads = 0,874	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Coal, hard	in ground	0,146255137326556	Beads = 56,3	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Chromium	in ground	2,33348421110489E-6	Beads = 8,98E-6	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Coal, brown	in ground	3,08875254817402E-5	Beads = 0,119	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Olivine	in ground	3,25850047926116E-6	Beads = 0,00125	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Fluorspar	in ground	1,49494143785462E-5	Beads = 0,00526	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Sand	in ground	0,000563917022655754	Beads = 0,217	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		
Gas, natural/m3	in ground	0,907371670502038	Beads = 349	m3			Uncertainty for LCI results cannot be		
Aluminium	in ground	0,000175056302783685	Beads = 0,0674	kg			Uncertainty for LCI results cannot be		

Gambar 4.6 Ekstraksi resin polystyrene

4.3.2 Transportasi Resin Polystyrene

Bahan baku berupa biji plastik *polystyrene* didapat dari satu pemasok, yakni PT. Kofuku Plastic Indonesia. Kegiatan pemasokan resin *polystyrene* dilakukan dari Babelan, Jawa Barat, dengan menggunakan truk berkapasitas 25 ton (atau sekitar 40 m³) berukuran 7,5 × 2,4 × 2,1 m yang diantar melalui jalur darat menuju perusahaan PS *foam* di Pasuruan, Jawa Timur. Sedangkan jarak antar keduanya adalah 807 km berdasarkan data jarak yang didapatkan dari Google maps. Satuan unit yang dipakai untuk penilaian dampak transportasi pada SimaPro 8.2 adalah ton kilometer sehingga satuan jarak dan beban angkut harus dikalikan agar dapat dikonversi menjadi ton-kilometer (tkm). Sehingga dapat dihitung data *input* untuk SimaPro sebagai berikut.

$$\text{Kapasitas transportasi} = \text{daya angkut} \times \text{jarak}$$

$$\text{Kapasitas transportasi} = 25 \text{ ton} \times 807 \text{ km} = 20.175 \text{ tkm}$$

$$\text{Transportasi resin} = \frac{\text{jumlah angkut}}{\text{daya angkut}} \times \text{kapasitas tkm}$$

$$\text{Transportasi resin} = \frac{385 \text{ kg}}{25000 \text{ kg}} \times 20.175 \text{ tkm} = 310,695 \text{ tkm}$$

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.7. Mode transportasi yang digunakan adalah truk, untuk menyesuaikan dengan basis data SimaPro 8.2, maka dipilih mode truk *lorry* berkapasitas antara 16-32 ton.

Products							
Known outputs to technosphere. Products and co-products							
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Category	Comment	
Transport polystyrene beads	beads = 385	kg	Mass	100 %	Road/Market		
(Insert line here)							
Known outputs to technosphere. Avoided products							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Inputs							
Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (materials/fuels)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SDMin	Max	Comment	
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 (GLD) market for Alloc Def, U	310,695	tkm	Undefined				
(Insert line here)							

Gambar 4.7 Transportasi bahan baku

4.3.3 Proses Produksi

Untuk memproduksi *polystyrene foam*, bahan baku diproses melalui sejumlah proses terlebih dahulu. Berikut ini merupakan perhitungan masukan dan keluaran dari setiap proses.

1. *Extrusion*

Pada proses ini, biji plastik *polystyrene* dibawa dari gudang penyimpanan menuju lokasi produksi, kemudian dibuka dan langsung dimasukkan ke dalam mesin *extruder* secara perlahan. Mesin ini membutuhkan energi sebesar 120 kWh. Dibutuhkan jumlah biji plastik 10% lebih banyak (atau setara dengan 110% dikali massa *foam* yang hendak dihasilkan) untuk memproduksi sejumlah *foam*, sehingga untuk memproduksi 350 kg *foam* dibutuhkan 385 kg biji plastik. Mesin *extruder* menyalurkan energi panas langsung ke PS *beads* hingga meleleh dan berubah menjadi *foam*. *Foam* akan keluar dari mesin *extruder* melalui cetakan (yang disebut *shaping die*) yang membuatnya berbentuk lembaran. Saat keluar, proses pendinginan (*cooling*) langsung dilakukan dengan bantuan media angin dan air. Air yang disemprotkan melalui dua *spray nozzle* berdiameter 0,15 mm dan kecepatan sekitar 1,38 LPH (*litre per hour*) sehingga jumlah air yang dikeluarkan untuk proses *cooling* ini kurang lebih 22,08 liter.

a. *Input*

$$\text{Massa polystyrene beads} = \text{massa foam} \times 110\%$$

$$\text{Massa polystyrene beads} = 350 \text{ kg} \times 110\% = 385 \text{ kg}$$

$$\text{Air} = 2 \times 1,38 \text{ LPH} \times 8 \text{ jam} = 22,08 \text{ liter}$$

$$\text{Bahan aditif} = 1\% \text{ dioktil ftalat} \times \text{massa foam}$$

$$\text{Bahan aditif} = 1\% \times 350 \text{ kg} = 3,5 \text{ kg}$$

$$\text{Listrik} = 120 \text{ kW} \times 8 \text{ jam} = 960 \text{ kWh}$$

b. *Output*

$$\text{Polystyrene foam sheet} = 350 \text{ kg}$$

Tabel 4.2

Data Proses *Extrusion*

Kategori	Material	Nama pada SimaPro	Jumlah
Masukan	Biji plastik <i>polystyrene</i>	<i>Polystyrene beads</i>	385 kg
	Air	<i>Water</i>	22,08 liter
	<i>Plasticizer</i>	<i>Diocetyl Phthalate (DEHP)</i>	3,5 kg
	Energi listrik	<i>Electricity</i>	960 kWh
Keluaran	Lembaran <i>polystyrene</i>	<i>Polystyrene foam sheet</i>	350 kg
	Air	<i>Water</i>	22,08 liter
	Emisi dan panas	<i>Emission</i>	sisanya

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.8.

Gambar 4.8 Proses *extrusion*

2. *Forming*

Proses pembentukan (*forming*) disebut juga proses pencetakan dengan bantuan mesin *forming*. Mesin ini membutuhkan daya sebesar 100 kWh saat digunakan. Mesin ini bekerja dengan cara menarik lembaran PS *foam* dengan bantuan *roller*. Ketika lembaran berukuran 80×70 cm berada di dalam mesin, *molding die* akan bergerak dan mencetak lembaran menjadi bentuk boks makanan. Lembaran yang sudah dicetak kemudian ditarik oleh *roller* menuju proses berikutnya.

a. *Input*

$$\text{Massa lembaran PS foam} = 350 \text{ kg}$$

$$\text{Listrik} = 100 \text{ kW} \times 8 \text{ jam} = 800 \text{ kWh}$$

b. *Output*

$$\text{Box formed polystyrene} = 350 \text{ kg}$$

Tabel 4.3

Data Proses *Forming*

Kategori	Material	Nama pada SimaPro	Jumlah
Masukan	Lembaran <i>polystyrene</i>	<i>Polystyrene beads</i>	350 kg
	Energi listrik	<i>Electricity</i>	800 kWh
Keluaran	Lembaran <i>polystyrene</i> berbentuk boks	<i>Box formed polystyrene</i>	350 kg
	Emisi dan panas	<i>Emission</i>	sisanya

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.9.

Products							
Known outputs to technosphere. Products and co-products							
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Category	Comment	
PS Forming	350	kg	Mass	100 %	Plastics/Transformation		
(Insert line here)							
Known outputs to technosphere. Avoided products							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Inputs							
Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (materials/fuels)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (electricity/heat)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Electricity, medium voltage (ID) market for Alloc Def, U	800	kWh	Undefined				
(Insert line here)							

Gambar 4.9 Proses forming

3. Cutting

Mesin *cutting* bekerja dengan cara yang mirip dengan mesin sebelumnya di mana lembaran PS *foam* yang sudah berbentuk boks ditarik ke dalam mesin dan kemudian dipotong sekaligus sejumlah 12 boks dengan masing-masing boks berukuran 19×19 cm. Mesin yang digunakan pada proses ini memerlukan energi sebesar 68 kWh. Boks PS *foam* yang terpotong akan langsung terlepas dari lembaran dan menumpuk, sementara lembaran PS *foam* sisa potongan akan ditarik keluar dari mesin *cutting*. Berdasarkan perhitungan luasannya, rasio perbandingan antara lembaran yang terpotong dan tersisa adalah 13:4 sehingga dapat dihitung massanya.

a. Input

Lembaran PS *foam* = 350 kg

Listrik = 68 kW × 8 jam = 544 kWh

b. Output

Boks *polystyrene* = $\frac{13}{17} \times 350 = 267,75$ kg

c. Waste

Sisa lembaran PS *foam* = $\frac{4}{17} \times 350 = 82,25$ kg

Tabel 4.4

Data Proses *Cutting*

Kategori	Material	Nama pada SimaPro	Jumlah
Masukan	Lembar <i>polystyrene</i> berbentuk boks	<i>Polystyrene foam box</i>	350 kg
	Energi listrik	<i>Electricity</i>	544 kWh
Keluaran	Boks <i>polystyrene</i>	<i>Box formed polystyrene</i>	267,75 kg
	Emisi dan panas	<i>Emission</i>	sisanya
Waste	Lembaran PS <i>foam</i> tersisa	<i>Polystyrene foam sheet</i>	82,25 kg

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.10.

Products							
Known outputs to technosphere. Products and co-products							
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Category	Comment	
PS Cutting (Insert line here)	267,75	kg	Mass	100 %	Plastics(Transformation)		
Known outputs to technosphere. Avoided products							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Inputs							
Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (materials/fuels)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (electricity/heat)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Electricity, medium voltage (ID) market for Alloc Def, U (Insert line here)	544	kWh	Undefined				
Outputs							
Emissions to air							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Emissions to water							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Emissions to soil							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Final waste flows							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
Polystyrene waste (Insert line here)		82,25	kg	Undefined			

Gambar 4.10 Proses cutting

4. Packaging

Tumpukan boks PS *foam* dari proses sebelumnya disusun menjadi 1 pak berisi 100 dan dimasukkan ke dalam kemasan plastik bening berbahan LDPE (*low density polyethylene*). Proses ini dilakukan secara manual oleh pekerja.

a. Input

$$\text{Kemasan plastik LDPE} = \frac{267,75}{2,5} \times 0,02 = 2,142 \text{ kg}$$

b. Output

$$\text{Boks PS } foam \text{ dalam pak} = 267,75 + 2,142 = 270 \text{ kg}$$

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.11.

Input/output		Parameters					
Name	Image	Comment					
Packaging							
Status	None						
Materials/Assemblies							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Packaging film, low density polyethylene (GLO) market for (Insert line here)	2,142	kg	Undefined				
Processes							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							

Gambar 4.11 Proses packaging

4.3.4 Distribusi Produk

Produk boks PS *foam* yang telah jadi disimpan untuk selanjutnya didistribusikan ke *wholesaler* yang berada di Surabaya. Jarak dari pabrik yang berlokasi di Pasuruan, Jawa Timur ke lokasi *wholesaler* Surabaya, Jawa Timur adalah 43,6 km berdasarkan data jarak

dari internet. Truk yang digunakan untuk distribusi adalah truk engkel dengan kapasitas sekitar 2 ton hingga 3,5 ton.

$$\text{Distribusi produk} = 2 \text{ ton} \times 43,6 \text{ km} = 87,2 \text{ tkm}$$

$$\text{Distribusi produk} = \frac{270 \text{ kg}}{2000 \text{ kg}} \times 87,2 \text{ tkm} = 11,772 \text{ tkm}$$

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.12. Mode transportasi yang digunakan adalah truk, untuk menyesuaikan dengan basis data SimaPro 8.2, maka dipilih mode truk *lorry* berkapasitas antara 3,5-7,5 ton.

Products							
Known outputs to technosphere. Products and co-products							
Name	Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Category	Comment	
Transport polystyrene box (Insert line here)	270	kg	Mass	100 %	Road/Market		
Known outputs to technosphere. Avoided products							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Inputs							
Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (materials/fuels)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EUROS (GLO) market for Alloc Def,	11,772	tkm	Undefined				
(Insert line here)							

Gambar 4.12 Distribusi produk

4.3.5 Disposal dan End-life Treatment

Sebelum tahap *disposal*, terdapat tahap *use* atau penggunaan produk, namun dikarenakan produk boks PS *foam* merupakan jenis produk yang dipakai hanya sekali sehingga tahap penggunaannya dapat dilewati pada tahap *life cycle impact assessment*.

Berdasarkan data yang didapat, pada tahap *disposal*, 76,76% sampah boks PS *foam* berakhir di tempat pembuangan sampah (TPS) tanpa perlakuan tertentu, sehingga dipilih jenis *disposal landfill*, sementara 20,42% sampah boks PS *foam* dibakar dan 2,82% sisanya didaur ulang. Ketiga jenis *waste treatment* ini kemudian didefinisikan secara terpisah pada *waste scenario*.

1. Skenario pembuangan sampah

Sampah PS *foam* memerlukan waktu antara 500 hingga 1 juta tahun untuk mengalami degradasi. Oleh sebab itu, sampah ini tidak berubah menjadi senyawa jenis apa pun saat berada di tempat pembuangan. Namun, sampah ini dapat terpecah menjadi butiran-butiran monomer berukuran kecil dan masuk ke dalam ekosistem perairan maupun daratan dan kemudian ikut masuk ke dalam tubuh biota secara tidak disengaja. Untuk memindahkan sampah PS *foam* dari konsumen menuju tempat pembuangan sampah, digunakan truk sampah (*dump truck*) berkapasitas 8,25 ton. Jarak antara konsumen yang berada di Surabaya ke tempat pembuangan akhir di Benowo, Surabaya adalah 13 km.

a. *Waste*

$$\text{Landfill PS foam} = 267,75 \text{ kg} \times 76,76\% = 205,52 \text{ kg}$$

b. *Input*

$$\text{Transportasi ke TPA} = 8,25 \text{ ton} \times 13 \text{ km} = 107,25 \text{ tkm}$$

$$\text{Transportasi ke TPA} = \frac{205,52 \text{ kg}}{8250 \text{ kg}} \times 107,25 \text{ tkm} = 2,671 \text{ tkm}$$

c. *Emission*

Diasumsikan monomer *styrene* yang menuju ke ekosistem perairan maupun daratan memiliki jumlah setara, yakni masing-masing 50%.

$$\text{Limbah PS foam} = 205,52 \text{ kg} \times 0.5 = 102,76 \text{ kg}$$

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.13. Mode transportasi yang digunakan adalah truk, untuk menyesuaikan dengan basis data SimaPro 8.2, maka dipilih mode truk *lorry* berkapasitas antara 7,5-16 ton.

Products							
Waste specification							
Name	Default material / waste type	Amount	Unit	Quantity	Category	Comment	
Landfill by PS foam	Polystyrene scrap, post-consumer (RoW)	205,52	kg	Mass	Inert material landfill		
Known outputs to technosphere. Avoided products							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SD Min	Max	Comment	
(Insert line here)							
Inputs							
Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SD Min	Max	Comment
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (materials/fuels)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SD Min	Max	Comment	
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5 (GLO) m	2,671	tkm	Undefined				
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (electricity/heat)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SD Min	Max	Comment	
(Insert line here)							
Outputs							
Emissions to air							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SD Min	Max	Comment
(Insert line here)							
Emissions to water							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SD Min	Max	Comment
Styrene		102,76	kg	Undefined			
(Insert line here)							
Emissions to soil							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2^*SD Min	Max	Comment
Styrene	Urban, non industrial	102,76	kg	Undefined			
(Insert line here)							

Gambar 4.13 Landfill

2. Skenario insinerasi

Berdasarkan penelitian oleh Hawley-Fedder, *polystyrene* akan menghasilkan gabungan kompleks dari hidrokarbon aromatik polisiklis (PAH) mulai dari alkil benzena, karbon monoksida, hingga benzo[ghi]perylene apabila dibakar pada suhu di bawah 900 derajat Celcius. Karena pada kasus ini, pembakaran sampah dilakukan oleh masyarakat awam tanpa menggunakan *incinerator* yang seharusnya sehingga menghasilkan senyawa-senyawa tersebut.

a. *Waste*

$$\text{Incinerated PS foam} = 267,75 \text{ kg} \times 20,42\% = 54,68 \text{ kg}$$

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.14. Data emisi didapat dari referensi dan basis data SimaPro.

Products							
Waste specification							
Name	Default material / waste type	Amount	Unit	Quantity	Category	Comment	
PS Incineration	Polystyrene scrap, post-consumer (RoW)	54,68	kg	Mass	Transformation		
Emissions to air							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
Indene	high. pop.	615	g	Undefined			
Naphtalene	high. pop.	679	g	Undefined			
Carbon monoxide	high. pop.	1,2	kg	Undefined			
Carbon dioxide	high. pop.	50	g	Undefined			
(Insert line here)							
Emissions to soil							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
Benzene	urban, non industrial	414	g	Undefined			
Toluene	urban, non industrial	0,488	kg	Undefined			
Styrene	urban, non industrial	27,34	kg	Undefined			
Benzaldehyde	urban, non industrial	562	g	Undefined			
Phenol	urban, non industrial	0,499	kg	Undefined			
Acetophenone	urban, non industrial	637	g	Undefined			
1-Methylnaphtalene	urban, non industrial	0,753	kg	Undefined			
Biphenyl	urban, non industrial	0,817	kg	Undefined			
(Insert line here)							

Gambar 4.14 Incineration

3. Skenario daur ulang

Sebelumnya terdapat produk sampingan dari proses *cutting* berupa *polystyrene sheet*. Lembaran *polystyrene* tersisa tersebut dapat didaur ulang secara langsung karena termasuk dalam kategori *virgin polystyrene* dengan bantuan mesin *recycler* (mengacu pada Tabel 4.1).

a. Waste

$$\text{Recycled PS foam} = 267,75 \text{ kg} \times 2,82\% = 7,54 \text{ kg}$$

$$\text{Virgin PS foam} = 82,25 \text{ kg}$$

$$\text{Total waste} = 82,25 \text{ kg} + 7,54 \text{ kg} = 89,79 \text{ kg}$$

b. Input

$$\text{Listrik} = 57,2 \text{ kW} \times 1 \text{ jam} = 57,2 \text{ kWh}$$

1 jam karena mengacu pada Tabel 4.1, kapasitas mesin *recycler* adalah sekitar 90 kg/jam.

Nilai tersebut kemudian dimasukkan pada SimaPro 8.2 seperti terlihat pada Gambar 4.15.

Products							
Waste specification							
Name	Default material / waste type	Amount	Unit	Quantity	Category	Comment	
Polystyrene recycle	Polystyrene scrap, post-consumer (RoW)	(82,25+7,54) = 89,8	kg	Mass	Transformation		
Known outputs to technosphere. Avoided products							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Inputs							
Known inputs from nature (resources)							
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (materials/fuels)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
(Insert line here)							
Known inputs from technosphere (electricity/heat)							
Name	Amount	Unit	Distribution	SD^2 or 2*SDMin	Max	Comment	
Electricity, medium voltage (ID) market for Alloc Def, U	57,2*1 = 57,2	kWh					
(Insert line here)							

Gambar 4.15 Recycle

4.3.6 Gabungan Proses

Pada SimaPro 8.2, seluruh material dan proses yang telah didefinisikan sebelumnya harus digabungkan menjadi satu kesatuan siklus hidup produk untuk menghubungkannya.

Gambar 4.16 menunjukkan keseluruhan proses dalam siklus hidup produk boks PS *foam*. Seluruh proses tersebut kemudian dapat dibuat jaringan dan dibandingkan antara satu dengan yang lainnya.

Name	Image	Comment				
PS Foam Box						
Status	None					
Materials/Assemblies	Amount	Unit	Distribution	SD [^] 2 or 2*SDMin	Max	Comment
Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for I	2,142	kg	Undefined			
Polystyrene beads	385	kg	Undefined			
(Insert line here)						
Processes	Amount	Unit	Distribution	SD [^] 2 or 2*SDMin	Max	Comment
PS Extrusion	350	kg	Undefined			
PS Forming	350	kg	Undefined			
PS Cutting	267,75	kg	Undefined			
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {GLO} mar	310,695	tkm	Undefined			
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 {GLO} m	11,772	tkm	Undefined			
(Insert line here)						

Gambar 4.16 Gabungan proses

4.4 Life Cycle Impact Assessment

Life Cycle Impact Assessment atau penilaian dampak siklus hidup produk merupakan fase ketiga dari LCA yang bertujuan mengaitkan material dan proses dengan dampak lingkungan yang sesuai. LCIA menerjemahkan emisi dan ekstraksi sumber daya ke dalam beberapa kategori dampak lingkungan dengan mengacu pada faktor karakterisasi dampak tersebut. Proses memasukkan data untuk kalkulasi dampak ditunjukkan pada Gambar 4.16.

Untuk melakukan kalkulasi nilai dampak, metode yang digunakan pada penelitian ini disebut *ReCiPe Endpoint (Hierarchist) V1.12*. *ReCiPe* adalah penerus dari metode *Eco-indikator 99* dan *CML-IA*. Metode ini awalnya dikembangkan untuk mengintegrasikan 'pendekatan berorientasi masalah' dari *CML-IA* dan 'pendekatan berorientasi kerusakan' *Eco-indikator 99* (PRé, 2016). 'Pendekatan berorientasi masalah' mendefinisikan kategori dampak pada tingkat titik tengah (*midpoint*). Ketidakpastian hasil pada titik ini relatif rendah. Kelemahan dari solusi ini adalah bahwa hal itu mengarah pada berbagai kategori dampak yang berbeda yang kemudian membuat kesimpulan menjadi cukup kompleks. Pendekatan berorientasi kerusakan *Eco-indikator 99* menghasilkan hanya tiga kategori dampak yang membuat interpretasi hasil menjadi lebih mudah. Namun, ketidakpastian dalam hasilnya lebih tinggi. *ReCiPe* mengimplementasikan kedua strategi dan memiliki titik tengah (berorientasi masalah) dan titik akhir (kerusakan berorientasi) kategori dampak. Faktor karakterisasi titik tengah dikalikan dengan faktor kerusakan, untuk mendapatkan nilai karakterisasi titik akhir. Metode ini menggunakan horizon waktu 100 tahun untuk kalkulasi potensi dampak. *ReCiPe* memiliki 18 indikator *midpoint* seperti yang tertera pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5
Kategori Dampak Metode ReCiPe *Midpoint*

No.	Kategori Dampak	Penjelasan
1.	<i>Ozone depletion</i>	Faktor karakterisasi untuk penipisan lapisan ozon menyumbang kerusakan lapisan ozon stratosfer oleh emisi antropogenik dari bahan perusak lapisan ozon (ODS). Unit ini setara dengan yr / kg CFC-11.
2.	<i>Human toxicity</i>	Faktor karakterisasi toksisitas manusia dan ekotoksitas menerangkan persistensi lingkungan dan akumulasi dalam rantai makanan manusia (paparan), dan toksisitas (efek) dari bahan kimia. Unitnya adalah yr / kg 1,4-dichlorobenzene (14DCB).
3.	<i>Ionizing radiation</i>	Faktor karakterisasi radiasi pengion menerangkan tingkat paparan. Unit ini setara dengan yr / kg Uranium 235.
4.	<i>Photochemical oxidant formation</i>	Faktor karakterisasi pembentukan oksidan fotokimia didefinisikan sebagai perubahan marginal dalam rata-rata 24 jam konsentrasi ozon (dCO_3 dalam $kg \cdot m^{-3}$) karena perubahan marginal dalam emisi zat x (dMx dalam $kg \cdot tahun^{-1}$). Unitnya adalah yr / kg NMVOC.
5.	<i>Particulate matter formation</i>	Faktor karakterisasi pembentukan partikel berdasarkan fraksi asupan PM_{10} . Unit ini setara dengan yr / kg PM_{10} .
6.	<i>Terrestrial acidification</i>	Asidifikasi terestrial ditandai dengan perubahan sifat kimia tanah setelah pengendapan nutrisi (yaitu, nitrogen dan sulfur) dalam bentuk pengasaman.
7.	<i>Climate change</i>	Faktor karakterisasi perubahan iklim berdasarkan potensi pemanasan global. Unit ini setara dengan yr / kg CO_2 .
8.	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	Indikator kategori ini mengacu pada dampak pada ekosistem darat, sebagai akibat dari emisi zat beracun ke udara, air dan tanah. Karakterisasi faktor dinyatakan sebagai 1,4-dichlorobenzene ekuivalen / emisi kg. Indikator berlaku pada skala global / benua / regional dan lokal.
9.	<i>Agricultural land occupation</i>	Jumlah lahan pertanian yang dipakai untuk waktu tertentu. Unitnya adalah $m^2 \cdot tahun$.
10.	<i>Urban land occupation</i>	Jumlah lahan pertanian yang dipakai untuk waktu tertentu. Unitnya adalah $m^2 \cdot tahun$.
11.	<i>Natural land transformation</i>	Jumlah tanah yang diubah dan diduduki untuk waktu tertentu. Unitnya adalah $m^2 \cdot tahun$.
12.	<i>Marine ecotoxicity</i>	Indikator kategori ini mengacu pada dampak pada ekosistem air laut, sebagai akibat dari emisi zat beracun ke udara, air dan tanah. Karakterisasi faktor dinyatakan sebagai 1,4-dichlorobenzene ekuivalen / emisi kg. Indikator berlaku pada skala global / benua / regional dan lokal.
13.	<i>Marine eutrophication</i>	Faktor karakterisasi eutrofikasi laut menerangkan persistensi lingkungan terhadap emisi N yang mengandung nutrisi. Satuannya adalah yr / kg N untuk ekuivalen air tawar.
14.	<i>Fresh water eutrophication</i>	Faktor karakterisasi eutrofikasi air tawar menerangkan persistensi lingkungan terhadap emisi P yang mengandung nutrisi. Unit ini adalah yr / kg P untuk ekuivalen air tawar.
15.	<i>Fresh water ecotoxicity</i>	Indikator kategori ini mengacu pada dampak pada ekosistem air tawar, sebagai akibat dari emisi zat beracun ke udara, air dan tanah. Karakterisasi faktor dinyatakan sebagai 1,4-dichlorobenzene ekuivalen / emisi kg. Indikator berlaku pada skala global / benua / regional dan lokal.
16.	<i>Fossil fuel depletion</i>	Faktor karakterisasi penipisan fosil mengacu pada jumlah ekstraksi bahan bakar fosil berdasarkan nilai kalor yang lebih rendah. Unit ini setara minyak dalam kg (1 kg minyak memiliki nilai kalor 42 MJ).
17.	<i>Minerals depletion</i>	Faktor karakterisasi penipisan mineral mengacu pada penurunan <i>grade</i> . Unit ini setara dengan kg besi (Fe).
18.	<i>Fresh water depletion</i>	Faktor penipisan air tawar mengacu pada jumlah konsumsi air tawar. Unitnya m^3 .

Sumber: PRé (2016)

Pada penelitian ini, terdapat empat penyajian hasil *impact assessment* yang digunakan, yakni *characterization* (karakterisasi), *normalization* (normalisasi), *weighting* (pembobotan), dan *single score* (skor tunggal). Karakterisasi merupakan penilaian besarnya

substansi yang berkontribusi pada kategori dampak tertentu. Nilai-nilai dampak yang didapatkan pada tahap karakterisasi kemudian disederhanakan dengan melakukan normalisasi dan pembobotan. Normalisasi menunjukkan sejauh mana hasil indikator kategori dampak memiliki nilai yang relatif tinggi atau relatif rendah dibandingkan dengan suatu nilai referensi. Sedangkan pembobotan memberikan nilai tertentu pada kategori dampak dan angka yang dihasilkan digunakan untuk menghasilkan skor tunggal. Pembobotan menggunakan nilai dari hasil normalisasi sehingga hasil akhirnya memberikan gambaran yang sesuai dengan tingkat kepentingan dari dampak tersebut. Sementara itu, skor tunggal dihasilkan dari nilai pembobotan dan digunakan untuk membandingkan jenis kontribusi dampak pada suatu proses tertentu.

General | Analysis groups | Chart options |

Name
PS foam box

Comment

Calculation function
 Network
 Tree
 Analyze
 Compare

Method
ReCIPE Endpoint (H) V1.12 / Europe ReCIPE H/A

Product	Amount	Unit	Project	Comment
Foam box	1	p	EPS	

Switches
 Exclude infrastructure processes
 Exclude long-term emissions

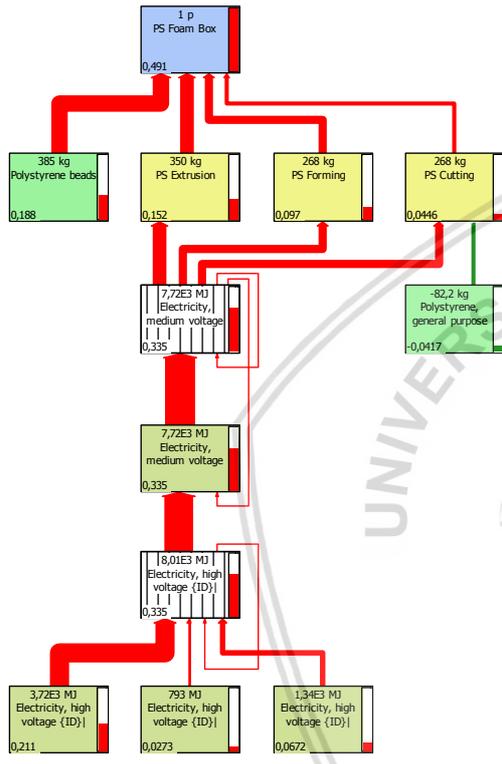
Gambar 4.17 Kalkulasi LCIA

4.4.1 Network

SimaPro dapat memvisualisasikan data dengan dua cara, yakni dengan struktur pohon (*tree structure*) dan struktur jaringan (*network*). Yang ditampilkan pada penelitian ini adalah struktur jaringan karena *tree structure* tidak dapat digunakan jika terdapat *looping* data. Selain itu, *network* menyajikan data dari aliran material, energi, dan proses secara keseluruhan. Gambar 4.17 menampilkan struktur jaringan dari hasil kalkulasi dampak yang mencakup proses-proses yang diamati. Sementara *network* dari setiap proses secara terpisah dapat dilihat pada Lampiran 1.

Berdasarkan struktur jaringan pada Gambar 4.18, dapat dilihat bahwa dampak yang dihasilkan oleh 350 kg produk boks PS *foam* bernilai sebesar 0,491 pt. Gambar tersebut juga menunjukkan panah berwarna merah dan hijau di mana panah ke atas berwarna merah merepresentasikan aliran energi dan material sementara anak panah hijau menunjukkan keluaran dari proses terkait yang berupa produk sampingan atau *waste*. Selain itu, panah-panah tersebut memiliki ketebalan yang berbeda-beda yang menunjukkan kontribusi terhadap dampak dalam siklus hidup produk. Dapat dilihat bahwa proses dengan dampak

terbesar dimiliki oleh proses ekstraksi butiran *polystyrene* dengan nilai sebesar 0,188 pt dan diikuti oleh proses ekstrusi dengan nilai dampak 0,152 pt. Proses ekstraksi memberikan dampak yang besar karena berpotensi menimbulkan *waste* yang berbahaya dan hal ini dibahas secara lebih lengkap pada bagian tersendiri. Di lain pihak, proses ekstrusi memiliki nilai dampak yang besar akibat penggunaan listrik. Beberapa proses tidak tertera pada *network* tersebut karena memiliki nilai dampak yang lebih kecil dibandingkan dengan proses yang tertera.



Gambar 4.18 Network

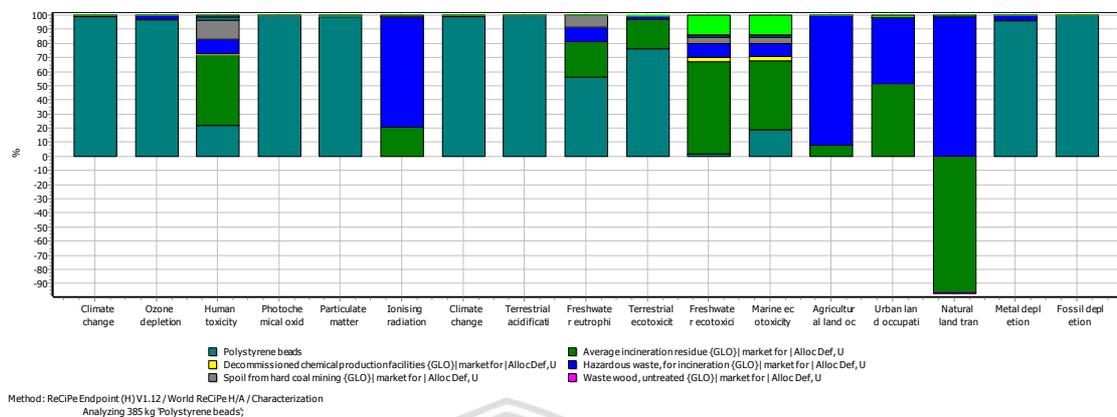
4.4.2 Penilaian Dampak

Setelah menampilkan *network*, dilakukan kalkulasi nilai dampak secara lengkap dan terpisah antar proses berdasarkan metode *life cycle impact assessment* (LCIA) ReCiPe *Endpoint (Hierarchist)* V1.12. Berikut ini adalah hasil karakterisasi, normalisasi, pembobotan, dan skor tunggal dari setiap proses secara berurutan.

1. Penilaian Dampak Proses Ekstraksi

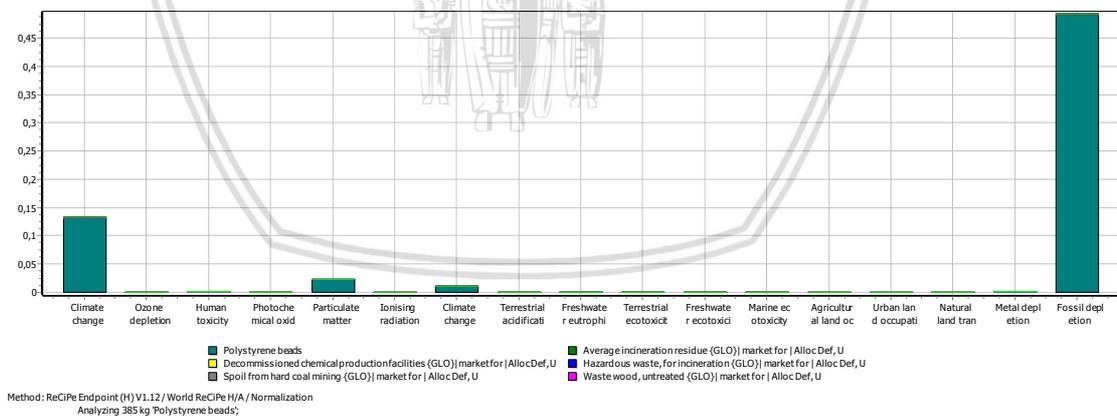
Pada Gambar 4.19, dapat dilihat bahwa proses dan material pada rangkaian proses ekstraksi butiran *polystyrene* berpotensi menyebabkan seluruh kategori dampak karena memiliki nilai 100%. Sementara *average incineration residue* memberikan nilai -100% pada kategori *natural land transformation* yang berarti bahwa kategori ini tidak

berpotensi menimbulkan dampak atau bahkan cenderung memberikan dampak positif. Tabel yang menunjukkan seluruh nilai dampak dapat dilihat pada Lampiran 2.



Gambar 4.19 Karakterisasi nilai dampak proses ekstraksi

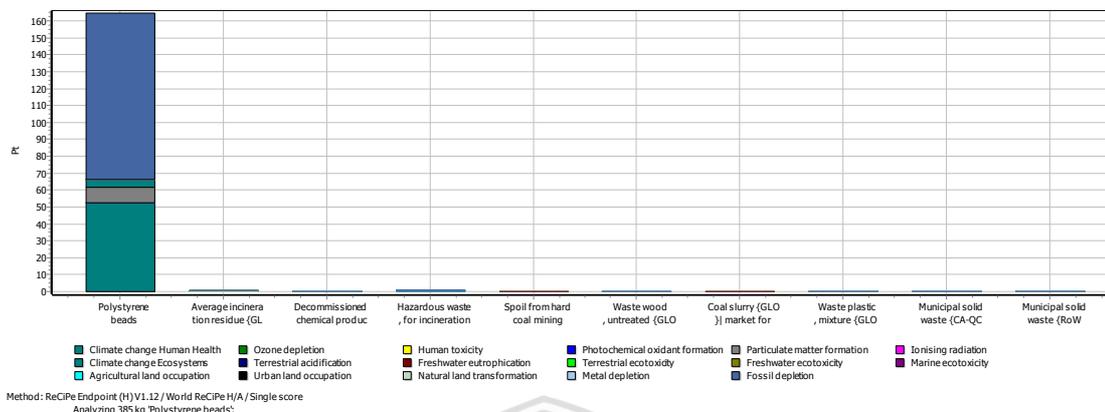
Gambar 4.20 menunjukkan hasil normalisasi nilai dampak dari proses ekstraksi butiran *polystyrene* di mana potensi dampak terbesar terdapat pada kategori *fossil depletion* kemudian diikuti oleh *climate change (human health)*. Hal ini disebabkan karena bahan baku utama dalam proses ekstraksi bahan baku adalah minyak mentah (*crude oil*) sehingga terjadi dapat terjadi penurunan jumlah bahan bakar fosil (dalam hal ini minyak). Selain itu, jelas bahwa perubahan iklim juga dapat dipengaruhi oleh proses ini dalam horizon waktu 100 tahun.



Gambar 4.20 Normalisasi nilai dampak proses ekstraksi

Dapat dilihat pada Gambar 4.21 bahwa hasil skor tunggal dari seluruh kategori dampak pada proses ekstraksi butiran *polystyrene* bernilai 164 pt di mana sebagian besar terdiri dari kategori dampak *fossil depletion* dan *climate change (human health)* sebagaimana yang juga tertera pada hasil normalisasi sebelumnya. Sementara itu, faktor-faktor lainnya seperti *hazardous waste* dan *average incineration residue* tidak berpotensi

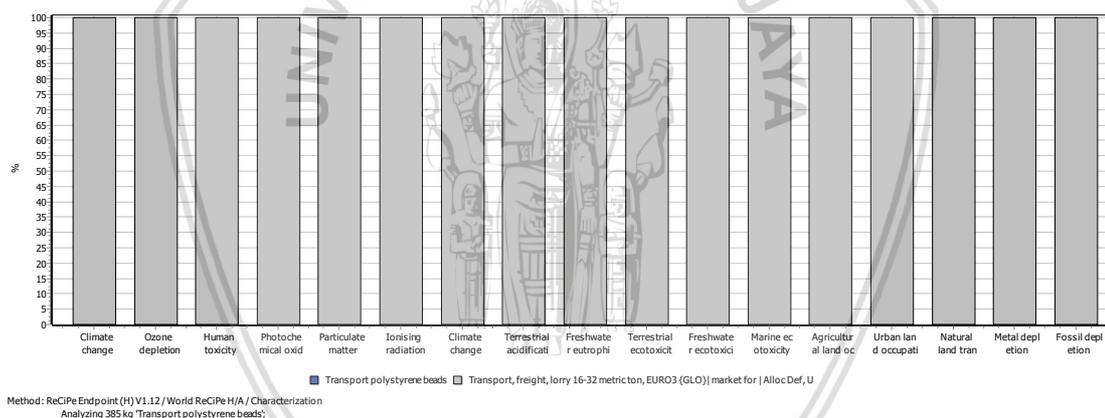
menimbulkan dampak tertentu pada skor tunggalnya karena merupakan bagian dari proses ekstraksi butiran *polystyrene*.



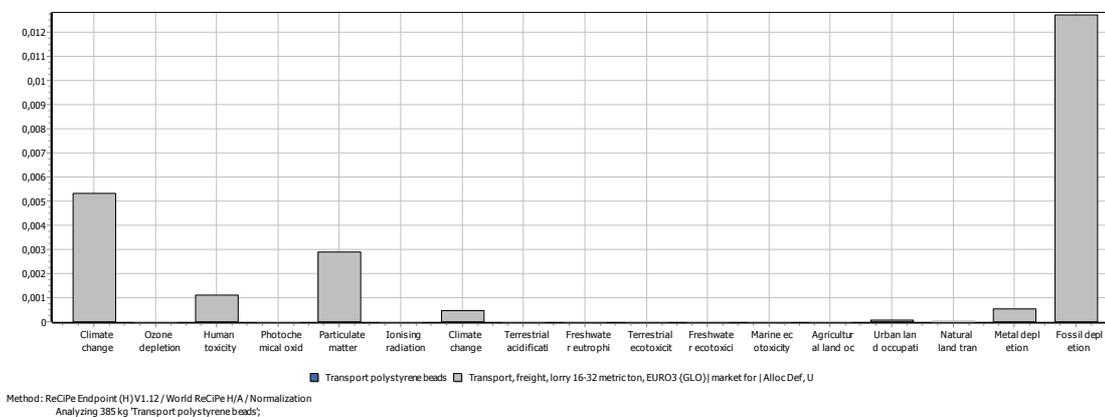
Gambar 4.21 Skor tunggal proses ekstraksi

2. Penilaian Dampak Transportasi Bahan Baku

Pada Gambar 4.22 terlihat jelas bahwa semua kategori dampak mendapat nilai 100% sehingga berarti bahwa semuanya berpotensi terjadi dalam horizon waktu 100 tahun.

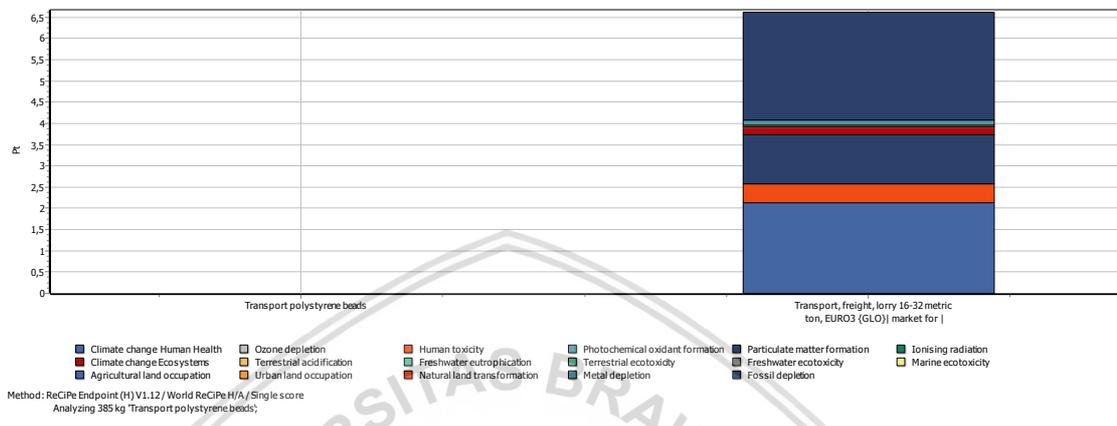


Gambar 4.22 Karakterisasi nilai dampak transportasi bahan baku



Gambar 4.23 Normalisasi nilai dampak transportasi bahan baku

Gambar 4.23 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari transportasi bahan baku di mana nilai tertinggi sebesar 0,0127 terdapat pada kategori *fossil depletion*. Hal ini disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil oleh mode transportasi yang digunakan, yakni truk. Nilai tertinggi berikutnya dimiliki oleh kategori *climate change (human health)* karena sangat jelas memiliki hubungan yang erat dengan kategori sebelumnya.



Gambar 4.24 Skor tunggal transportasi bahan baku

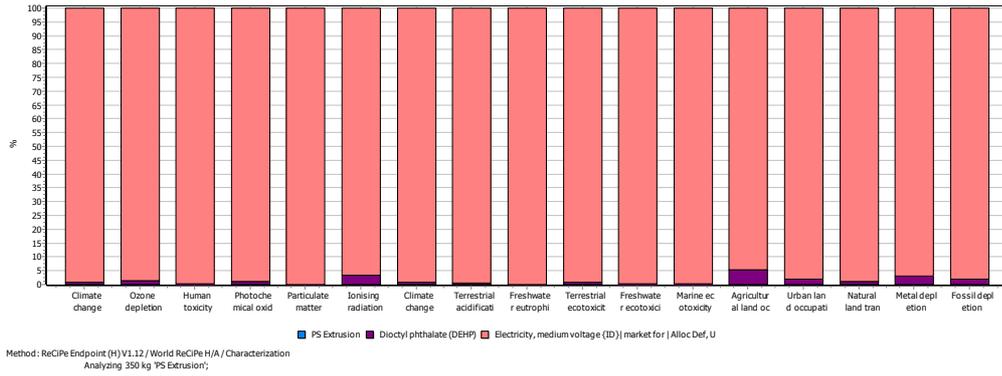
Skor tunggal yang dihasilkan oleh transportasi bahan baku resin *polystyrene* memiliki nilai 6,614 pt yang mana mencakup nilai dampak 2,543 pt untuk *fossil depletion* dan 2,134 pt untuk *climate change (human health)*. Setelah itu, kategori *particulate matter formation* memiliki nilai sebesar 1,154 pt sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.24. Hal ini berarti bahwa transportasi bahan baku berpotensi menyebabkan terjadinya formasi partikel yang dimulai dengan emisi NO_x , NH_3 , SO_2 , atau PM_{10} primer (partikel atmosfer berdiameter kurang dari 10 mikrometer) ke atmosfer. NO_x , NH_3 , dan SO_2 berubah menjadi aerosol sekunder (sejenis polutan udara), sedangkan PM_{10} dapat dihirup oleh manusia, yang dapat menyebabkan peningkatan jumlah kasus kematian dan berdampak negatif bagi kesehatan manusia.

3. Penilaian Dampak Proses Produksi

Penilaian dampak proses produksi dibagi menjadi empat penilaian berbeda sebagai berikut.

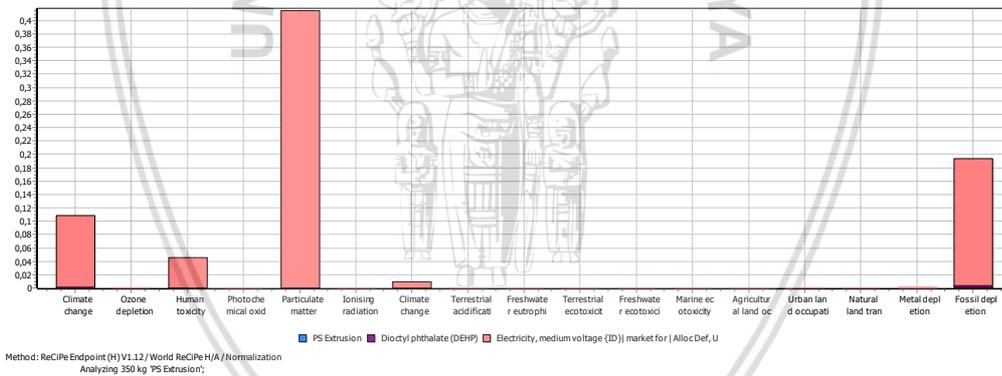
a. Penilaian dampak proses ekstrusi

Pada Gambar 4.25 terlihat jelas bahwa semua kategori dampak mendapat nilai 100% sehingga berarti bahwa semuanya berpotensi terjadi dalam horizon waktu 100 tahun akibat penggunaan listrik dan sedikit dipengaruhi oleh penggunaan senyawa dioktil-ftalat.

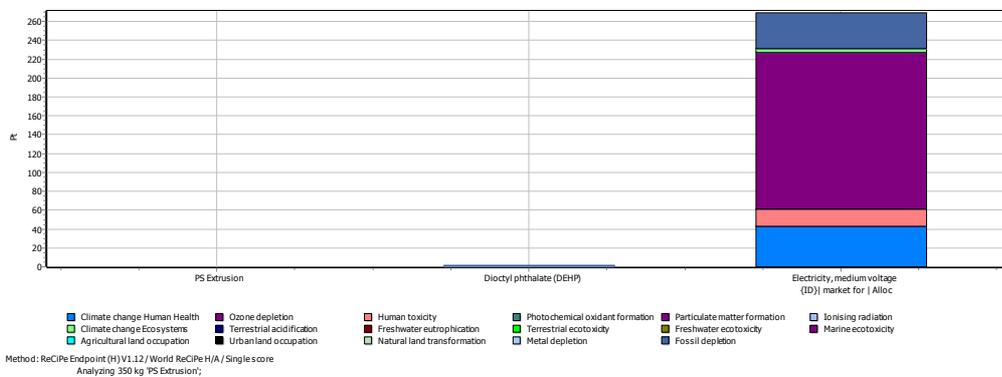


Gambar 4.25 Karakterisasi nilai dampak proses ekstrusi

Gambar 4.26 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari proses ekstrusi di mana nilai tertinggi sebesar 0,414 terdapat pada kategori *particulate matter formation*. Angka ini lebih tinggi dibandingkan angka pada transportasi sebelumnya karena emisi ke udara yang dihasilkan oleh penggunaan mesin ekstrusi. Nilai tertinggi berikutnya dimiliki oleh kategori *fossil depletion* dengan nilai 0,193 dan kategori *climate change (human health)* karena sangat jelas memiliki hubungan yang erat dengan kategori sebelumnya.



Gambar 4.26 Normalisasi nilai dampak proses ekstrusi



Gambar 4.27 Skor tunggal proses ekstrusi

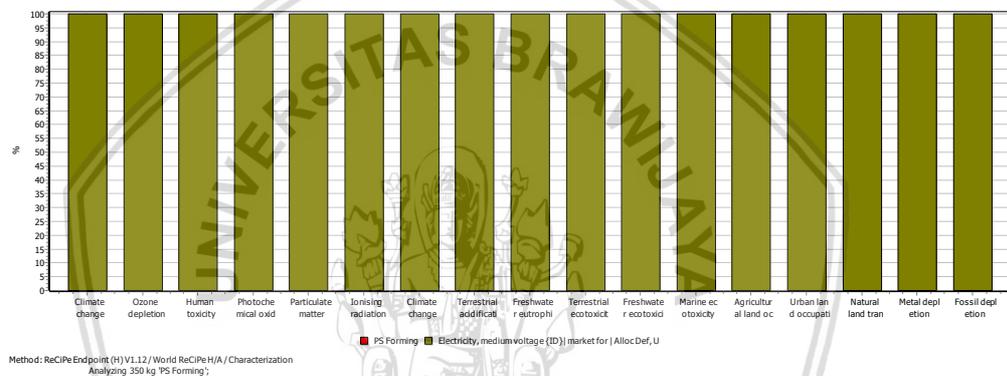
Proses ekstrusi memiliki nilai skor tunggal sebesar 270,513 pt yang mana 269,204 pt didapat dari *electricity*. Nilai 165,966 pt, 43,415 pt, dan 38,609 pt untuk kategori



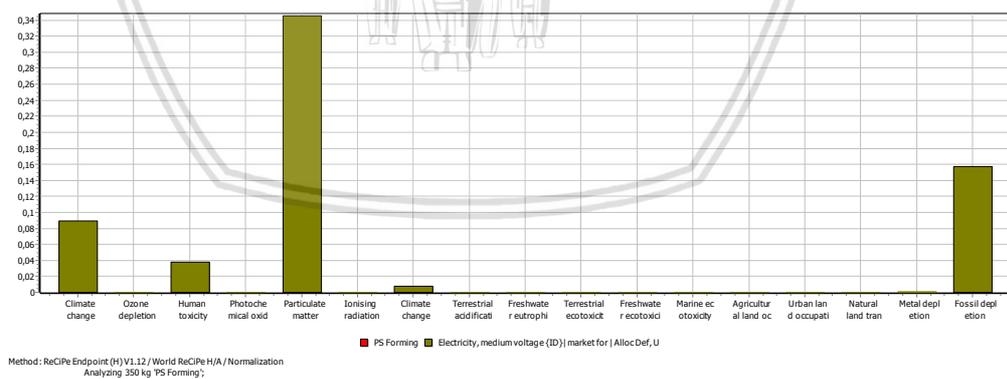
particulate matter transformation, *climate change*, dan *fossil depletion* secara berurutan. Nilai tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.27. Berbeda dengan hasil normalisasi sebelumnya karena nilai pada skor tunggal didapat dari nilai *weighting* (perkalian antara nilai normalisasi dengan bobot tertentu) sehingga nilai *climate change (human health)* menjadi lebih tinggi akibat bobotnya yang lebih besar meskipun pada awalnya nilai *fossil depletion* lebih tinggi.

b. Penilaian dampak proses *forming*

Karakterisasi dari nilai seluruh kategori dampak pada proses *forming* dapat dilihat pada Gambar 4.28 yang mana menunjukkan bahwa seluruh kategori dampak bernilai 100%. Hal ini berarti bahwa proses *forming* berpotensi menimbulkan seluruh kategori dampak tersebut dalam horizon waktu 100 tahun ke depan.



Gambar 4.28 Karakterisasi nilai dampak proses *forming*

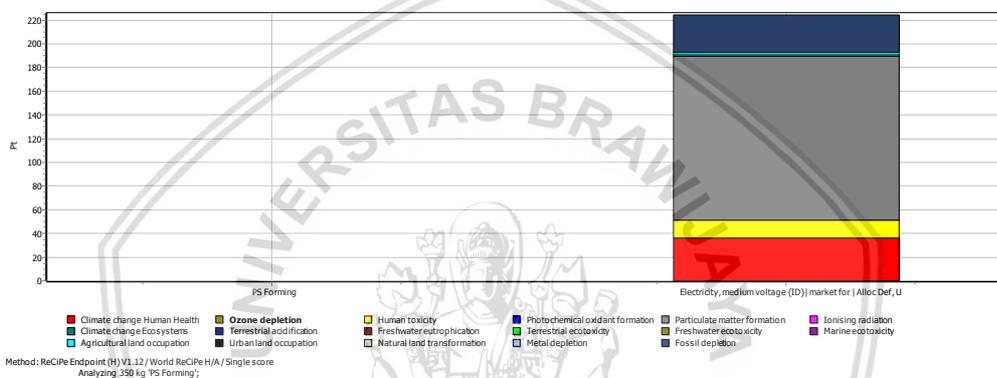


Gambar 4.29 Normalisasi nilai dampak proses *forming*

Gambar 4.29 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari proses *forming* di mana nilai tertinggi sebesar 0,345 terdapat pada kategori *particulate matter formation*. Angka ini lebih tinggi dibandingkan angka pada transportasi sebelumnya dan lebih rendah dibandingkan nilai yang dimiliki proses ekstrusi karena penggunaan energi listrik oleh mesin *forming* relatif lebih rendah. Nilai tertinggi berikutnya dimiliki oleh

kategori *fossil depletion* dengan nilai 0,157 dan kategori *climate change (human health)* dengan nilai 0,089.

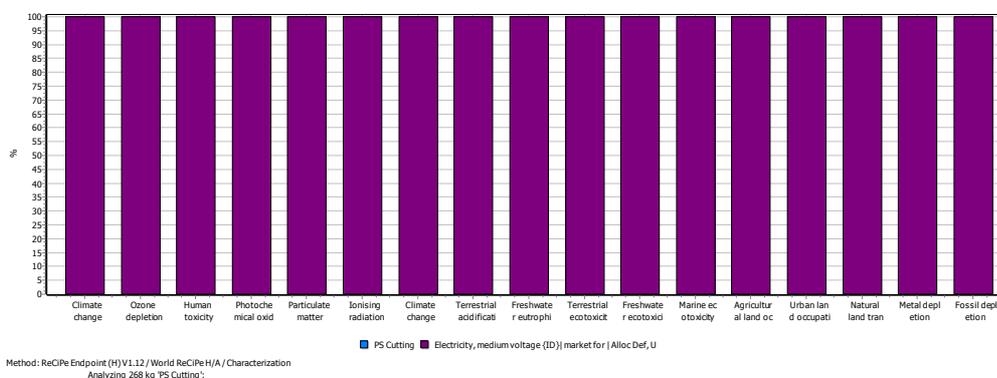
Pada Gambar 4.30, proses *forming* memiliki nilai skor tunggal sebesar 224,337 pt yang mana mencakup nilai 138,204 pt, 35,901 pt, dan 31,523 pt untuk kategori *particulate matter transformation*, *climate change*, dan *fossil depletion* secara berurutan. Berbeda dengan hasil normalisasi sebelumnya karena nilai pada skor tunggal didapat dari nilai *weighting* (perkalian antara nilai normalisasi dengan bobot tertentu) sehingga nilai *climate change (human health)* menjadi lebih tinggi akibat bobotnya yang lebih besar meskipun pada awalnya nilai *fossil depletion* lebih tinggi.



Gambar 4.30 Skor tunggal proses *forming*

c. Penilaian dampak proses *cutting*

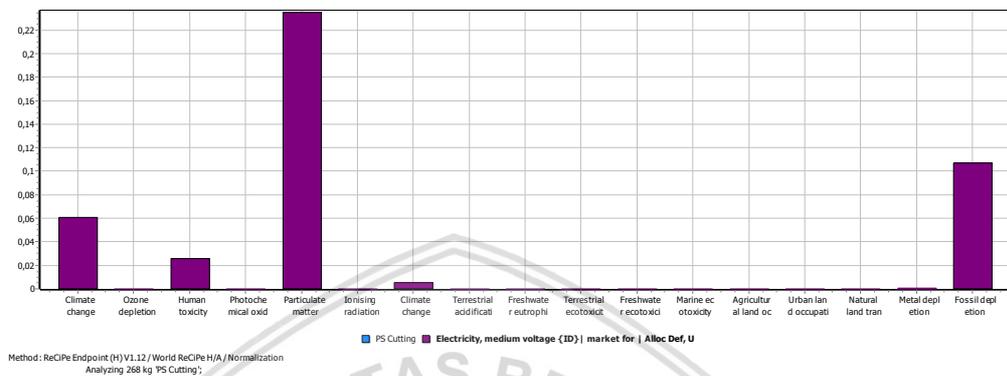
Gambar 4.31 menunjukkan nilai karakterisasi untuk setiap kategori dampak yang mungkin terjadi. Dapat dilihat dari gambar tersebut bahwa untuk faktor penggunaan energi listrik, seluruh kategori dampak dapat terjadi dalam horizon waktu 100 tahun karena bernilai 100%.



Gambar 4.31 Karakterisasi nilai dampak proses *cutting*

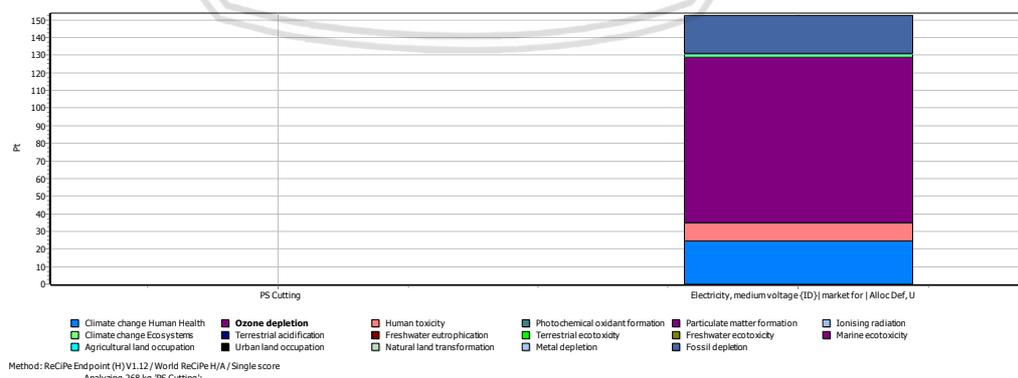
Gambar 4.32 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari proses *cutting* dengan faktor penggunaan energi listrik di mana nilai tertinggi sebesar 0,234 terdapat pada

kategori *particulate matter formation*. Angka ini lebih rendah dibandingkan nilai yang dimiliki proses ekstrusi dan proses *forming* karena penggunaan energi listrik oleh mesin *cutting* relatif lebih rendah. Nilai tertinggi berikutnya dimiliki oleh kategori *fossil depletion* dengan nilai 0,107 dan kategori *climate change (human health)* dengan nilai 0,061.



Gambar 4.32 Normalisasi nilai dampak proses *cutting*

Gambar 4.33 menunjukkan skor tunggal proses *cutting*. Proses *cutting* memiliki nilai skor tunggal sebesar 152,549 pt. Urutan potensi dampak untuk faktor penggunaan listrik adalah *particulate matter formation*, *climate change (human health)*, dan *fossil depletion* yang masing-masing memiliki nilai 93,978 pt, 24,412 pt, dan 21,435 pt. Berbeda dengan hasil normalisasi sebelumnya karena nilai pada skor tunggal didapat dari nilai *weighting* (perkalian antara nilai normalisasi dengan bobot tertentu) sehingga nilai *climate change (human health)* menjadi lebih tinggi akibat bobotnya yang lebih besar meskipun pada awalnya nilai *fossil depletion* lebih tinggi.

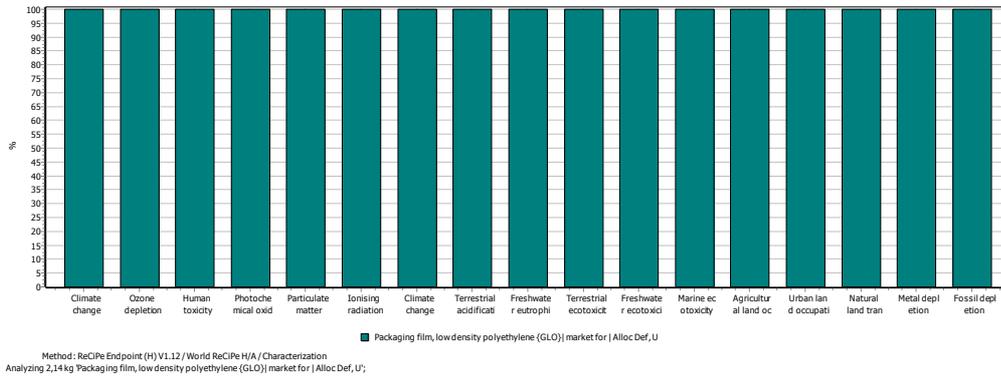


Gambar 4.33 Skor tunggal proses *cutting*

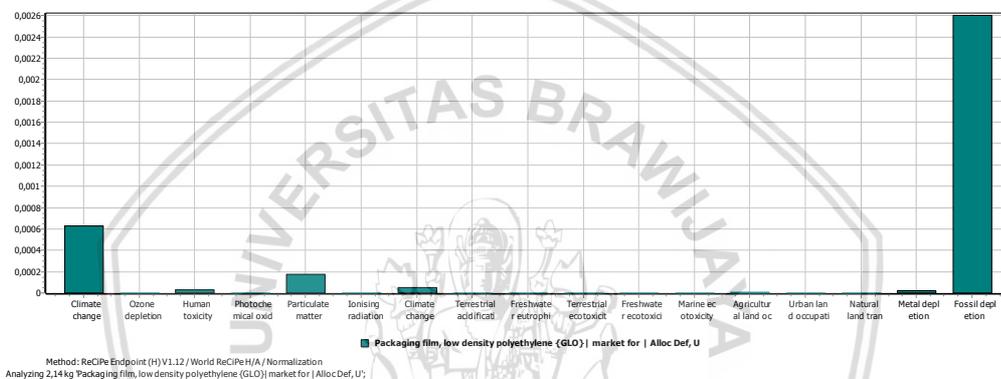
d. Penilaian dampak proses *packaging*

Karakterisasi dari nilai seluruh kategori dampak pada proses *packaging* dapat dilihat pada Gambar 4.34 yang menunjukkan bahwa seluruh kategori dampak

bernilai 100%. Hal ini berarti bahwa proses *packaging* berpotensi menimbulkan seluruh kategori dampak tersebut dalam horizon waktu 100 tahun ke depan.

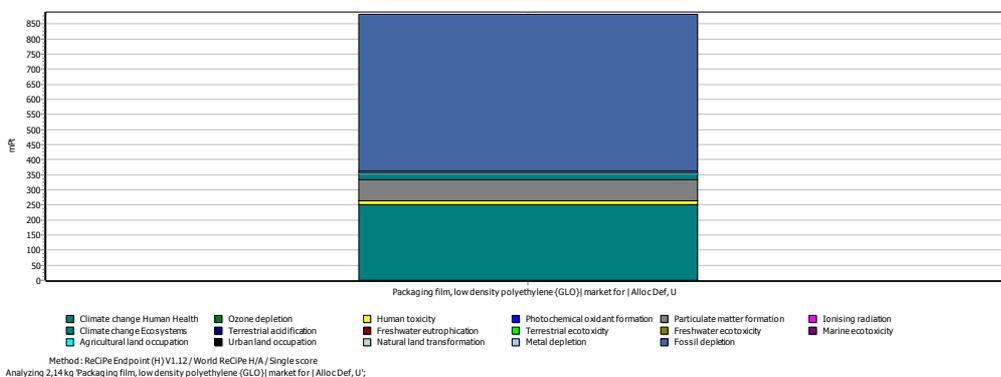


Gambar 4.34 Karakterisasi nilai dampak proses *packaging*



Gambar 4.35 Normalisasi nilai dampak proses *packaging*

Gambar 4.35 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari proses *packaging* di mana nilai tertinggi sebesar 0,002 terdapat pada kategori *fossil depletion*. Angka ini lebih rendah dibandingkan nilai-nilai sebelumnya karena proses ini dilakukan secara manual dan bahan kemas yang digunakan berupa *low density polyethylene* (LDPE) sejumlah 2,142 kg saja. Nilai tertinggi berikutnya dimiliki oleh kategori *climate change (human health)* dengan nilai 0,0006.

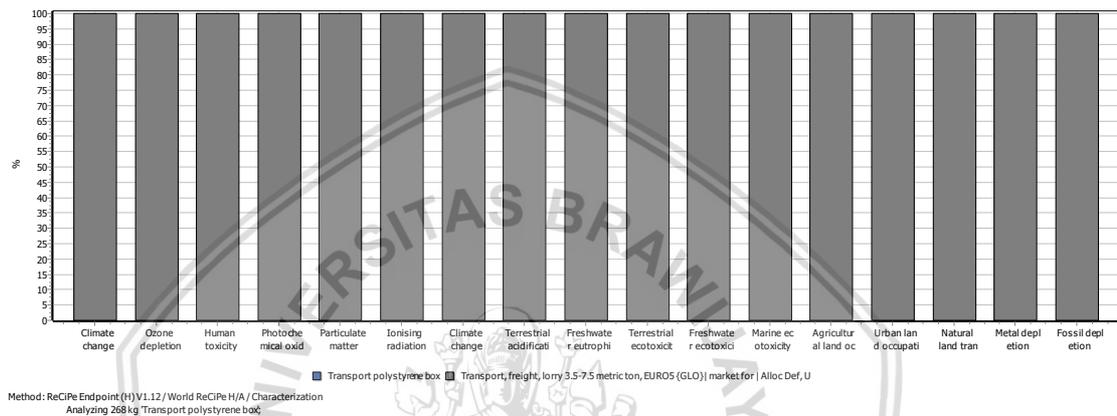


Gambar 4.36 Skor tunggal proses *packaging*

Skor tunggal yang dihasilkan oleh proses *packaging* memiliki nilai 882,286 pt yang mana mencakup nilai dampak 520,375 pt untuk *fossil depletion* dan 250,045 pt untuk *climate change (human health)*. Setelah itu, kategori *particulate matter formation* memiliki nilai sebesar 70,262 pt sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.36.

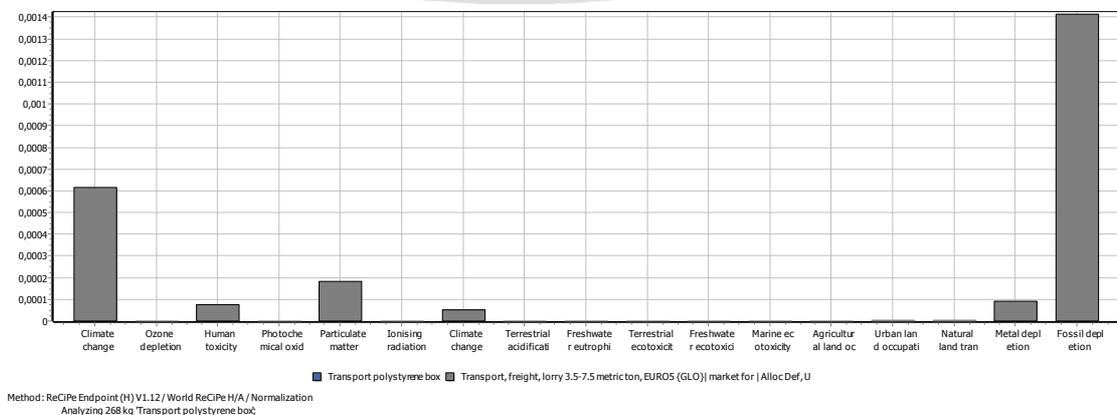
4. Penilaian Dampak Distribusi Produk

Pada Gambar 4.37 terlihat jelas bahwa semua kategori dampak mendapat nilai 100% sehingga berarti bahwa semuanya berpotensi terjadi dalam horizon waktu 100 tahun.



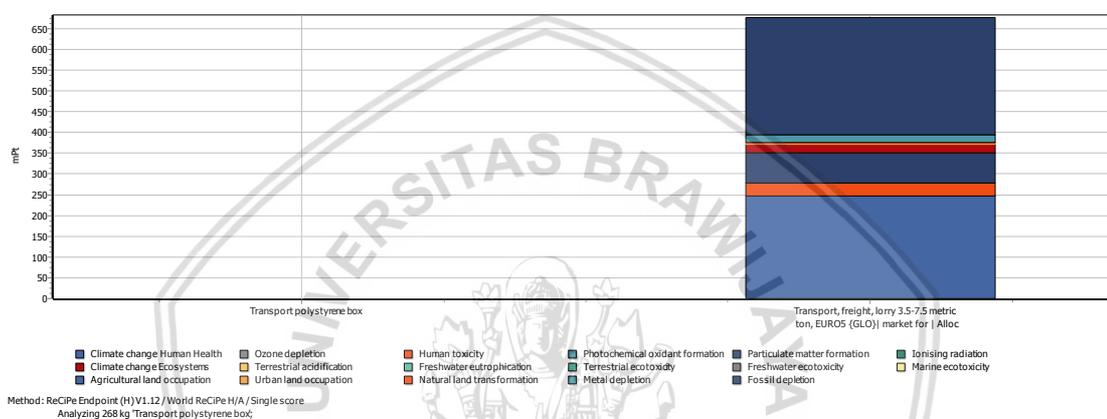
Gambar 4.37 Karakterisasi nilai dampak distribusi produk

Gambar 4.38 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari distribusi produk jadi di mana nilai tertinggi sebesar 0,0014 terdapat pada kategori *fossil depletion*. Hal ini disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil oleh mode transportasi yang digunakan, yakni truk engkel berkapasitas antara 3,5 hingga 7,5 ton. Nilai tertinggi berikutnya terdapat pada kategori *climate change (human health)* dengan nilai 0,0006 karena sangat jelas memiliki hubungan yang erat dengan kategori sebelumnya.



Gambar 4.38 Normalisasi nilai dampak distribusi produk

Skor tunggal yang dihasilkan oleh distribusi produk jadi memiliki nilai 676,443 pt yang mencakup nilai dampak 282,763 pt untuk *fossil depletion* dan 246,953 pt untuk *climate change (human health)*. Setelah itu, kategori *particulate matter formation* memiliki nilai sebesar 72,494 pt sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.39. Hal ini berarti bahwa transportasi bahan baku berpotensi menyebabkan terjadinya formasi partikel yang dimulai dengan emisi NO_x, NH₃, SO₂, atau PM₁₀ primer (partikel atmosfer berdiameter kurang dari 10 mikrometer) ke atmosfer. Selanjutnya, kategori dampak keempat terdapat pada *human toxicity* dengan nilai 30,401 pt yang mana tentu saja berkaitan dengan kategori yang disebutkan sebelumnya.

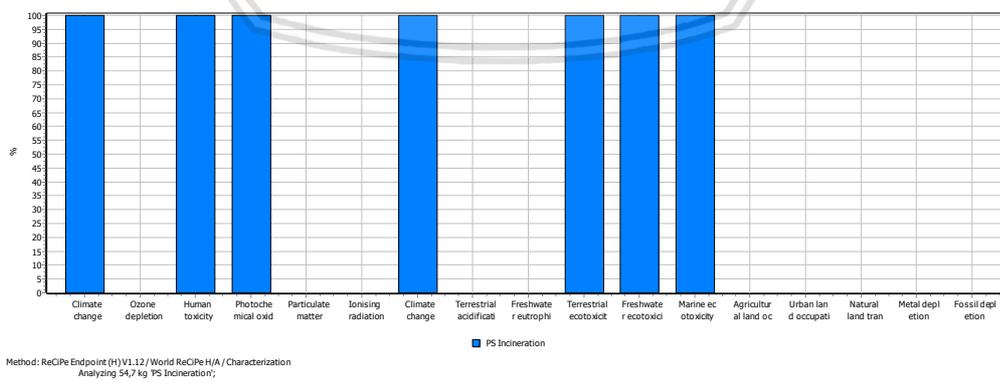


Gambar 4.39 Skor tunggal distribusi produk

5. Penilaian Dampak Akhir Hidup Produk

Penilaian dampak untuk akhir siklus hidup produk dibagi menjadi tiga penilaian berbeda berdasarkan perlakuan yang diberikan, yakni, insinerasi, daur ulang, dan pembuangan.

a. Insinerasi

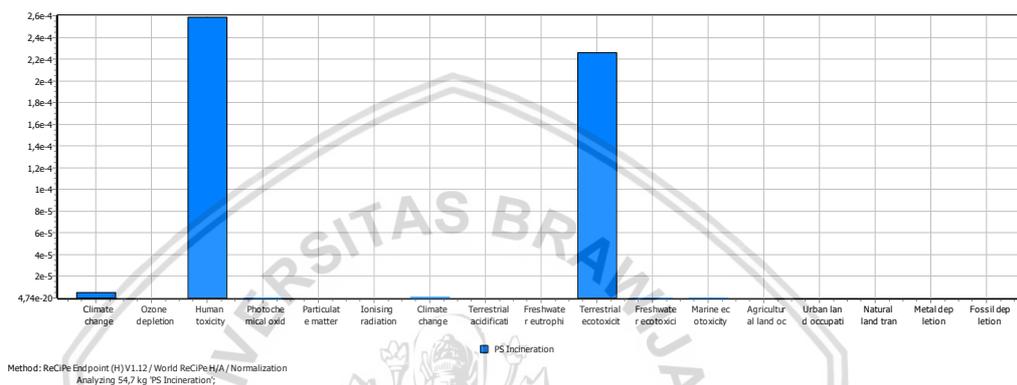


Gambar 4.40 Karakterisasi nilai dampak incineration

Karakterisasi dari nilai seluruh kategori dampak pada skenario *incineration* dapat dilihat pada Gambar 4.40 yang menunjukkan bahwa terdapat 7 kategori dampak bernilai 100%, yaitu *climate change*, *human toxicity*, *photochemical oxidant*

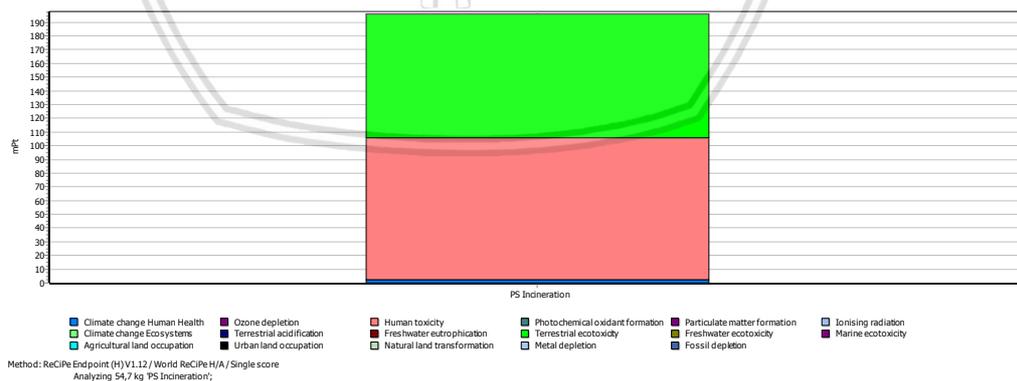
formation, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, dan marine ecotoxicity. Hal ini berarti bahwa proses *incineration* berpotensi menimbulkan kategori dampak tersebut dalam horizon waktu 100 tahun ke depan.

Gambar 4.41 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari *incineration* di mana nilai tertinggi terdapat pada kategori *human toxicity* kemudian diikuti *terrestrial ecotoxicity* dan *climate change (human health)*. Meskipun demikian, nilai dari kategori dampak tersebut sebenarnya sangat kecil karena yang tertinggi pun hanya bernilai 0,0002.



Gambar 4.41 Normalisasi nilai dampak *incineration*

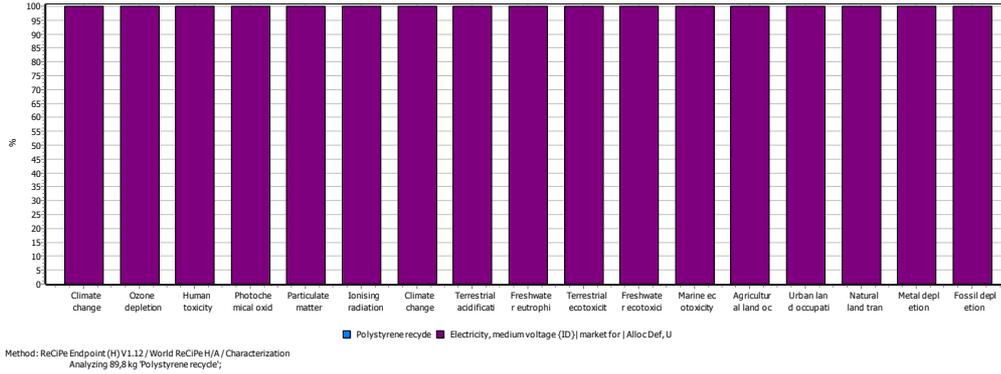
Incineration memiliki nilai skor tunggal sebesar 196,11 pt yang mana mencakup nilai 103,498 pt, 90,315 pt, dan 2,052 pt untuk kategori *human toxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, dan *climate change (human health)* secara berurutan. Nilai tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.42.



Gambar 4.42 Skor tunggal *incineration*

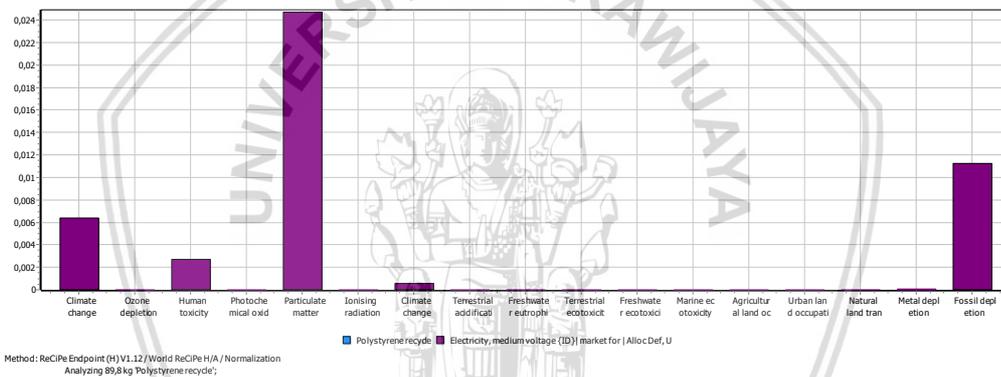
b. Daur ulang

Gambar 4.43 menunjukkan nilai karakterisasi untuk setiap kategori dampak yang mungkin terjadi. Dapat dilihat dari gambar tersebut bahwa proses daur ulang sampah *polystyrene* berpotensi menimbulkan seluruh kategori dampak dengan nilai 100%.



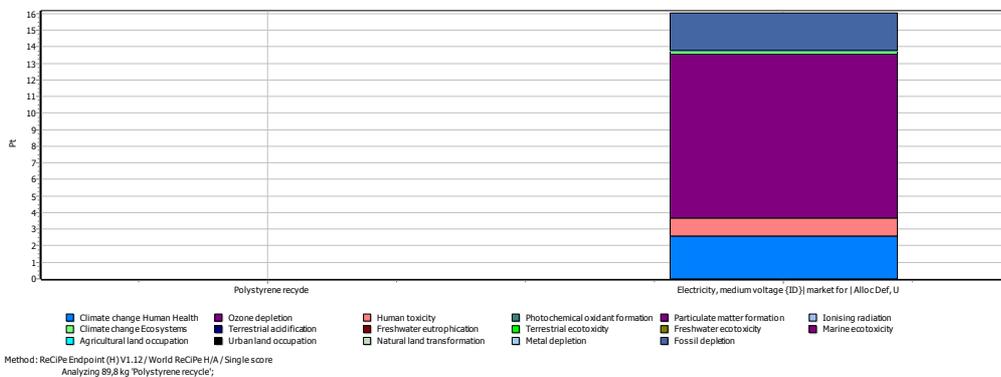
Gambar 4.43 Karakterisasi nilai dampak recycle

Gambar 4.44 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari proses daur ulang di mana nilai tertinggi terdapat pada kategori *particulate matter formation* kemudian diikuti *fossil depletion* dan *climate change (human health)* yang masing-masing secara berurutan bernilai 0,024, 0,011, dan 0,006.



Gambar 4.44 Normalisasi nilai dampak recycle

Proses daur ulang memiliki nilai skor tunggal sebesar 16,041 pt yang mana mencakup nilai 9,882 pt, 2,254 pt, dan 2,567 pt untuk kategori *particulate matter formation*, *fossil depletion*, dan *climate change (human health)* secara berurutan. Nilai tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.45.

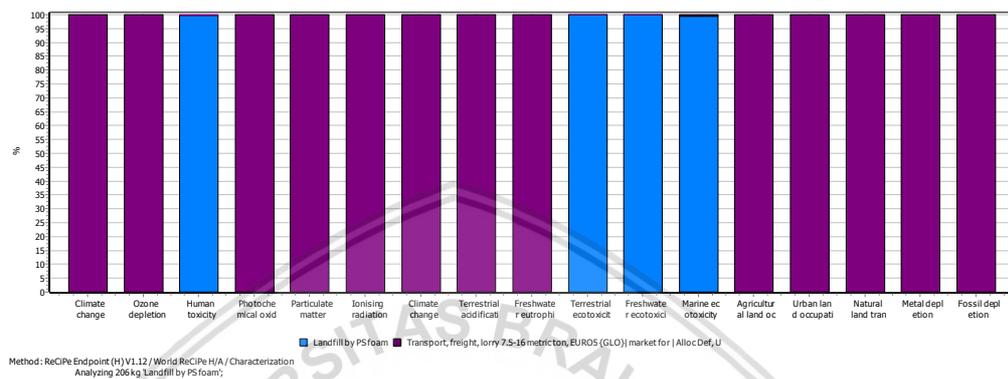


Gambar 4.45 Skor tunggal recycle

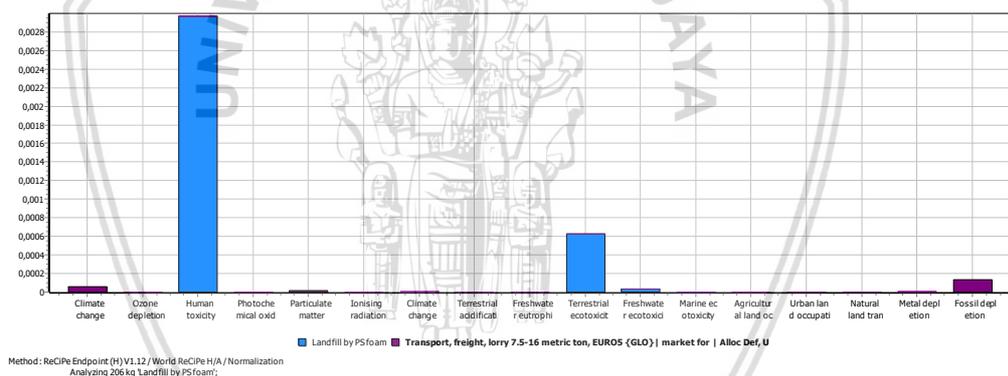


c. Pembuangan

Karakterisasi dari nilai seluruh kategori dampak pada *landfill* dapat dilihat pada Gambar 4.46 yang menunjukkan bahwa seluruh kategori dampak bernilai 100%. Hal ini berarti bahwa *landfill* berpotensi menimbulkan seluruh kategori dampak tersebut dalam horizon waktu 100 tahun ke depan, di mana tiga di antaranya diakibatkan oleh pecahan *polystyrene* yang masuk ke ekosistem perairan/daratan.

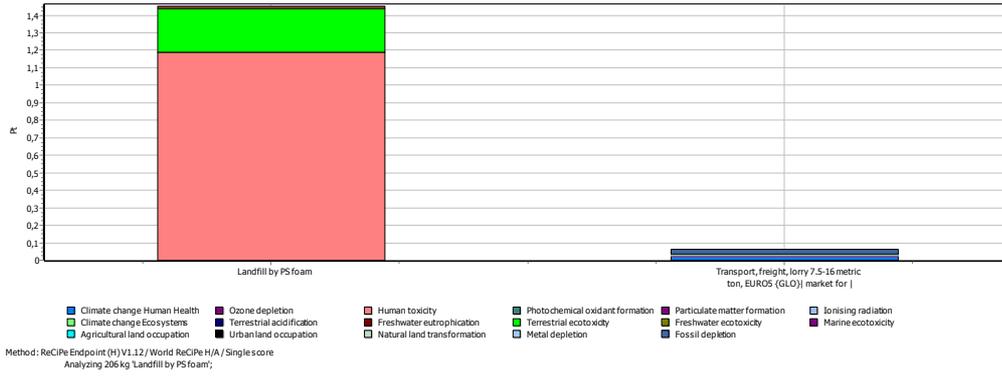


Gambar 4.46 Karakterisasi nilai dampak *landfill*



Gambar 4.47 Normalisasi nilai dampak *landfill*

Gambar 4.47 menunjukkan nilai hasil normalisasi dari *landfill* di mana nilai tertinggi terdapat pada kategori *human toxicity* kemudian diikuti *terrestrial ecotoxicity* dan *fossil depletion*. Meskipun demikian, nilai dari kategori dampak tersebut sebenarnya sangat kecil karena yang tertinggi pun hanya bernilai 0,0029. *Landfill* memiliki nilai skor tunggal sebesar 1,515 pt yang mana 1,451 pt berasal dari emisi berupa monomer *styrene*. Secara keseluruhan, angka tersebut mencakup nilai 1,189 pt, 0,251 pt, dan 0,027 pt untuk kategori *human toxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, dan *fossil depletion* secara berurutan. Nilai tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.48.



Gambar 4.48 Skor tunggal landfill

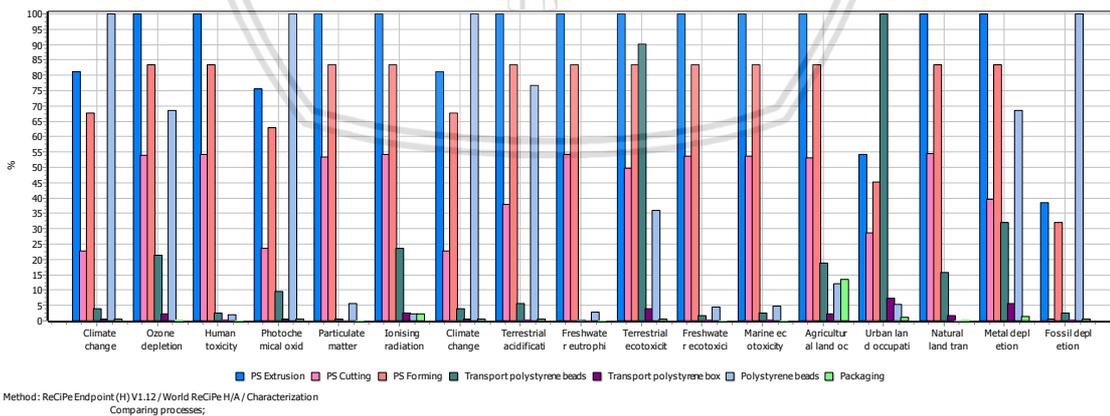
4.4.3 Perbandingan Nilai Dampak

Setelah melihat nilai dampak dari setiap proses, perbandingan nilai antar proses dapat dilakukan guna mengidentifikasi proses yang berpotensi besar menimbulkan dampak lingkungan berdasarkan metode ReCiPe *Endpoint (Hierarchist)* V1.12. Selain itu, dapat pula dilakukan perbandingan terhadap skenario *disposal* sampah *polystyrene*.

4.4.3.1 Perbandingan Nilai Dampak Proses

Nilai dampak dari rangkaian proses pada ekstraksi bahan baku hingga distribusi produk jadi dibandingkan untuk kemudian diberikan rekomendasi terkait proses dengan dampak terbesar.

1. Perbandingan Hasil Karakterisasi



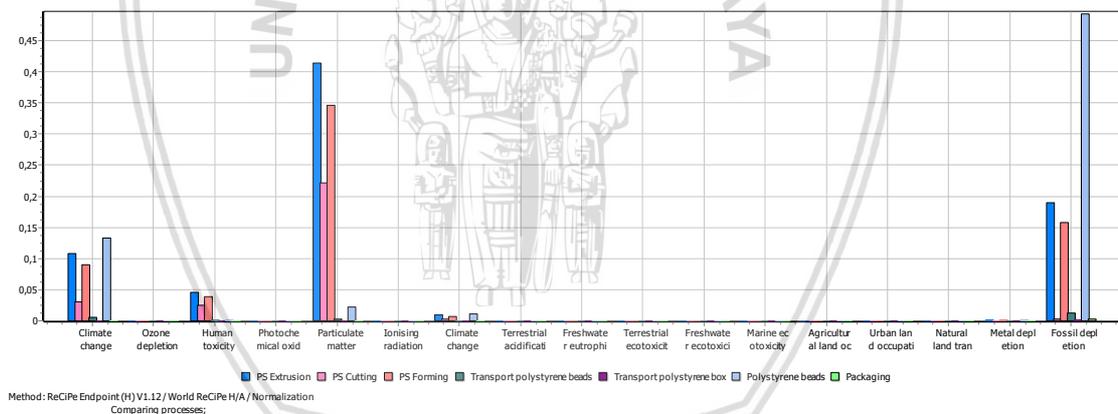
Gambar 4.49 Perbandingan nilai karakterisasi proses

Dapat dilihat pada Gambar 4.49 bahwa proses dengan dampak bernilai 100% terbanyak adalah proses ekstrusi di mana terdapat 12 potensi dampak, yakni *ozone depletion*, *human toxicity*, *particulate matter formation*, *ionising radiation*, *terrestrial acidification*, *freshwater eutrophication*, *terrestrial ecotoxicity*, *freshwater ecotoxicity*,

marine ecotoxicity, agricultural land occupation, natural land transformation, dan metal depletion. Proses lain yang memberikan dampak 100% adalah ekstraksi butiran *polystyrene* yang bernilai 100% pada kategori dampak *climate change (human health), photochemical oxidant formation, climate change (ecosystems), dan fossil depletion.* Sementara itu, proses transportasi bahan baku mendapat nilai 100% pada kategori dampak *urban land occupation.*

2. Perbandingan Hasil Normalisasi

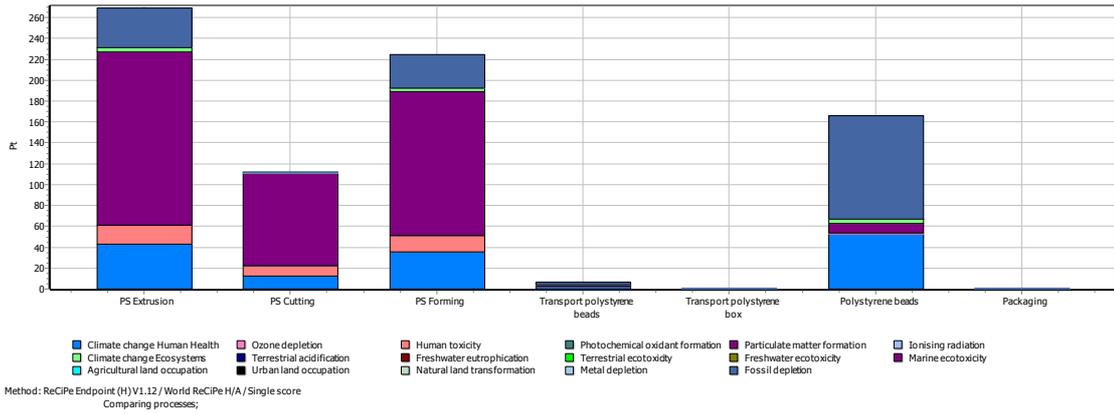
Gambar 4.50 menunjukkan hasil normalisasi dari seluruh proses yang terdapat dalam siklus hidup produk boks makanan *PS foam*. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kategori dampak terbesar yang terjadi adalah *particulate matter transformation* yang sebagian besar (hampir 50%) disebabkan oleh proses ekstrusi. Hal ini dikarenakan penggunaan listriknya merupakan yang terbesar. Berikutnya, ada kategori dampak *fossil depletion* yang sebagian besar disebabkan oleh ekstraksi biji plastik resin *polystyrene*. Proses ekstraksi ini menggunakan minyak mentah sebagai bahan baku utamanya sehingga dapat menyebabkan penurunan jumlah bahan bakar fosil.



Gambar 4.50 Perbandingan nilai normalisasi proses

3. Perbandingan Skor Tunggal

Pada Gambar 4.51 terdapat skor tunggal yang dimiliki seluruh proses dalam siklus hidup produk boks makanan *PS foam*. Dapat dilihat bahwa proses yang memiliki dampak terbesar adalah proses ekstrusi yang memiliki skor tunggal sebesar 269,204 pt, kemudian diikuti oleh proses *forming* (224,337 pt), proses ekstraksi biji plastik resin *polystyrene* (165,884 pt), proses *cutting* (112,48 pt), transportasi bahan baku (6,614 pt), proses *packaging* (0,882 pt), dan distribusi produk (0,676 pt).

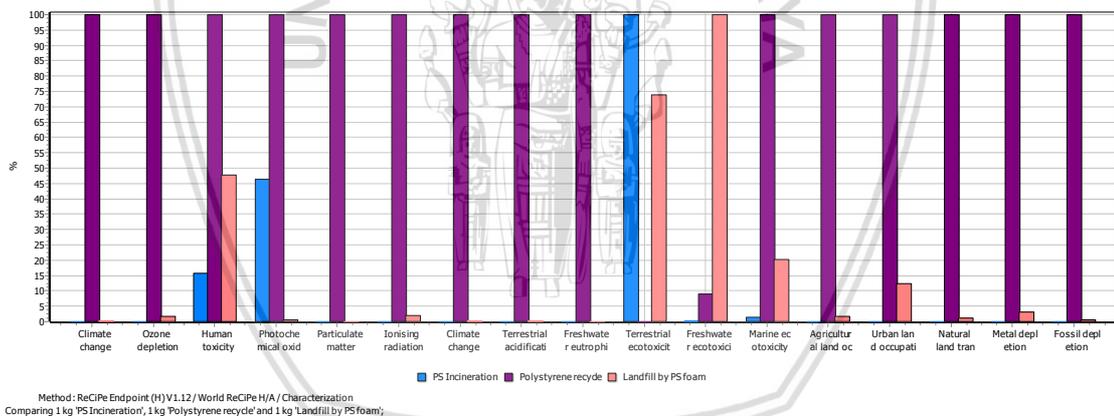


Gambar 4.51 Perbandingan skor tunggal proses

4.4.3.2 Perbandingan Nilai Dampak Skenario *Disposal*

Perbandingan nilai dampak skenario *disposal* dilakukan secara terpisah dengan perbandingan nilai dampak proses karena memiliki tujuan berbeda, yakni untuk menentukan skenario *disposal* dengan nilai dampak terendah.

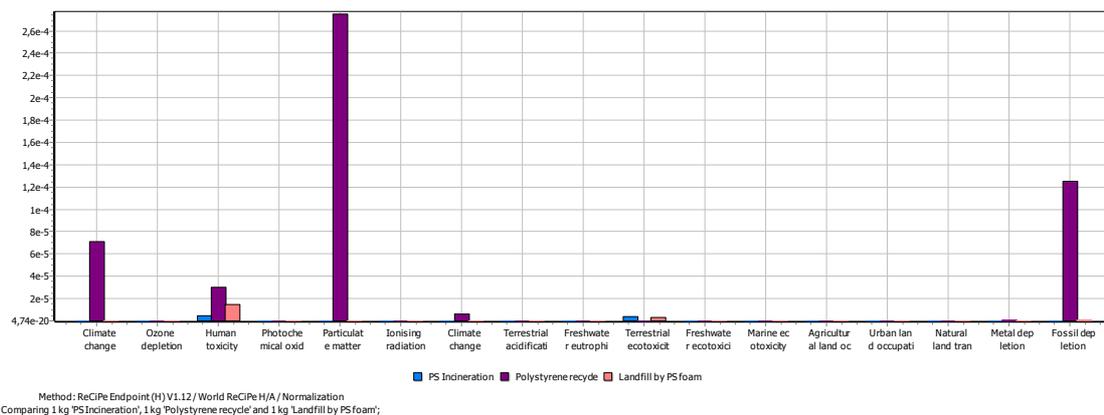
1. Perbandingan Hasil Karakterisasi



Gambar 4.52 Perbandingan nilai karakterisasi skenario *disposal*

Dapat dilihat pada Gambar 4.52 bahwa proses dengan dampak bernilai 100% terbanyak adalah proses daur ulang sampah *polystyrene* di mana terdapat 15 potensi dampak, yakni *climate change (human health)*, *ozone depletion*, *human toxicity*, *photochemical oxidant formation*, *particulate matter formation*, *ionising radiation*, *climate change (ecosystems)*, *terrestrial acidification*, *freshwater eutrophication*, *marine ecotoxicity*, *agricultural land occupation*, *urban land occupation*, *natural land transformation*, *metal depletion*, dan *fossil depletion*. Proses lain yang memberikan dampak 100% adalah *incineration* pada kategori dampak *terrestrial ecotoxicity* dan *landfill* pada kategori *freshwater ecotoxicity*.

2. Perbandingan Hasil Normalisasi

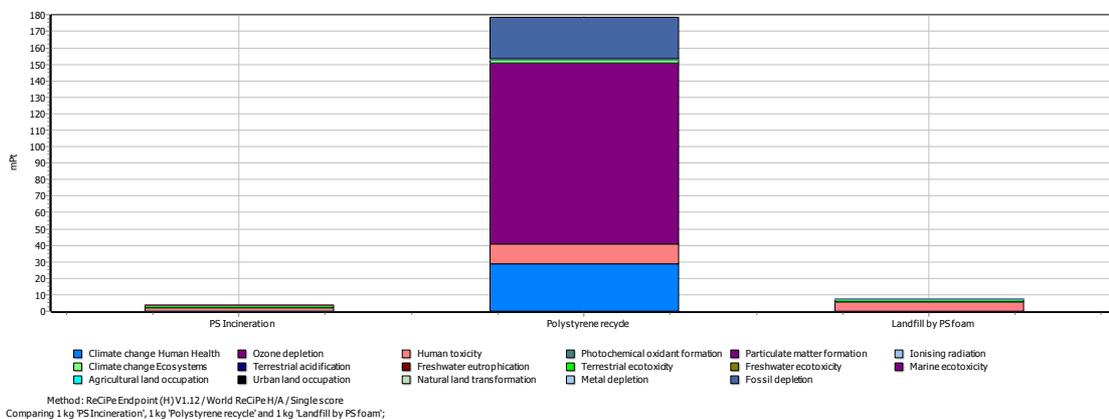


Gambar 4.53 Perbandingan nilai normalisasi skenario disposal

Gambar 4.53 menunjukkan hasil normalisasi dari skenario yang terdapat pada *waste treatment* dari limbah produk boks makanan PS foam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kategori dampak terbesar yang terjadi adalah *particulate matter transformation* yang hampir seluruhnya disebabkan oleh proses daur ulang resin *polystyrene*. Hal ini dikarenakan penggunaan listriknya merupakan yang terbesar (dan satu-satunya). Kategori dampak terbesar selanjutnya adalah *fossil depletion* dan *climate change (human health)* yang keduanya juga diakibatkan oleh proses daur ulang resin *polystyrene*. Hal ini sangat jelas menerangkan bahwa ketiga kategori tersebut merupakan akibat dari penggunaan listrik secara umum.

3. Perbandingan Skor Tunggal

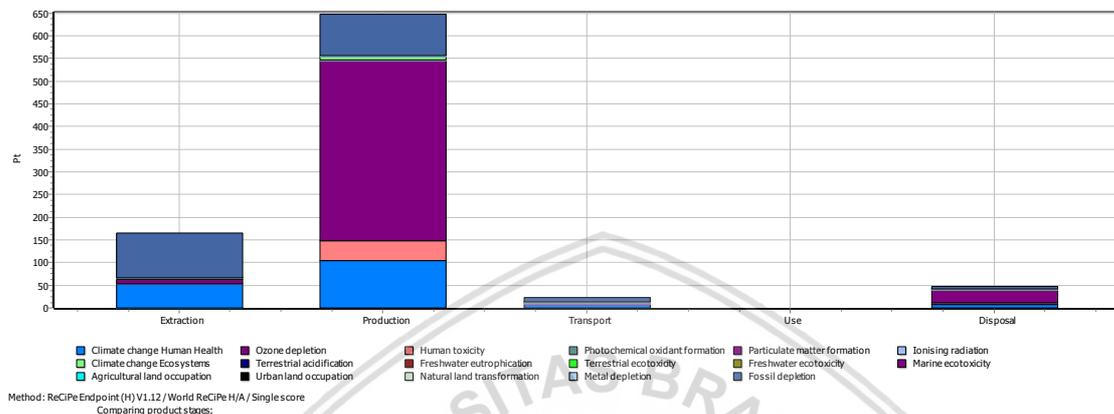
Pada Gambar 4.54 terdapat skor tunggal yang dimiliki oleh skenario penanganan limbah produk boks makanan PS foam. Dapat dilihat bahwa skenario yang memiliki dampak terbesar adalah *recycle* yang memiliki skor tunggal sebesar 178,64 pt, kemudian diikuti oleh *landfill* dengan skor 7,375 pt dan *incineration* dengan skor 3,586 pt.



Gambar 4.54 Perbandingan skor tunggal skenario disposal

4.4.3.3 Perbandingan Nilai Dampak Siklus Hidup

Setelah membandingkan nilai dampak pada setiap proses dan skenario *disposal*, maka dilakukan perbandingan nilai dampak pada setiap tahapan dalam siklus hidup produk kemasan PS *foam*, yakni mulai dari tahap ekstraksi, produksi, transportasi, penggunaan, hingga *disposal*.



Gambar 4.55 Perbandingan skor tunggal tahap siklus hidup

Berdasarkan Gambar 4.55, dapat dilihat bahwa dalam siklus hidup produk kemasan boks PS *foam*, tahap yang berpotensi menimbulkan dampak terbesar secara berturut-turut adalah tahap produksi, ekstraksi, *disposal*, transportasi, dan penggunaan. Sedangkan kategori dampak yang memiliki potensi terbesar adalah *particulate matter formation* (yang bahkan nilainya lebih tinggi dibandingkan skor tunggal tahapan lainnya, yakni sebesar 398,14 pt). Sementara itu, skor tunggal tahap penggunaan bernilai nol karena pada tahap ini, produk hanya digunakan sekali dan kemudian dilanjutkan ke tahap *disposal* sehingga tidak terdapat penggunaan energi maupun material.

4.5 Life Cycle Interpretation

Tahap *life cycle interpretation* bertujuan untuk memperbaiki model LCI agar mencapai *goal* dari penelitian yang dilakukan dan keluaran dari tahap ini berupa kesimpulan atau rekomendasi berdasarkan tujuan dan ruang lingkup LCA yang telah ditetapkan pada awalnya. Pada tahap ini, hasil yang didapatkan dari tahap sebelumnya (LCIA) dianalisis dan dievaluasi sehingga dapat diidentifikasi proses yang memberikan dampak terbesar ataupun terbanyak serta mengkaji akar penyebabnya untuk dijadikan acuan dalam pemberian rekomendasi perbaikan terhadap seluruh proses dalam siklus hidup produk boks makanan berbahan *polystyrene foam*.

4.5.1 Identifikasi dan Analisis Dampak Signifikan

Berdasarkan hasil penilaian dampak pada tahap LCIA, kategori dampak terbesar dan penyebabnya diidentifikasi dan diurutkan berdasarkan besar potensi yang dimiliki pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6
Potensi Kategori Dampak Terbesar

No.	Kategori Dampak	Nilai (pt)	Proses	Penyebab
1.	<i>Particulate matter formation</i>	165,8447	Ekstrusi	Penggunaan energi listrik (99,92%)
2.	<i>Particulate matter formation</i>	138,204	<i>Forming</i>	Penggunaan energi listrik
3.	<i>Fossil depletion</i>	98,5927	Ekstraksi	Penggunaan bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batu bara) sebagai <i>resource</i>
4.	<i>Particulate matter formation</i>	93,9786	<i>Cutting</i>	Penggunaan energi listrik
5.	<i>Climate change (human health)</i>	53,1369	Ekstraksi	Penggunaan bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batu bara) sebagai <i>resource</i>
6.	<i>Climate change (human health)</i>	43,0816	Ekstrusi	Penggunaan energi listrik (99,23%)
7.	<i>Fossil depletion</i>	37,8279	Ekstrusi	Penggunaan energi listrik (97,97%)
8.	<i>Climate change (human health)</i>	35,9013	<i>Forming</i>	Penggunaan energi listrik
9.	<i>Fossil depletion</i>	31,5233	<i>Forming</i>	Penggunaan energi listrik

Dapat dilihat dari Tabel 4.6 bahwa proses dengan dampak terbesar secara berturut-turut adalah proses ekstrusi, proses *forming*, dan proses ekstraksi yang mana dua di antaranya merupakan bagian dari proses produksi boks kemasan PS *foam* dan satu lainnya merupakan proses pada awal siklus hidup produk. Persamaan yang jelas dimiliki oleh proses ekstrusi dan proses *forming* adalah akibat dari penggunaan listrik yang menyebabkan secara berurutan tiga kategori dampak, yakni *particulate matter formation*, *climate change (human health)*, dan *fossil depletion*. Sehingga dapat dikatakan bahwa tiga dampak tersebut sebagian besar (jika tidak seluruhnya) ditimbulkan oleh penggunaan listrik. Tabel 4.6 kemudian disederhanakan menjadi Tabel 4.7 yang mana berisi 3 kategori dampak utama dan kontribusi setiap proses terhadap kategori dampak tersebut.

Tabel 4.7
Penataan Nilai Dampak

Kategori Dampak	Ekstraksi	Ekstrusi	<i>Forming</i>	<i>Cutting</i>	<i>Packaging</i>	Transportasi	Total
<i>Particulate matter formation</i>	9,095	165,844	138,204	93,978	0,070	1,226	408,4203
<i>Fossil depletion</i>	98,592	37,827	31,523	21,435	0,520	2,826	192,7263
<i>Climate change (human health)</i>	53,136	43,081	35,901	24,412	0,250	2,381	159,1643

Dari Tabel 4.7, dapat dibuat tabel analisis kontribusi (*contribution analysis*) untuk menyatakan kontribusi dalam persen dari total keseluruhan sebagaimana terlihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8
Persen Kontribusi Tiap Proses

Kategori Dampak	Ekstraksi	Ekstrusi	Forming	Cutting	Packaging	Transportasi	Total
<i>Particulate matter formation</i>	2,22%	40,6%	33,8%	23%	0%	0,3%	100%
<i>Fossil depletion</i>	51,2%	19,6%	16,4%	11,1%	0,3%	1,5%	100%
<i>Climate change (human health)</i>	33,4%	27,1%	22,6%	15,3%	0,2%	1,5%	100%

Hasil dari Tabel 4.8 dapat diurutkan berdasarkan aturan atau prosedur tertentu berdasarkan analisis dominasi (*dominance analysis*) untuk mengetahui kontribusi signifikan. Berdasarkan kriteria peringkat yang diusulkan oleh ISO, terdapat beberapa kategori sebagai berikut.

- A: paling penting, pengaruh signifikan, kontribusi > 50%
- B: sangat penting, pengaruh relevan, 25% < kontribusi < 50%
- C: cukup penting, cukup berpengaruh, 10% < kontribusi < 25%
- D: sedikit penting, sedikit pengaruh, 2,5% < kontribusi < 10%
- E: tidak penting, pengaruh diabaikan, kontribusi < 2,5%

Dengan menggunakan kategori seperti di atas, maka dibuatlah peringkat untuk setiap proses menurut nilai dari kategori dampak bersangkutan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9
Peringkat Kontribusi Tiap Proses

Kategori Dampak	Ekstraksi	Ekstrusi	Forming	Cutting	Packaging	Transportasi	Total
<i>Particulate matter formation</i>	E	B	B	C	E	E	100%
<i>Fossil depletion</i>	A	C	C	C	E	E	100%
<i>Climate change (human health)</i>	B	B	C	C	E	E	100%

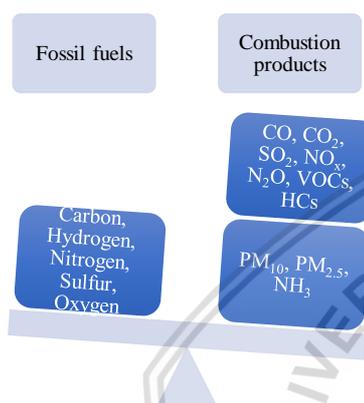
Sedangkan untuk skenario *disposal* dari produk boks kemasan PS *foam*, Tabel 4.10 menunjukkan persen kontribusi nilai dampak dari empat kategori teratas, yakni *particulate matter formation*, *climate change (human health)*, *fossil depletion*, dan *human toxicity*. Hal ini tidak jauh berbeda dengan hasil sebelumnya.

Tabel 4.10
Persen Kontribusi Skenario *Disposal*

Kategori Dampak	Insinerasi	Daur ulang	Pembuangan	Total
<i>Particulate matter formation</i>	0%	99,97%	0,03%	100%
<i>Climate change (human health)</i>	0,13%	99,47%	0,4%	100%
<i>Fossil depletion</i>	0%	99,47%	0,53%	100%
<i>Human toxicity</i>	9,55%	61,24%	29,21%	100%

Dari nilai pada Tabel 4.10, dapat dikatakan bahwa kontribusi untuk empat kategori dampak tersebut didominasi oleh skenario daur ulang yang disebabkan oleh tingginya penggunaan listrik pada proses tersebut. Meskipun demikian, nilai dampak tiga skenario *disposal* tersebut relatif lebih rendah dibandingkan dengan nilai yang dimiliki oleh proses produksi.

Pola yang terlihat jelas pada rangkaian kategori dampak adalah hubungan antara *particulate matter formation*, *fossil depletion*, dan *climate change*. *Particulate matter formation* terjadi sebagai hasil dari pembakaran bahan bakar fosil. *Particulate matter* (PM_x) merupakan salah satu produk hasil pembakaran bahan bakar fosil seperti tertera pada Gambar 4.55. Selain menyebabkan pembentukan partikel kecil, semakin banyak jumlah bahan bakar fosil yang digunakan, maka semakin menipis jumlah bahan bakar fosil yang tersedia. Peristiwa inilah yang dimaksud dengan *fossil depletion*. Nilai *fossil depletion* akan meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah bahan bakar fosil yang digunakan.



Gambar 4.56 Pembakaran bahan bakar fosil

Di lain sisi, gabungan efek dari kedua dampak tersebut dapat menimbulkan perubahan iklim. Perubahan iklim sendiri disebabkan oleh gas rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil seperti CO_2 dan N_2O . Selain itu, gas-gas tersebut juga berdampak pada kesehatan manusia. Oleh karena itu, kategori *climate change* yang bernilai tinggi adalah *climate change (human health)*.

Apabila dilihat pada Lampiran 3, tabel yang menunjukkan nilai karakterisasi penilaian dampak proses ekstrusi, *particulate matter formation* bernilai 0,00566 DALY (*Disability-Adjusted Life Year*) yang berarti bahwa partikel (polutan) yang terbentuk akibat proses ekstrusi 267,75 kg *polystyrene foam* per hari dapat menyebabkan kehilangan 0,00566 tahun hidup atau setara dengan 2 hari hidup.

Secara singkat, dapat dikatakan bahwa penggunaan bahan bakar fosil (baik untuk menghasilkan energi listrik maupun bahan bakar kendaraan) menyebabkan penipisan jumlah bahan bakar fosil yang tersedia (nilai *fossil depletion* meningkat) dan pembentukan partikel kecil dalam jumlah banyak (nilai *particulate matter formation* meningkat). Efek dari jumlah *particulate matter* yang tinggi dan produk hasil pembakaran bahan bakar fosil menyebabkan peningkatan nilai *climate change*.

4.5.2 Rekomendasi Perbaikan

Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, rekomendasi perbaikan terkait rangkaian proses maupun penanganan limbah yang telah ada. Sebagaimana telah dibahas pada bab sebelumnya, rekomendasi didasarkan pada dua prinsip, yakni *Cleaner Production* (CP) untuk rangkaian proses dan *Waste Management* untuk penanganan limbah.

4.5.2.1 Rekomendasi Perbaikan Proses

Sebagaimana telah dibahas sebelumnya, CP memiliki lima prinsip dasar, yakni *input substitution* (penggantian input), *good housekeeping* (pembenahan yang efisien), *internal recycling*, *technological optimisation/change* (pembaharuan teknologi), dan *optimisation of product* (pengoptimalan produk). Dari lima prinsip tersebut, dua di antaranya dapat digunakan untuk merumuskan rekomendasi perbaikan dalam rangkaian proses pada penelitian ini, yakni sebagai berikut.

1. *Internal Recycling*

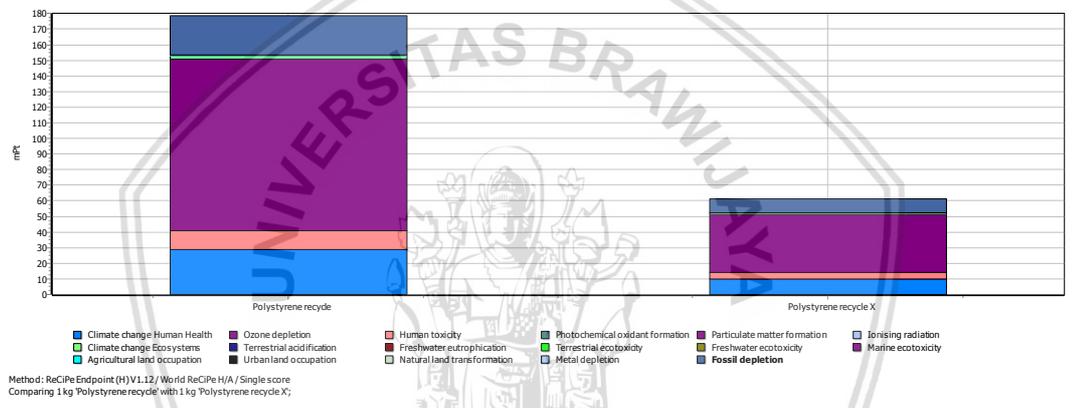
Prinsip sebenarnya sudah diterapkan karena limbah hasil pemotongan boks PS *foam* digunakan kembali sebagai bahan baku melalui proses daur ulang menggunakan mesin *recycle*. Mesin tersebut juga dapat digunakan untuk proses daur ulang sampah *post-consumer* yang mana dapat meningkatkan tingkat daur ulang dari produk boks PS *foam*. Selain cara tersebut, *polystyrene* dapat dipecahkan dengan cara pirolisis (tanpa adanya oksigen) untuk menciptakan monomer dasar yang dapat diproses kembali dan minyak mentah sebagai bahan bakar.

Keadaan saat ini menunjukkan bahwa tren daur ulang sampah cukup rendah disebabkan oleh rendahnya harga jual 1 kg sampah *polystyrene*, yakni sebesar Rp 2.000,00 sehingga para pemulung cenderung memilih untuk mengabaikan sampah plastik golongan 6 ini. Selain itu, jumlah bandar yang menerima atau mengolah sampah PS ini sangat rendah, hanya 2 dari 25. Oleh sebab itu, perlu adanya alur manajemen sampah PS oleh pemerintah dan perusahaan (sebagaimana telah diusulkan oleh Industri *Packaging Federation*) di Indonesia.

2. *Technological Change*

Salah satu faktor utama yang memicu tingginya potensi dampak lingkungan pada rangkaian proses adalah penggunaan energi listrik yang cukup banyak pada setiap mesin yang digunakan. Dikarenakan rangkaian proses dapat dikategorikan cukup sederhana sehingga modifikasi difokuskan pada peningkatan kapasitas dan/atau teknologi mesin yang dipakai. Rekomendasi pembaharuan teknologi yang dapat diberikan guna

menghemat jumlah energi listrik yang dibutuhkan adalah dengan menggunakan mesin Greenmax Screw Compactor Apolo C200. Mesin ini memiliki fungsi yang sama dengan mesin daur ulang yang digunakan, namun dengan daya sejumlah 19,55 kW dan kapasitas lebih tinggi yakni sebesar 200 kg per jam. Walaupun perlu mengeluarkan biaya yang lebih besar pada awalnya, dengan mengganti dengan mesin Greenmax ini, biaya yang dikeluarkan untuk listrik ke depannya pun dapat berkurang dan produktivitas dapat meningkat dengan kapasitas mesin yang lebih tinggi. Selain itu, tentunya potensi dampak lingkungan yang mungkin disebabkan dapat berkurang. Gambar 4.56 menunjukkan nilai dampak apabila mesin Greenmax digunakan. Meskipun demikian, rekomendasi ini sebenarnya lebih cocok ketika perusahaan akan membuka pabrik baru atau ketika mesin yang saat ini digunakan telah habis masa pakainya.



Gambar 4.57 Perbandingan skor tunggal skenario daur ulang

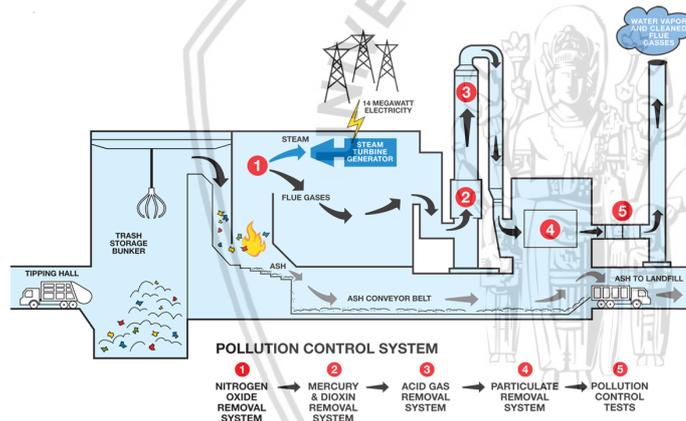
Dapat dilihat pada Gambar 4.57 bahwa seluruh kategori dampak menunjukkan penurunan yang signifikan, seperti kategori dampak *particulate matter formation* yang nilainya menurun dari 110 mPt menjadi 12 mPt sementara beberapa kategori dampak seperti *climate change (ecosystems)* yang direpresentasikan oleh warna hijau menunjukkan penurunan nilai yang hampir mendekati 0 sebagaimana tidak terlihat warna hijau pada grafik skenario *recycle* yang direkomendasikan.

4.5.2.2 Rekomendasi Penanganan Limbah

Waste management memiliki tujuh jenis, yaitu *collection*, *incineration*, *integrated waste management*, *landfill*, *recycling*, *source reduction*, dan *waste transfer stations*. Dari tujuh jenis tersebut, empat di antaranya dapat digunakan untuk merumuskan rekomendasi perbaikan untuk penanganan limbah pada penelitian ini, yakni *incineration*, *recycle*, *waste transfer stations*, dan *source reduction*. Rekomendasi berikut dimaksudkan untuk penanganan limbah akhir siklus hidup selepas dari tahap *disposal* produk.

1. Insinerasi

Berdasarkan hasil penilaian dampak insinerasi, diketahui bahwa insinerasi memiliki potensi terbesar pada kategori dampak *terrestrial ecotoxicity* (mengacu pada jumlah emisi zat beracun ke udara, air, dan tanah) dan *human toxicity* (mengacu pada efek dari bahan kimia terhadap manusia). Oleh sebab itu, untuk menekan jumlah bahan kimia dan/atau emisi yang berbahaya, sebaiknya menggunakan sistem insinerasi yang benar. *Polystyrene* membutuhkan suhu di atas 1000 derajat Celcius agar dapat terbakar dengan sempurna dan efisien. Selain itu, *polystyrene* juga membutuhkan oksigen berlebih selama proses pembakaran untuk memecah senyawa kimianya. Apabila hal ini dapat dilakukan, pembakaran *polystyrene* dapat menghasilkan produk samping seperti karbon dioksida (sebagai gas buang), uap air, jelaga (mudah terurai), dan panas. Hal ini dikarenakan *polystyrene foam* terdiri dari karbon dan hidrogen. Dalam insinerator *energy-from-waste* modern, energi yang dihasilkan oleh pembakaran kemasan *polystyrene* dan limbah padat dapat menghasilkan energi bagi masyarakat di sekitarnya.



Gambar 4.58 Insinerator

Sumber: Ecomaine (2011)

Salah satu skema sistem insinerator yang direkomendasikan oleh Ecomaine dapat dilihat pada Gambar 4.58. Pada gambar tersebut, kumpulan sampah (berbagai jenis) dibakar pada suhu di atas 1000 derajat Celcius yang mana kemudian menghasilkan uap (digunakan untuk generator turbin uap) dan gas buang (diproses melalui *removal system* agar menjadi gas buang yang bersih dan uap air). Salah satu perusahaan di Indonesia yang bergerak di bidang instalasi sistem insinerator *waste-to-energy* adalah PT. Centra Rekayasa Enviro. Meski demikian, instalasi sistem ini memerlukan biaya mahal sehingga menjadi hambatan dalam pengadaan insinerator.

2. Daur ulang

Berdasarkan hasil penilaian dampak daur ulang pada penelitian ini, diketahui bahwa daur ulang memiliki potensi terbesar pada kategori *particulate matter formation* dan

fossil depletion yang mana merupakan akibat dari penggunaan energi listrik untuk mesin daur ulang. Salah satu cara untuk menekan hal tersebut adalah dengan menggunakan mesin ramah lingkungan ataupun lebih baik lagi apabila daur ulang produk yang dilakukan tidak menggunakan mesin, melainkan secara manual mengubah limbah PS *foam* menjadi barang-barang kerajinan yang fungsional seperti souvenir, dekorasi rumah, dan vas bunga. Selain itu, PS hasil daur ulang dalam *open-loop recycling* dan *closed-loop recycling* dapat dijadikan berbagai item seperti kemasan *foam* dan barang tahan lama serta produk bangunan yang inovatif. Dalam sistem *open-loop*, suatu material didaur ulang menjadi produk lain yang dianggap akan dibuang setelah digunakan sehingga material tersebut memiliki dua masa hidup. PS *foam* dapat didaur ulang dengan sistem ini secara mekanis ataupun kimiawi menjadi resin yang diproses ulang dan digunakan untuk berbagai aplikasi yang tahan lama. Sementara itu, *closed-loop recycling* memulihkan material yang kemudian digunakan untuk menghasilkan produk yang diasumsikan akan didaur ulang menjadi produk lain yang akan didaur ulang lagi dan seterusnya. Pada sistem ini, *polystyrene* bekas pemakaian konsumen digilas kemudian dicampur dengan *virgin* PS dan dicetak menjadi kemasan PS yang baru. Siklus ini akan terus berulang dalam *closed-up recycling*. Sistem *closed-up* inilah yang telah digunakan oleh perusahaan pada penelitian ini dengan bantuan mesin *recycler*.



Gambar 4.59 *Compactor*

Sumber: Zhenjiang Intco (2015)

Salah satu kendala dalam proses daur ulang limbah *polystyrene* adalah biaya transportasi yang tinggi karena limbah jenis ini memerlukan ruang yang cukup besar dalam proses pemindahannya. Oleh sebab itu, dapat digunakan kondensator (*compactor*) yang dapat memampatkan ukuran *polystyrene foam* dengan memberikan tekanan dan panas untuk membentuknya menjadi blok. Proses ini dapat membuat jumlahnya menjadi 2-5 kali lebih banyak untuk ditransportasikan dalam ruang yang sama. Selain itu juga, kondensator ini sebaiknya disediakan dekat dengan tempat pembuangan/pengumpulan agar dapat dimanfaatkan oleh pemulung. Salah satu jenis

mesin *compactor* yang ada saat ini untuk jenis sampah *polystyrene* adalah Greenmax Apolo C100 seperti dapat dilihat pada Gambar 4.59.

3. *Waste Transfer Stations*

Selain berfungsi untuk menekan jumlah alat transportasi dan jarak pengiriman sampah, *waste transfer station* juga dapat dijadikan sarana pengumpulan sampah untuk daur ulang oleh aliansi antara industri daur ulang, industri pengolah plastik, pemerintah daerah, LSM, dan komunitas setempat. Menilik dari negara tetangga, terdapat tiga alternatif dalam pengelolaan limbah plastik, yakni sebagai berikut.

- a. Pembentukan *waste bank* (bank limbah) di sekolah-sekolah atau perkampungan yang mana dapat dijadikan tempat penyerahan dan pemisahan limbah. Bank limbah kemudian akan membayar kepada warga sejumlah limbah yang diserahkan. Limbah tersebut kemudian diserahkan kepada perusahaan untuk diolah kembali. Saat ini, sudah terdapat sejumlah bank limbah di Indonesia dan diharapkan akan meningkat.
- b. Kegiatan *Pha Pa Khaya* berarti memberikan donasi ke rumah ibadat (wihara) dengan menyerahkan limbah yang telah dipisah-pisah. Perusahaan akan mengambil limbah tersebut dan menyerahkan hasil penjualannya kepada rumah ibadat tersebut. Hal ini luar biasa karena merupakan aktivitas berbasis agama yang sebenarnya memiliki potensi apabila diterapkan di Indonesia.
- c. Penyelenggaraan *waste market* (pasar limbah), yaitu sejenis pasar kaget di mana perusahaan mengumumkan kapan diadakannya pasar limbah sehingga warga akan beramai-ramai membawa limbah yang sudah terpisah ke pasar tersebut dan perusahaan akan membelinya dengan harga yang sudah ditentukan.

4. *Source Reduction*

Cara terbaik untuk melindungi lingkungan dan mencegah risiko kesehatan manusia dari efek PS *foam* yang berpotensi merusak adalah tidak menggunakannya. Ketika mempertimbangkan "3 R", dapat dipahami bahwa "R" pertama, *reduce*, adalah yang paling efektif, setelah itu diikuti *reuse* dan *recycle*. Banyak perusahaan kini menawarkan alternatif ramah lingkungan untuk *polystyrene* dalam kemasannya dengan menggunakan kemasan bantalan udara, yang sangat ringan, membutuhkan lebih sedikit ruang sebelum dan sesudah digunakan, dan juga dapat didaur ulang di tempat yang sama. Alternatif lain adalah kemasan makanan *biodegradable*, cangkir, garpu, sendok dan piring yang terbuat dari pati jagung atau kertas. Ini menghasilkan lebih sedikit polusi ketika dibuang dan, jika bersih, dapat didaur ulang atau dikomposkan dalam banyak kasus.

BAB V PENUTUP

Bab ini menjelaskan kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan sesuai dengan tujuan penelitian yang dikemukakan sebelumnya. Kesimpulan didapat dari hasil analisis pada penelitian ini, sementara saran ditujukan kepada pihak perusahaan, pemerintah daerah, dan masyarakat guna perbaikan dan penelitian berikutnya.

5.1 Kesimpulan

Berikut merupakan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

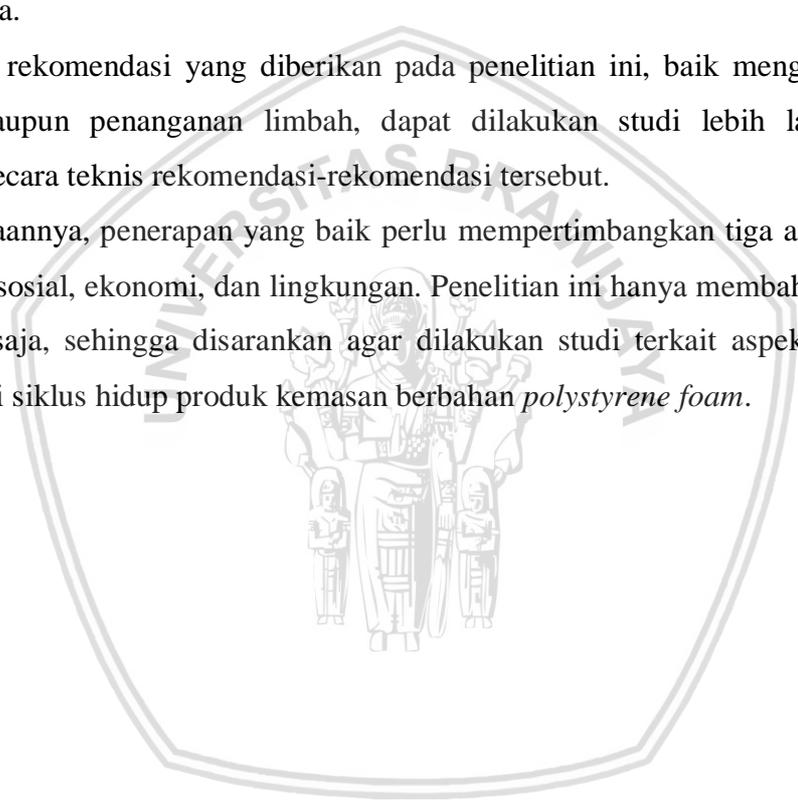
1. Secara keseluruhan, dapat dikatakan bahwa seluruh kategori dampak berpotensi terjadi akibat siklus hidup produk boks kemasan berbahan *polystyrene foam*. Dalam siklus hidup produk kemasan boks PS *foam*, tahap yang berpotensi menimbulkan dampak terbesar secara berturut-turut adalah tahap produksi (647 pt), ekstraksi (165,88 pt), *disposal* (48,13 pt), transportasi (21,87 pt), dan penggunaan (0 pt). Namun, tiga kategori dampak yang menempati posisi teratas adalah *particulate matter formation*, *fossil depletion*, dan *climate change (human health)* dengan masing-masing bernilai 408,42 pt, 192,72 pt, dan 159,16 pt yang mana nilai-nilai tersebut didominasi oleh proses ekstrusi. Sementara untuk penyebabnya, berdasarkan analisis yang dibuat, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar dipengaruhi oleh penggunaan energi listrik yang cukup tinggi dan penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak, gas alam, dan batu bara. Sedangkan untuk penanganan limbah, kategori dampak yang berpotensi terjadi sama dengan proses produksi, hanya urutannya yang berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar disebabkan oleh proses daur ulang, walaupun sebenarnya nilainya relatif lebih kecil apabila dibandingkan dengan proses produksi.
2. Rekomendasi untuk proses produksi berdasarkan prinsip *Cleaner Production* adalah dengan menggunakan mesin yang memiliki daya lebih kecil dan/atau kapasitas lebih besar karena selain dapat mengurangi potensi dampak yang mungkin terjadi, juga dapat menekan biaya produksi. Rekomendasi ini sebenarnya lebih cocok ketika perusahaan akan membuka pabrik baru atau ketika mesin yang saat ini digunakan telah habis masa pakainya. Sedangkan untuk penanganan limbah, rekomendasi yang dapat diberikan adalah melakukan pembakaran dengan suhu di atas 1000 derajat Celcius dengan

insinerator khusus, menerapkan *open-loop recycling*, mengadakan sarana pengumpulan sampah dengan bekerja sama dengan berbagai pihak, serta yang terpenting dan terutama, yakni menerapkan prinsip 3R terkhususnya R yang pertama, *reduce*.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Terdapat berbagai alternatif produk kemasan yang dibuat dari bahan lain yang dapat dikatakan lebih ramah lingkungan, sehingga ada baiknya dilakukan analisis untuk membandingkan siklus hidup produk kemasan berbahan *polystyrene foam* dengan jenis bahan lainnya.
2. Berdasarkan rekomendasi yang diberikan pada penelitian ini, baik mengenai proses produksi maupun penanganan limbah, dapat dilakukan studi lebih lanjut untuk membahas secara teknis rekomendasi-rekomendasi tersebut.
3. Pada kenyataannya, penerapan yang baik perlu mempertimbangkan tiga aspek utama, yakni aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Penelitian ini hanya membahas dari segi lingkungan saja, sehingga disarankan agar dilakukan studi terkait aspek sosial dan ekonomi dari siklus hidup produk kemasan berbahan *polystyrene foam*.



DAFTAR PUSTAKA

- Andrae, Anders S. G. (2009). *Global Life Cycle Impact Assessments of Material Shifts: the Example of a Lead-free Electronics Industry*. New York: Springer Science & Business Media.
- Bacalhau, J. B. & Cunha, T. M. (2017). Effect of Ni Content on the Hardenability of A Banitic Steel for Processing of Plastics. Makalah dalam *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. ABCM. Brazil, 3-8 Desember 2017.
- Badan Pusat Statistik. (2013). *Proyeksi Penduduk Indonesia 2010-2035*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Bizteka PT. Citra Cendekia Indonesia. (2016). *Produsen dan Kapasitasnya Resin Plastik di Indonesia*. Jakarta: PT. Citra Cendekia Indonesia. <http://cci-indonesia.com/2016/06/13/produsen-dan-kapasitasnya-resin-plastik-di-indonesia/> (diakses 31 Januari 2018)
- Boettner, Edward A., Ball, Gwendolyn L., Weiss, Benjamin. (1973). *Combustion Products from the Incineration of Plastics*. Minnesota: Solid Waste Research Laboratory, National Environmental Research Center.
- Chemical Safety Facts. (2014). *Polystyrene*. Amerika Serikat: American Chemistry Council. <https://www.chemicalsafetyfacts.org/polystyrene-post/> (diakses 31 Januari 2018)
- Curran, Mary A. (2015). *Life Cycle Assessment Student Handbook*. New York: Wiley-Scrivener.
- Filimonau, Viachaslau. (2015). *Life Cycle Assessment and Life Cycle Analysis in Tourism: A Critical Review of Applications and Implications*. Cham: Springer.
- Fitidarini, N. L. & Damanhuri, E. (2011). Timbulan Sampah Styrofoam di Kota Bandung. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Volume 17 Nomor 2. hlm. 87-97.
- Hasan, M. Iqbal. (2002). *Pokok-pokok Materi Metodologi Penelitian dan Aplikasinya*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Hawley-Fedder, R. A., Parsons, M. L., & Karasek, F. W. (1984). Products Obtained During Combustion Of Polymers Under Simulated Incinerator Conditions: II. Polystyrene. *Journal of Chromatography A*. Volume 315 hlm. 201-210.
- Hendrawan, Dowaki, K. & Putro, U. S. (2010). An Analysis of the CO2 Emission Abatement in Plastic Recycling System Using Life Cycle Assessment Methodology: A Case Study of Bandung City, Indonesia. *Indonesian Journal for the Science of Management*. Volume 9 Nomor 3. hlm. 245-251.
- Ilhamdika, M. (2017). Analisis Dampak Lingkungan dari Proses Daur Ulang Plastik dengan Pendekatan Life Cycle Assessment. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- ISO 14040. (2006). *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*. Geneve: International Organisation for Standardisation.



- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean. *Science*. 13 Februari. hlm. 768-771.
- Lemann, Martin F. (2008). *Waste Management*. Jerman: Peter Lang.
- Lewis, H. & Demmers, M. (1996). Life Cycle Assessment and Environmental Impact. *Australian Journal of Environmental Management*. Volume 3 Nomor 2.
- Nilsson, Lennart. (2007). *Cleaner Production: Technologies and Tools for Resource Efficient Production*. Uppsala: Baltic University Press.
- Palupi, A. H., Tama, I. P., & Sari, R. A. (2014). Evaluasi Dampak Lingkungan Produk Kertas dengan Menggunakan Life Cycle Assessment dan Analytical Network Process. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Sistem Industri*. Volume 2 Nomor 5.
- Polymer Science Learning Center. (2017). *Polystyrene*. Mississippi: University of Southern Mississippi. <http://www.pslc.ws/macrog/styrene.htm> (diakses 31 Januari 2018)
- PRé. (2016). *SimaPro Database Manual Methods Library*. Amersfoot: PRé Consultants.
- Sahwan, F. L., Martono, D. H., Wahyono, S., & Wisoyodharmo, L. A. (2005). Sistem Pengelolaan Limbah Plastik di Indonesia. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Volume 6 Nomor 1 hlm. 311-138.
- Secrest, R. (2006). *Expanded Polystyrene Foam*. Illinois: Advameg. <http://www.madehow.com/Volume-1/Expanded-Polystyrene-Foam-EPF.html> (diakses 20 Januari 2018)
- Sekretariat Adipura. (2017). *Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. Jakarta: Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, dan B3.
- Sugiyono. (2008). *Metode Penelitian Pendidikan*. Bandung: Alfabeta.
- Suhardi, Gaudensius. (2016). *Sampah Nasional 170 Ribu Ton/Hari*. Jakarta: Media Indonesia. <http://mediaindonesia.com/news/read/26590/sampah-nasional-170-ribu-ton-hari/2016-01-30> (diakses 30 Januari 2018)
- UNEP. (1996). *Guidance Materials for the UNIDO/UNEP National Cleaner Production Centres*. Paris: UNEP Industry and Environment.
- Vaughn, J. (2009). *Waste Management: A Reference Handbook*. California: ABC-CLIO.
- Yani, M., Warsiki, E., & Wulandari, N. (2013). Penilaian Daur Hidup Botol PET (Polyethylena Terephtalate) pada Produk Minuman. *Jurnal Bumi Lestari*. Volume 13 Nomor 2. hlm. 307-317.