

Kajian Dampak Lingkungan Pada Proses Produksi Paket *Bath Toys* Dengan Pendekatan LCA

Andini Nur Atika Sari^{1*}), Rizka Novembrianto¹⁾

¹⁾Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, UPN Veteran Jawa Timur

*Corresponding Author : 22034010024@student.upnjatim.ac.id

Abstrak

Industri manufaktur mainan plastik seperti bath toys menghadapi tantangan lingkungan akibat peningkatan produksi yang memicu emisi udara dan konsumsi energi tinggi, sehingga diperlukan evaluasi dampak untuk keputusan berkelanjutan. Penelitian ini menganalisis dampak lingkungan proses produksi gate-to-gate di Jombang menggunakan software OpenLCA dengan metode CML-IA baseline dan ReCiPe 2016 Midpoint H, mencakup 9 kategori dampak seperti global warming (12.19 kg CO₂ eq/paket), terrestrial acidification (1.31 kg SO₂ eq/paket), dan fine particulate matter (0.38 kg PM_{2.5} eq/paket) berdasarkan data 1533 paket tahun 2025. Hasil mengidentifikasi proses spray sebagai hotspot dominan (kontribusi >50% semua dampak) akibat emisi SO₂, NO₂, dan CO₂.

Kata Kunci: *LCA, Emisi Udara, Hotspot, Bath Toys, Manufaktur*

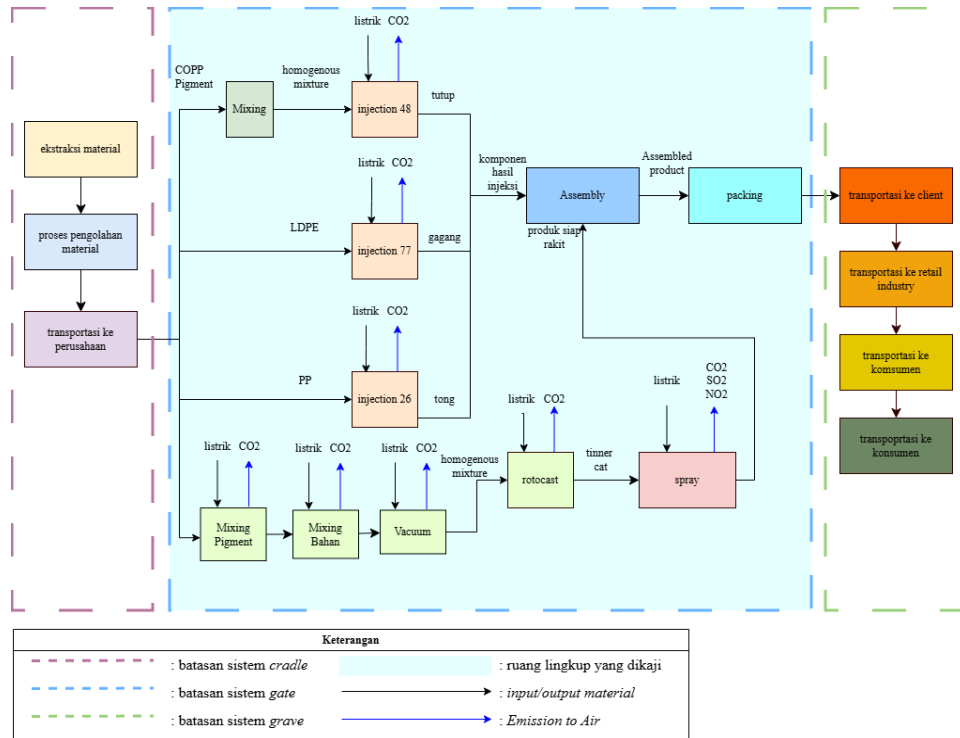
PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dan industri pada era ini sangatlah pesat, salah satunya ada industri manufaktur mainan. Tingginya daya beli konsumen terhadap produk mainan berbahan plastik, meningkatkan juga jumlah produksi yang tentunya menghasilkan dampak lingkungan, baik dari pemakaian bahan baku, proses produksi, dan juga penggunaan energi yang termasuk di dalamnya (Gunawan & Ferdhian, 2020). Namun, pertumbuhan ini membawa masalah serius bagi lingkungan berupa peningkatan akumulasi limbah polimer, penggunaan energi fosil yang masif pada mesin injeksi, serta potensi emisi zat kimia berbahaya dari proses pewarnaan. Hal tersebut menjadi tantangan besar bagi para pelaku industri manufaktur terkait pengambilan keputusan terkait penggunaan bahan, desain produk, maupun proses produksi agar bisa meminimalisir dampak yang ditimbulkan (Masdiana, et al., 2023). Hingga saat ini, banyak industri mainan skala menengah yang belum memiliki data kuantitatif mengenai jejak karbon dan dampak lingkungan dari aktivitas produksinya, sehingga strategi pengurangan emisi yang dilakukan seringkali tidak tepat sasaran. Analisa LCA adalah sebuah teknologi perhitungan dampak lingkungan yang umumnya menggunakan *software* dan menjadi pilihan efektif untuk mengevaluasi dan menjadi gambaran kuantitatif terhadap beban lingkungan yang dihasilkan, serta menjadi dasar untuk evaluasi internal perusahaan. Oleh karena itu, proses analisis ini bertujuan untuk menyajikan pemahaman mendalam mengenai kontribusi dampak lingkungan dari setiap tahapan dalam siklus hidup dan mempermudah perusahaan untuk mengidentifikasi titik titik kritis (hotspot) kontribusi emisi atau dampak lingkungan dari setiap proses dan mempermudah dalam penyusunan strategi pengurangan emisi berbasis data ilmiah (Arba & Thamrin, 2022). Melalui kajian ini, diharapkan bisa menyokong pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs) terutama pada target terkait dengan produksi dan konsumsi yang bertanggungjawab, aksi iklim dan perlindungan ekosistem (Sasongko, Febrijanto, Santoso, Setiawan, & Wahyono, 2025)

METODOLOGI PENELITIAN

Analisa ini berfokus pada proses produksi paket mainan yang diproduksi oleh salah satu industri manufaktur dengan target pasar mancanegara yang berlokasi di daerah Jombang, Jawa Timur. Proses utama dari pembuatan paket mainan ini adalah proses *molding injection* untuk wadah figur, kemudian proses *rotocast injection* untuk pencetakan figur mainan, proses pengecatan dari figur mainan yang telah di oven untuk menyempurnakan bentuk, kemudian ada proses perakitan figur mainan ke dalam wadah yang telah dibuat, dan produk mainan siap di packing dengan karton dan dikirim kepada pihak customer. Semua tahap tersebut yang akan dilakukan perhitungan dampak dengan menggunakan software OpenLCA dengan metode Recipe midpoint (H) 2016 dan CML IA yang relevan dengan proses produksi yang berlangsung. LCA atau biasa disebut analisis daur hidup adalah suatu metode mengenai dampak lingkungan yang mencakup proses identifikasi, pengukuran, dan Hasil evaluasi akan mendukung pengambilan keputusan melalui penyediaan data dampak yang komprehensif dan rekomendasi alternatif yang terukur, baik untuk produk, proses, maupun layanan (Luthfia, et al., 2020). Dalam analisis LCA, informasi yang dimuat dapat digunakan dalam berbagai aspek, baik untuk perbandingan pilihan desain, peningkatan produk, monitoring kondisi lingkungan sesuai peraturan/ketentuan yang berlaku, serta memberikan acuan untuk klaim produk lingkungan. Data mengenai biaya produksi, pemasaran, dan penerimaan konsumen tidak disertakan dalam analisis LCA ini, karena LCA merupakan salah satu sumber informasi yang memberikan pemahaman terhadap dampak lingkungan yang berkesinambungan dengan suatu keputusan (Arba & Thamrin, 2022).

Tujuan utama (goal) dilaksanakannya kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) ini adalah untuk mendukung pengambilan keputusan strategis dan operasional yang berorientasi pada keberlanjutan (Awantara, 2014). Penerapan LCA ini secara fundamental konsisten dengan alasan dilakukannya kajian, yakni ambisi perusahaan untuk mencapai keunggulan lingkungan dalam industri manufaktur dan memenuhi ekspektasi pasar. Kajian LCA ini tidak hanya sekedar memenuhi persyaratan prosedural, melainkan ditujukan untuk aplikasi yang mendorong perubahan nyata dalam kinerja lingkungan. Secara spesifik, tujuan penerapan kajian ini adalah untuk melakukan identifikasi area (hotspot) untuk perbaikan kinerja lingkungan produk perusahaan, penentuan tahap daur hidup yang menghasilkan dampak paling signifikan, serta penilaian dampak lingkungan yang berfungsi sebagai data awal (*baseline*) dan penghitungan jejak lingkungan, serta memberikan informasi berbasis data untuk pengambilan keputusan. Scope atau ruang lingkup dari kajian adalah Produk paket mainan yang dikaji secara spesifik menggunakan batasan gate-to-gate, yang artinya fokus kajian adalah pada seluruh aktivitas produksi mulai dari persiapan bahan baku hingga produk telah selesai produksi dan dikemas sebelum dilakukan distribusi (Khairona, 2020), adapun visualisasi dari batasan sistem dari produk ini terlihat pada gambar 1. Karena batasan kajian yang dipilih adalah Gate-to-Gate (hanya mencakup proses manufaktur di dalam pabrik) dan tujuannya adalah menilai dampak lingkungan dari aktivitas produksi, maka kajian ini menggunakan Unit Deklarasi (*Declared Unit*). Unit deklarasi dari kajian ini adalah 1 paket produk *Bath Toys*. Pemilihan unit ini memastikan bahwa semua data inventaris (input material, energi, dan output emisi/limbah) yang terjadi di departemen *Injection*, *Rotocast*, *Spray*, *Assembly*, dan *Packing* dapat dinormalisasi untuk perbandingan dan interpretasi yang seragam. Pada saat running di aplikasi OpenLCA, data yang digunakan adalah data keseluruhan produksi dalam tahun 2025, dengan kuantitas produk sebanyak 1533 paket *Bath Toys*.



Gambar 1. Batasan Sistem Kajian

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Inventory Analysis

Inventory analysis meliputi penentuan parameter yang digunakan untuk semua perhitungan dampak lingkungan, yang termasuk dalam tahap ini adalah data bahan baku, data bahan pendukung, emisi yang dihasilkan dan kadar karbon pada semua proses produksi (Prarono, Ariani, Sopiawati, & Suharsih, 2025). Pada tabel 1 berikut merupakan data input dan output dari proses pembuatan *Bath Toys*:

Tabel 1. Data Bahan Baku dan Material Pendukung

Unit proses	Data Inventory	Kuantitas (Kg)
Mixing Inject	COPP	187.83
	Pigment AB	0.7689
	majun	0.03
	Pelumas	0.14568
Inject 48	Campuran COPP dan Pigment AB	188.6
	majun	21.36
	pelumas	102.7643
Inject 77	LDPE	665.95
	Majun	6.8

Unit proses	Data Inventory	Kuantitas (Kg)
	Pelumas	32.69772
Inject 26	Polypropylene	196.48
	Majun	8.74
	Pelumas	42.03992
Mixing Pigment	Pigment	1.42
Mixing Bahan	Bahan Mainan	392.82
	Pigment Mainan Homogen	1.42
Vacuum	Campuran Pigment Homogen dan Bahan Mainan	394.24
Rotocast Injection	Material Setelah Vacuum	394.23
	Majun	2.17
Oven	Mainan Setelah Cetak	394.23
Spray	Mainan Siap Cat	394.23
	Cat	52.44
	Thinner	77.52
	Majun	228.61
Assembly	Laras (Ember)	665.96
	Mainan Siap Rakit	524.19
	Pegangan Ember	196.48
	Penutup Ember	187.83
Packing	Isolasi	5.2
	Karton	433.37
	Paket Siap Packing	1574.45

Sumber: Data Perusahaan (2025)

Bahan baku dan bahan pendukung ini berasal dari pemasok dan tidak dihasilkan secara mandiri oleh perusahaan. Selain bahan baku dan bahan pendukung, terdapat juga penggunaan energi listrik untuk setiap mesin pada tiap departemen produksi, pada tabel 2 disajikan data penggunaan energi listrik untuk setiap mesin pada unit proses yang terlibat:

Tabel 2. Data penggunaan Listrik

Proses	Alat	Daya (KW)	Jumlah Mesin	Waktu Operasional (jam)	Konsumsi Listrik (KWh)	Konsumsi Listrik (MWh)
Injection	mixing	3	1	0.22	0.65493171	0.0007
	Inject 48	16	1	154	2464	2.46
	inject 77	35	1	49	1715	1.72
	inject 26	19	1	63	1197	1.2
Roto	Mixing pigmen	0.75	1	11	8.185553124	0.0082
	Mixing bahan	5.5	1	11	60.02738957	0.06
	Mesin vakum roto	1.5	1	11	16.37110625	0.0164
	Inject roto	0.75	6	11	8.185553124	0.0082
Spray	Oven	18	1	20.85714286	375.4285714	0.38
	Pad printing	6.6	7	303	13998.6	14
Assembly	Mesin laser date code	0.03	2	2.129166667	0.063875	0.0001

Sumber: Data Perusahaan (2025)

Dari penggunaan energi listrik pada setiap mesin yang beroperasi terdapat emisi berupa CO₂ yang menyebabkan potensi *global warming*. Perhitungan emisi CO₂ ini menyesuaikan dengan metode *tier-2* yang merupakan pendekatan perhitungan berdasarkan jenis proses dan kondisi spesifik proses yang berlaku di negara yang dimaksud (ESDM, 2017). Nilai faktor emisi CO₂ untuk wilayah Jawa timur adalah 0.87, dengan persamaan perhitungan sebagai berikut:

$$\Sigma CO_2 = \text{Konsumsi Listrik (KWh)} \times EF \text{ (ton CO}_2\text{/MWh)} \quad (1)$$

Dimana; EF adalah nilai faktor emisi

Pada tabel 3 berikut ini disajikan hasil akhir dari perhitungan emisi CO₂ :

Tabel 3. Data Emisi CO₂

Unit Proses	konsumsi listrik (KWh)	Emisi CO ₂ (Kg)
Mixing Inject	0.65493171	0.569790588
Inject 48	2464	2143.68
inject 77	1715	1492.05
inject 26	1197	1041.39
Mixing pigmen	8.185553124	7.121431218
Mixing bahan	60.02738957	52.22382893
Mesin vakum roto	16.37110625	14.24286244
Inject roto	8.185553124	7.121431218
Oven	375.4285714	326.6228571
Pad printing	13998.6	12178.782
Mesin laser date code	0.063875	0.05557125

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Selain menghasilkan emisi CO₂ yang dihasilkan dari penggunaan energi listrik, terdapat juga emisi udara yang dihasilkan dari hasil pengujian cerobong pada proses spray, dengan rincian data hasil pengukuran di lapangan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Diameter Cerobong (d)} &= 0.58 \text{ m} \\ \text{Tinggi Cerobong (h)} &= 4.8 \text{ m} \\ \text{Kecepatan (V)} &= 5.2 \text{ m/s} \\ \text{Konsentrasi SO}_2 &= 15 \text{ mg/m}^3 \\ \text{Konsentrasi NO}_2 &= 13 \text{ mg/m}^3 \end{aligned}$$

Dari data pengukuran tersebut, dapat dilakukan perhitungan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Luas (A)} &= \frac{1}{4} \times \pi d^2 \\ \text{Laju Alir (Q)} &= V \times A \\ \text{Beban Emisi (E)} &= C \times Q \times \frac{10^{-6} \text{ kg}}{\text{mg}} \times 3600 \frac{\text{detik}}{\text{jam}} \times \text{waktu operasional} \end{aligned}$$

Dari perhitungan dengan menggunakan persamaan tersebut, didapatkan hasil beban emisi seperti yang tercantum pada tabel 4.

Tabel 4. Emisi Spray

parameter	Beban Emisi (E)
SO ₂	22.47
nitrogen oksida (NO ₂)	197.72

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

2. Perhitungan Dampak

Pada kajian ini, terdapat 9 kategori dampak yang diperhitungkan dengan menggunakan *Software OpenLCA*, adapun dampak yang dipilih disajikan dalam tabel 5 berikut ini:

Tabel 5. Kategori Dampak

Kategori Dampak	Metode
<i>Acidification</i>	CML-IA baseline
<i>Eutrophication</i>	CML-IA baseline
<i>Human toxicity</i>	CML-IA baseline
<i>Photochemical oxidation</i>	CML-IA baseline
<i>Fine particulate matter formation</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)
<i>Global warming</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)
<i>Ozone formation, Human health</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)
<i>Terrestrial acidification</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)

Sumber: Software OpenLCA 2.5 (2025)

Terdapat 2 metode evaluasi yang digunakan pada kajian ini, diantaranya yaitu *CML-IA baseline* yang berfokus pada aliran fisik zat (emisi dan konsumsi sumber daya), kemudian metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang berfokus untuk menjembatani dampak yang menggunakan rentang waktu dan penilaian resiko yang seimbang, Menggunakan data dan model dampak yang lebih *up-to-date* daripada CML. Varian (H - Hierarchies) mencerminkan penilaian risiko jangka panjang dan jangka pendek yang seimbang (Farhah, Chaerul, & Tomo, 2025).

Adapun pengertian dari tiap kategori dampak adalah sebagai berikut:

a) Acidification

Acidification menggambarkan efek pengasaman akibat emisi seperti SO₂, NO_x ke udara, yang bereaksi secara kimiawi membentuk deposisi asam pada tanah dan air. Kategori ini diukur dalam satuan SO₂-eq dalam Life Cycle Assessment (LCA) (Committee, 1982).

b) Eutrophication

Eutrophication merujuk pada pengkayaan nutrisi berlebih, terutama nitrogen dan fosfor, di sistem air yang menyebabkan pertumbuhan alga berlebihan serta kekurangan oksigen (Tosepu, 2024). Hal ini merusak kehidupan akuatik, mengurangi biodiversitas, dan menciptakan zona mati di perairan.

c) Human Toxicity

Human Toxicity mencakup potensi efek buruk pada kesehatan manusia dari paparan zat toksik seperti logam berat, pestisida, dan bahan kimia industri. Paparan ini dapat menyebabkan masalah pernapasan, gangguan neurologis, hingga kanker, tergantung dosis dan jalur masuk. Kategori ini sering dibedakan menjadi toksisitas kanker dan non-kanker dalam metode LCIA (Laliyanto, et al., 2024).

d) Photochemical Oxidation

Photochemical Oxidation melibatkan pembentukan smog fotokimia dari reaksi senyawa organik volatil (VOC) dan NO_x di bawah sinar matahari, menghasilkan ozon permukaan dan polutan sekunder (Siburian, 2020). Dampaknya mencakup penurunan kualitas udara, kerusakan tanaman,

dan masalah kesehatan pernapasan. Dalam LCA, ini diukur sebagai potensi pembentuk ozon fotokimia.

e) Fine Particulate Matter Formation

Fine Particulate Matter Formation berkaitan dengan pembentukan partikel halus (PM2.5 dan lebih kecil) (mannan & Al-Ghamdi, 2021) dari emisi yang dapat menembus paru-paru dalam, menyebabkan penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Partikel ini berasal dari pembakaran fosil dan proses industri. Kategori ini memantau pelepasan partikel yang membahayakan kesehatan manusia.

f) Global Warming

Global Warming disebabkan akumulasi gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, dan N₂O yang memerangkap panas di atmosfer, meningkatkan suhu global (Siburian, 2020). Dampaknya mencakup perubahan iklim, kenaikan permukaan laut, dan gangguan ekosistem serta masyarakat. Dalam LCA, diukur dalam kg CO₂-eq, termasuk sumber fosil, biogenik, dan perubahan lahan.

g) Ozone Formation, Human Health

Ozone Formation, Human Health mengukur pembentukan ozon troposfer (smog) dari NO_x dan VOC yang merusak saluran pernapasan manusia, memicu asma dan peradangan paru. Ozon permukaan berbeda dari ozon stratosfer yang melindungi, dan efeknya lebih parah di daerah perkotaan panas. Kategori ini fokus pada risiko kesehatan pernapasan (Sumampouw & Nelwan, 2024).

h) Ozone Formation Terrestrial Ecosystems

Ozone Formation, Terrestrial Ecosystems menilai kerusakan ozon permukaan terhadap vegetasi darat, mengurangi hasil panen dan produktivitas ekosistem. Ozon masuk melalui stomata tanaman, menghambat fotosintesis dan pertumbuhan (Sumampouw & Nelwan, 2024).

i) Terrestrial Acidification

Terrestrial Acidification menggambarkan perubahan sifat kimia tanah akibat deposisi nutrisi seperti nitrogen dan sulfur, menurunkan pH dan menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi. Dampaknya termasuk kerusakan vegetasi dan ekosistem darat, mirip dengan pengasaman air tetapi fokus pada lahan (Daud & Agustini, 2021). Dalam LCIA, ini dicirikan berdasarkan deposisi atmosfer ke tanah.

Kategori dampak tersebut kemudian dilakukan kalkulasi menggunakan software OpenLCA dengan hasil yang tercantum pada tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Dampak

Kategori Dampak	Satuan	Hasil
<i>Acidification</i>	kg SO2 eq	2408.499
<i>Eutrophication</i>	kg PO4--- eq	2.9211
<i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM2.5 eq	581.8105
<i>Global warming</i>	kg CO2 eq	18691.04268
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq	218.74512
<i>Ozone formation, Human health</i>	kg NOx eq	22.47
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NOx eq	22.47
<i>Photochemical oxidation</i>	kg C2H4 eq	96.51972
<i>Terrestrial acidification</i>	kg SO2 eq	2005.8092

Sumber: Perhitungan OpenLCA (2025)

Hasil dari perhitungan dampak tersebut masih berupa kuantitas dari seluruh produksi, namun untuk mengetahui dampak yang ditimbulkan dari proses produksi 1 paket bath toys dalam jumlah PO sebanyak 1533 paket, perlu adanya perhitungan dengan cara membagi hasil perhitungan keseluruhan dengan total paket yang telah diproduksi, dengan hasil yang tercantum pada tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Dampak dalam Unit Fungsi

Kategori Dampak	Satuan	Hasil
<i>Acidification</i>	kg SO2 eq	1.571101761
<i>Eutrophication</i>	kg PO4---eq	0.001905479
<i>Fine particulate matter formation</i>	kg PM2.5 eq	0.379524136
<i>Global warming</i>	kg CO2 eq	12.19246098
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq	0.142690881
<i>Ozone formation, Human health</i>	kg NOx eq	0.014657534
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	kg NOx eq	0.014657534
<i>Photochemical oxidation</i>	kg C2H4 eq	0.062961331
<i>Terrestrial acidification</i>	kg SO2 eq	1.308420874

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

3. Normalisasi

Tahapan normalisasi adalah tahapan untuk memperhitungkan hasil karakterisasi dibagi dengan nilai normalisasi, tahap ini digunakan untuk mempermudah perbandingan antar kategori dampak. Nilai kategori dampak dari karakterisasi dibagi dengan nilai referensi, sehingga semua kategori dampak menggunakan unit atau satuan yang sama (Firnandi, 2025). dalam kajian ini, faktor normalisasi didapatkan dari *software OpenLCA* dengan metode *CML IA Baseline* dan *ReCiPe midpoint (H) 2016* seperti yang tercantum pada tabel 8. dibawah ini merupakan faktor normalisasi yang digunakan untuk tahapan normalisasi pada setiap kategori dampak.

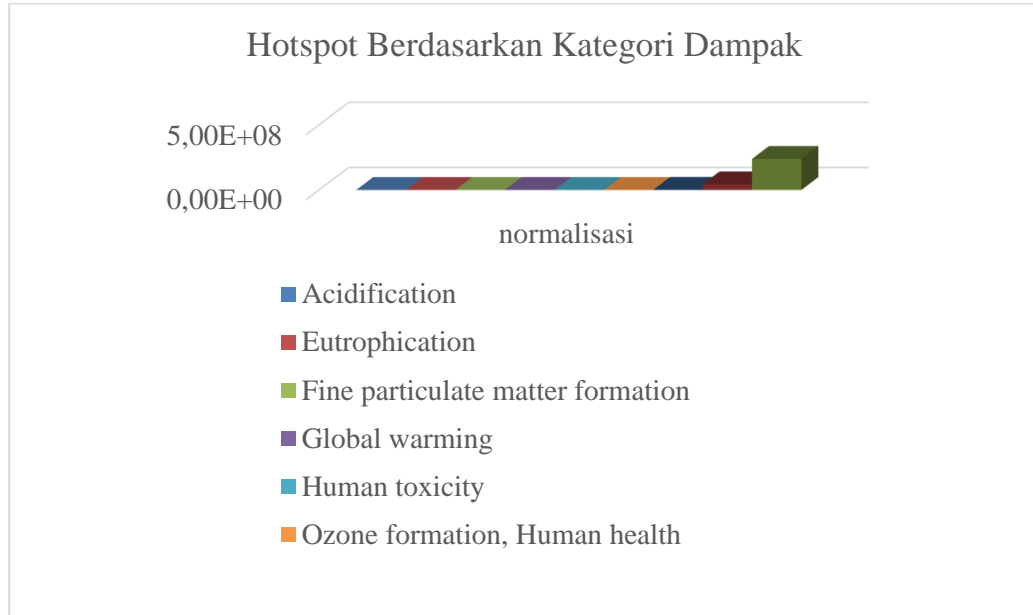
Tabel 8. Nilai Normalisasi

Kategori Dampak	Metode	Faktor Normalisasi
Acidification	CML-IA baseline	2.39E+11
Eutrophication	CML-IA baseline	1.58E+11
Human toxicity	CML-IA baseline	2.58E+12
Photochemical oxidation	CML-IA baseline	3.68E+10
Fine particulate matter formation	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1.61E-02
Global warming	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0.007415098
Ozone formation, Human health	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1.80E-05
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	2.24E-06
Terrestrial acidification	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	8.42E-06

Sumber: Software OpenLCA (2025)

Dari nilai normalisasi tersebut didapatkan hasil untuk setiap kategori dampak dan dapat ditentukan hotspot/titik kritis berdasarkan kategori dampak yang telah dipilih.

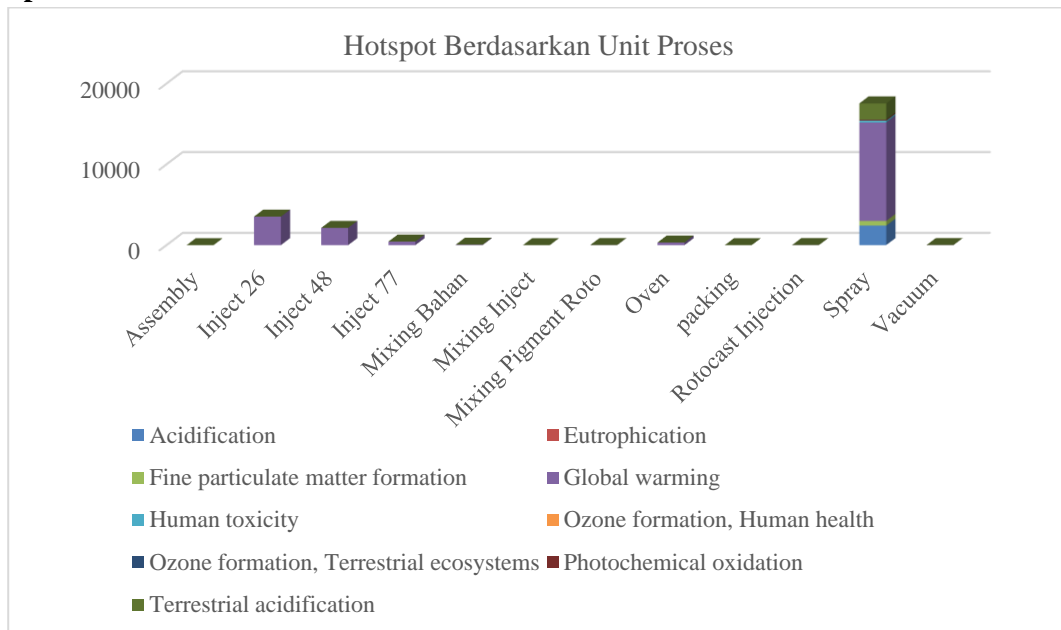
4. Hotspot Berdasarkan Kategori Dampak



Gambar 2. Hotspot Berdasarkan Kategori Dampak
 Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Dari diagram yang disajikan pada gambar 2, kategori dampak yang paling berkontribusi adalah terrestrial acidification yang disebabkan oleh emisi SO₂ dari proses *spray*.

5. Hotspot Berdasarkan Unit Proses



Gambar 3. Hotspot berdasarkan Unit Proses
 Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Dari diagram batang yang disajikan pada gambar 3, proses yang menjadi *hotspot*/kontributor terbesar adalah proses *spray*, yang secara keseluruhan berkontribusi pada semua kategori dampak. hal ini terjadi karena adanya emisi CO₂, SO₂, dan NO₂ yang merupakan *output* emisi dari proses produksi *Bath Toys*. Setelah mendapatkan *hotspot* dari unit proses dan kategori dampak, terdapat beberapa rekomendasi untuk langkah mitigasi yang dapat diterapkan oleh perusahaan untuk mencapai berbagai tujuan. Adapun rekomendasi tersebut adalah Menambah unit solar panel untuk menggantikan penggunaan energi listrik yang berasal dari fosil agar dapat mengurangi potensi global warming, melakukan audit rutin dan training operator untuk minimalkan limbah cat serta meningkatkan recycling bahan pendukung. menggunakan bio-based additives dari tanaman untuk mengganti pigmen kimia (Anonymous, 2023), mengimplementasikan lean manufacturing untuk mereduksi emisi CO₂ dan mengurangi *cycle time* produksi (Khadijah & Pratama, 2023).

KESIMPULAN

Kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) proses produksi *bath toys* (*gate-to-gate*) berhasil mengevaluasi dampak lingkungan sebagai *baseline* perusahaan dan mengidentifikasi area perbaikan kinerja lingkungan, selaras dengan tujuan pengambilan keputusan berkelanjutan. Hasil Kuantitatif menunjukkan *global warming* (12.19 kg CO₂ eq/paket) sebagai dampak dari penggunaan energi dan *terrestrial acidification* (1.31 kg SO₂ eq/paket) sebagai dampak dengan nilai tertinggi. Titik kritis pada unit proses berada pada unit *spray* yang menyumbang dominasi pada semua kategori dampak. Temuan ini memberikan data ilmiah esensial untuk menyusun strategi mitigasi, seperti penggunaan *solar panel* dan peningkatan efisiensi *lean manufacturing*, guna mencapai keunggulan lingkungan dalam industri manufaktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. (2023, Desember 21). *Eco-friendly Toys: discarding microplastics*. Retrieved from Moève Global: <https://www.moeveglobal.com/en/planet-energy/2030-goals/eco-friendly-toys-discarding-microplastics>
- Arba, Y., & Thamrin, S. (2022). Journal Review: Perbandingan Pemodelan Perangkat Lunak Life Cycle Assessment(LCA) untuk Teknologi Energi. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 142–153.
- Awantara, I. G. (2014). *Sistem manajemen lingkungan: perspektif agrokomples*. Yogyakarta: Deepublish.
- Committee, S. M. (1982). *Acidification Today and Tomorrow*. Swedia: Swedish Ministry of Agriculture Environment '82 Committee.
- Daud, F., & Agustini, A. (2021). *Buku Ajar Perubahan Lingkungan*. Lombok Tengah: Pusat Pengembangan Pendidikan dan Penelitian Indonesia.
- ESDM, K. (2017). *Kajian Penggunaan Faktor Emisi Lokal (Tier 2) dalam Inventarisasi GRK Sektor Energi*. Jakarta Pusat: Pusat Data dan Teknologi Informasi ESDM.
- Farhah, A. D., Chaerul, M., & Tomo, H. S. (2025). Dampak Lingkungan dari Teknologi Pengolahan Sampah Menjadi Energi di Indonesia: Perspektif Life Cycle Assessment. *Jurnal Serambi Engineer*, 12707 - 12718.
- Firnandi, R. (2025). *Kajian Dampak Lingkungan Pada Proses*. Surabaya: Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Gunawan, T., & Ferdhian, M. A. (2020). *Green Strategy Perusahaan Plastik Dalam Menghadapi Tantangan Lingkungan Dan Pemerintah*. *Jurnal Administrasi Bisnis*.

- Khadijah, M., & Pratama, N. R. (2023). Implementation of Lean Manufacturing to Reduce Production Cycle Times and CO2 Emission in Gate-to-Gate Life Cycle Assessment in the Biodegradable Plastic Industry . *IEOM Society International*.
- Khairona, M. A. (2020). Analisis Kategori Dampak Lingkungan Proses Pembuatan Cup Polystyrene Menggunakan Metode Life Cycle Assessment. *Dspace UII*.
- Laliyanto, Suriadi, Fatimawali, Rohayati, Abdi, D. N., Ramadhansyah, M. F., . Alfarisy, F. K. (2024). Toksikologi Lingkungan: Dampak Bahan Kimia terhadap Kesehatan. Padang: Azzia Karya Bersama.
- Luthfia, A., Abfertiawan, M. S., Nuraprianisandi, S., Pranoto, K., Samban, P. R., & Elistyandari, A. (2020). Penggunaan Life Cycle Assessment dalam Penilaian Resiko Dampak Lingkungan dan Pemilihan Alternatif Teknologi di Pertambangan Batubara Indonesia. Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan (Satu Bumi) Ke-II .
- mannan, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2021). Indoor Air Quality in Buildings: A Comprehensive Review on the Factors Influencing Air Pollution in Residential and Commercial Structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- Masdiana, Gusty, S., Asmeati, Rachman, R. M., Dendo, E. A., Ampangallo, B. A., & Aryadi, A. (2023). *Revolusi Plastik dan Lingkungan*. Makassar: CV. Tohar Media.
- Pramono, A., Ariani, M., Sopiawati, T., & Suharsih. (2025). Penerapan Prinsip-Prinsip Siklus Daur Hidup (Life Cycle Assessment) SNI ISO 14044:2017 untuk menghitung Emisi GRK pada Sistem Integrasi Tanaman-Ternak. *Warta Agrostandar*.
- Sasongko, N. A., Febrijanto, I., Santoso, A. D., Setiawan, A. A., & Wahyono, Y. (2025). Penilaian Daur Hidup: Konsep, Metode, dan Studi Kasus Energi Terbarukan. Sleman: Depublish Digital.
- Siburian, S. (2020). Pencemaran Udara dan Emisi Gas Rumah Kaca. Jakarta Selatan: Kreasi Cendekia Pustaka (KCP).
- Sumampouw, O. J., & Nelwan, J. E. (2024). Dasar Kesehatan Lingkungan Konsep Dasar Dan Pencemaran Lingkungan. Yogyakarta: Deepublish Digital.
- Tosepu, R. (2024). Analisis Kualitas Lingkungan. Ponorogo: Uwais Inspirasi Indonesia.