© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1427-1437 *ISSN 1829-8907*

Analisis *Green Logistics* pada Operasional Dapur Program Makan Bergizi Gratis Menggunakan Pendekatan *Life Cycle Assessment*

Fadly Rizky Dermawan dan Muchammad Fauzi*

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Widyatama, Bandung, Indonesia; e-mail: muchammad.fauzi@widyatama.ac.id

ABSTRAK

Program Makan Bergizi Gratis (MBG) merupakan program strategis nasional yang dijalankan melalui Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG), dengan aktivitas operasional yang berpotensi menghasilkan emisi gas rumah kaca dari penggunaan energi, transportasi, dan pengelolaan limbah. Penelitian ini merupakan studi kasus pada satu unit SPPG (SPPG X) yang bertujuan mengidentifikasi proses bisnis operasional, menganalisis emisi gas rumah kaca menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan pendekatan *gate-to-grave* mengacu pada ISO 14040:2006 dan ISO 14044:2006, serta menyusun skenario perbaikan berbasis *green logistics*. Data primer diperoleh melalui observasi, penimbangan langsung, dan wawancara pengelola selama tujuh periode operasional, kemudian diskalakan ke basis tahunan berdasarkan kondisi operasional normal dan khusus. Penilaian dampak difokuskan pada *Global Warming Potential* (GWP100) dengan pedoman IPCC dan U.S. EPA WARM. Hasil menunjukkan emisi kondisi eksisting sebesar 43.716,43 kg CO2-eq/tahun, dengan penggunaan LPG dan limbah anorganik sebagai kontributor terbesar. Skenario substitusi LPG dengan energi listrik berbasis panel surya, pengelolaan limbah organik melalui kombinasi 70% TPA, 15% kompos, dan 15% biokonversi maggot, serta penggunaan kendaraan listrik berpotensi menurunkan emisi menjadi 21.815,51 kg CO2-eq/tahun atau sekitar 50%. Skenario tersebut menghilangkan emisi langsung (*Scope* 1) dari pembakaran bahan bakar, sedangkan emisi tidak langsung dari infrastruktur energi dan kendaraan tetap menjadi aspek yang perlu dikaji lebih lanjut. Dari aspek ekonomi, OPEX selama periode evaluasi sepuluh tahun diproyeksikan turun sekitar 90% akibat penghematan biaya pembelian LPG dan bahan bakar transportasi melalui elektrifikasi, meskipun memerlukan investasi awal yang lebih tinggi. Karena penelitian hanya mencakup satu SPPG, generalisasi hasil pada SPPG lain masih terbatas. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi awal dalam pengembangan operasional SPPG yang lebih berkelanjutan.

***Kata kunci*:** Life Cycle Assessment, LCA, MBG, emisi karbon, pengelolaan limbah, energi terbarukan

ABSTRACT

The Free Nutritious Meal (MBG) Program is a national strategic initiative implemented through Nutrition Fulfillment Service Units (SPPG), whose operations may generate greenhouse gas emissions from energy use, transportation, and waste management. This study presents a case study of a single SPPG unit (SPPG X) to identify its operational business processes, assess greenhouse gas emissions using Life Cycle Assessment (LCA) with a gate-to-grave approach based on ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006, and develop green logistics-based improvement scenarios. Primary data were collected through field observations, direct weighing, and interviews with SPPG personnel across seven operational periods and subsequently scaled to an annual basis according to normal and special operating conditions. The impact assessment focused on Global Warming Potential (GWP100) using IPCC guidelines and the U.S. EPA WARM. The results showed that existing operations generated 43,716.43 kg CO2-eq/year, with LPG use and inorganic waste as the largest contributors. An improvement scenario involving the substitution of LPG with solar photovoltaic-based electricity, organic waste management through 70% landfill, 15% composting, and 15% maggot bioconversion, and the use of electric vehicles for distribution could reduce emissions to 21,815.51 kg CO2-eq/year, or approximately 50%. The scenario eliminates direct Scope 1 emissions from fuel combustion, while indirect emissions associated with energy and vehicle infrastructure require further assessment. Economically, the scenario is projected to reduce OPEX by approximately 90% over a ten-year evaluation period due to operational savings from substituting LPG and fossil transport fuels with electric power, despite requiring substantially higher upfront investment. As this study covers only one SPPG with specific operational characteristics, the findings have limited generalizability to other SPPGs. This study provides an initial reference for developing more sustainable SPPG operations.

***Keywords*:** Life Cycle Assessment, LCA, MBG, carbon emissions, waste management, renewable energy

Citation: Dermawan, F. R., dan Fauzi, M. (2026). Analisis *Green Logistics* pada Operasional Dapur Program Makan Bergizi Gratis Menggunakan Pendekatan *Life Cycle Assessment*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1427-1437, doi:10.14710/jil.24.6.1427-1437

1. PENDAHULUAN

Sistem pangan global tercatat berkontribusi terhadap sekitar sepertiga total emisi gas rumah kaca antropogenik, mencakup seluruh tahapan mulai dari produksi, pengolahan, distribusi, konsumsi, hingga pembuangan limbah pangan (Crippa et al., 2021). Poore & Nemecek (2018) menegaskan bahwa besaran dampak lingkungan pangan sangat bervariasi tergantung pada tahapan rantai pasok yang dianalisis, sehingga pendekatan *life cycle thinking* menjadi kerangka relevan untuk mengidentifikasi *hotspot* emisi pada sistem operasional pangan skala besar.

Pada konteks Indonesia, tekanan pengendalian emisi metana dari sektor persampahan menjadi perhatian khusus. Tempat Pengolahan Sampah Terpadu Bantargebang tercatat sebagai salah satu kontributor emisi metana terbesar di dunia dengan laju sekitar 6,3 ton per jam (George, 2026), padahal metana memiliki potensi pemanasan global 27 kali lebih besar dibandingkan *karbon dioksida* dalam GWP 100 tahun (U.S. EPA, 2023). Indonesia berkomitmen menurunkan emisi metana sebesar 30% tahun 2030 melalui *Global Methane Pledge* (WRI, 2025).

Program Makan Bergizi Gratis (MBG) menghadirkan tantangan baru dalam sistem operasional pangan skala besar. Program ini dijalankan melalui Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) dengan kapasitas produksi 3.000-3.500 porsi per hari per dapur pada 27.418 unit secara nasional (Badan Gizi Nasional, 2026), sehingga aktivitas operasional sekecil apa pun pada satu dapur berpotensi terakumulasi menjadi dampak lingkungan yang signifikan secara nasional. Operasional dapur MBG menghasilkan tiga sumber emisi utama yang saling terkait, yaitu konsumsi energi LPG untuk memasak, aktivitas transportasi distribusi, serta timbulan limbah organik dan anorganik dari sisa produksi maupun konsumsi.

Beberapa studi *Life Cycle Assessment* (LCA) pada sistem pangan dan bangunan menunjukkan bahwa penerapan teknologi maupun skenario perbaikan yang tepat mampu menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan. Studi pada sistem integrasi tanaman-ternak di Indonesia melaporkan penurunan emisi hingga 80% melalui penerapan teknologi ramah lingkungan (Ali Pramono et al., 2025), sementara penerapan konsep *Urban Net Zero Energy Building* mampu menurunkan emisi siklus hidup sebesar 40% dibandingkan skenario *business-as-usual* (Li & Feng, 2025). Pada sektor *food service* dan katering, metode LCA telah banyak diterapkan untuk mengidentifikasi titik kritis emisi mulai dari proses penyiapan energi memasak, logistik distribusi, hingga skenario pengelolaan akhir limbah (Avató & Mannheim, 2022; Chung et al., 2022; Takacs & Borrion, 2020). Konsep *green logistics* turut relevan karena berfokus pada pengurangan dampak lingkungan aktivitas operasional dan distribusi melalui efisiensi energi, transportasi, dan pengelolaan limbah pada rantai pasok (Veloso et al., 2025). Kajian jejak karbon kemasan pangan turut menunjukkan bahwa kemasan sekali pakai pada layanan distribusi makanan dapat menjadi kontributor signifikan terhadap total jejak karbon sistem pangan (Arunan & Crawford, 2021; Bux et al., 2025). Konsep green logistics sendiri, sebagaimana didefinisikan A. C. McKinnon (2015), berfokus pada pengurangan eksternalitas lingkungan dari aktivitas transportasi, penyimpanan, dan penanganan barang melalui efisiensi energi, optimasi transportasi, dan pengelolaan limbah pada rantai pasok; namun penerapan kerangka ini pada sistem operasional dapur institusi skala besar seperti SPPG masih jarang dikaji secara empiris. Perkembangan literatur green logistics dalam beberapa tahun terakhir menegaskan bahwa cakupan konsep ini tidak dapat direduksi hanya pada efisiensi transportasi, melainkan mencakup pula pengelolaan material, penanganan limbah, dan desain kemasan sebagai dimensi yang setara pentingnya dalam upaya menurunkan eksternalitas lingkungan pada rantai pasok jasa (Chepurna et al., 2025; Jayarathna et al., 2023).

Hingga saat ini belum terdapat kajian yang mengevaluasi dampak lingkungan sistem operasional dapur MBG secara menyeluruh dan terintegrasi antara energi, transportasi, dan limbah dalam satu kerangka analisis. Sebagian besar pendekatan yang ada masih berfokus pada pengelolaan limbah secara parsial tanpa mempertimbangkan kontribusi sumber emisi lain, sehingga menimbulkan ketidakpastian dalam menentukan strategi pengelolaan yang paling efektif dan berkelanjutan bagi operasional SPPG.

1.2. Kebaruan dan Kesenjangan Penelitian

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada tiga aspek. Pertama, penerapan kerangka green logistics secara terintegrasi pada studi LCA operasional dapur institusi skala besar, yang mengombinasikan efisiensi energi, transportasi, dan pengelolaan limbah dalam satu unit analisis, alih-alih mengevaluasi masing-masing aspek secara terpisah. Kedua, penyusunan skenario perbaikan yang mempertimbangkan kelayakan lingkungan, ekonomi (melalui perbandingan CAPEX-OPEX dan Total Cost of Ownership), dan sosial secara simultan. Ketiga, penyediaan data dasar (baseline) emisi operasional SPPG yang dapat menjadi acuan awal replikasi pada skala nasional Program MBG, mengingat kajian empiris serupa pada konteks dapur institusi skala besar di Indonesia masih sangat terbatas. Kebutuhan ini juga sejalan dengan temuan tinjauan bibliometrik terbaru yang menunjukkan bahwa literatur green logistics masih terfragmentasi antara studi yang berfokus pada satu praktik tunggal (misalnya transportasi atau pengemasan saja) dan studi yang menilai kinerja lingkungan, ekonomi, serta sosial secara simultan, sehingga penelitian yang mengintegrasikan LCA dengan perancangan skenario green logistics multidimensi pada konteks dapur institusi masih menjadi kebutuhan yang belum banyak terisi (Kamewor et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi proses bisnis operasional SPPG X yang mencakup

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

aktivitas produksi, konsumsi energi LPG, transportasi, dan pengelolaan limbah; menganalisis emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses bisnis operasional tersebut menggunakan metode LCA; dan menyusun skenario perbaikan berbasis green logistics guna menurunkan dampak lingkungan dan mengevaluasi keberlanjutan pada Program MBG.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) mengacu pada ISO 14040:2006 dan ISO 14044:2006, yang terdiri atas empat tahapan utama: penentuan tujuan dan ruang lingkup (*goal and scope definition*), inventarisasi siklus hidup (*life cycle inventory*), penilaian dampak siklus hidup (*life cycle impact assessment*), dan interpretasi. Penelitian dilaksanakan pada SPPG X dengan pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan dan wawancara pengelola selama tujuh periode operasional.

2.1. Penentuan *Goal* dan *Scope*

Penelitian ini bertujuan mengkuantifikasi dampak lingkungan dari sistem operasional dapur SPPG X pada kategori dampak Global Warming Potential dengan horizon waktu 100 tahun (GWP100), dinyatakan dalam kilogram karbon dioksida ekuivalen (kg CO2-eq), mengacu pada nilai karakterisasi IPCC (2006). Functional unit yang digunakan adalah operasional satu dapur SPPG X selama satu tahun. Batas sistem (*system boundary*) yang digunakan adalah *gate-to-grave*, yaitu mencakup seluruh proses mulai dari produksi makanan di dapur, penggunaan energi LPG, distribusi makanan, konsumsi oleh penerima manfaat, hingga pengelolaan akhir limbah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Proses sebelum bahan baku diterima di dapur, seperti produksi dan distribusi bahan baku pangan dari pemasok (*upstream agricultural production*), tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian karena memerlukan data primer dari pihak ketiga (petani dan distributor bahan baku) yang tidak tersedia dan berada di luar kendali operasional SPPG.

Pengecualian tahap ini perlu dipahami sebagai keterbatasan metodologis yang memengaruhi interpretasi hasil: berdasarkan studi jejak karbon pangan global, tahap produksi bahan baku (budi daya dan peternakan) umumnya menyumbang porsi terbesar dari total jejak karbon suatu produk pangan, bahkan dapat mencapai 70-90% dari total emisi siklus hidup penuh (*cradle-to-grave*)(Poore & Nemecek, 2018). Dengan demikian, total emisi yang dilaporkan pada penelitian ini merepresentasikan emisi pada tahap *gate-to-grave* operasional SPPG saja, bukan jejak karbon penuh dari makanan yang diproduksi, sehingga perbandingan hasil penelitian ini dengan studi LCA pangan yang menggunakan batas sistem *cradle-to-grave* perlu dilakukan secara hati-hati.

2.2. Pengumpulan Data Primer

Data primer dikumpulkan melalui observasi lapangan, penimbangan langsung timbulan limbah dan konsumsi bahan bakar, serta wawancara mendalam semi-terstruktur. Wawancara melibatkan tiga orang responden kunci, yaitu Kepala SPPG X selaku penanggung jawab operasional, koordinator bagian dapur dan produksi pangan, serta staf logistik dan armada distribusi. Instrumen pengumpulan data yang digunakan berupa panduan wawancara terstruktur mengenai alur proses bisnis, jam kerja alat masak, serta rute dan ritase distribusi; lembar pencatatan observasi (*checklist*); serta timbangan digital terkalibrasi untuk mengukur timbulan limbah organik dan anorganik harian. Data hasil wawancara kemudian dilengkapi dengan catatan operasional internal SPPG, seperti logbook produksi, nota pembelian LPG, dan manifest distribusi harian.

Data observasi dan penimbangan dilakukan secara berkala selama tujuh periode operasional (September 2025-Maret 2026), mencakup kondisi operasional normal maupun kondisi khusus (libur sekolah, hari besar nasional, dan Ramadan), untuk menangkap variasi operasional sepanjang tahun sebelum diskalakan ke basis tahunan. Validasi data operasional dilakukan melalui triangulasi antara tiga sumber, yaitu (1) hasil penimbangan langsung di lapangan, (2) catatan operasional internal SPPG X (logbook produksi, nota pembelian LPG, dan manifest distribusi), dan (3) konfirmasi ulang (member checking) kepada pengelola SPPG terhadap rekapitulasi data sebelum digunakan dalam perhitungan LCI, guna memastikan konsistensi dan meminimalkan bias pengukuran maupun pencatatan.

2.3. Inventory Data (*Life Cycle Inventory*)

Tahap *Life Cycle Inventory* (LCI) merupakan tahapan identifikasi, pengumpulan, dan penghitungan data input (bahan bakar dan energi) serta *output* (emisi dan timbulan limbah) yang dikumpulkan secara keseluruhan dari setiap unit proses operasional SPPG X. Data *input* LCA berasal dari data primer hasil observasi dan penimbangan langsung selama tujuh periode operasional (Sep 2025-Mar 2026), yang kemudian diskalakan ke basis tahunan dengan memisahkan kondisi operasional normal dan kondisi khusus (libur sekolah, hari besar nasional, dan Ramadan), mengikuti prinsip data *representativeness* pada ISO 14044 (ISO, 2006). Data sekunder berupa faktor emisi diperoleh dari (IPCC, 2006, 2021) dan (U.S. EPA, 2023). Emisi metana dari dekomposisi limbah organik di TPA dihitung menggunakan pendekatan estimasi pembentukan metana berbasis parameter IPCC, sedangkan emisi dari limbah anorganik dihitung menggunakan pendekatan *embodied carbon* berdasarkan jenis material kemasan. **Tabel 1** merupakan data LCI pada sistem operasional SPPG X.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 1. Hasil Life Cycle Inventory (LCI) Sistem Operasional SPPG X

Parameter	Produksi Makanan (LPG)	Distribusi (Transportasi)	Limbah Organik (TPA)	Limbah Anorganik	Unit
INPUT					
LPG	5.529,60	-	-	-	kg/tahun
Jarak tempuh kendaraan (PP)	-	12.326,33	-	-	km/tahun
Konsumsi Pertalite	-	1.232,63	-	-	L/tahun
Limbah organik masuk TPA	-	-	6.932,27	-	kg/tahun
Limbah anorganik (kemasan)	-	-	-	7.345,26	kg/tahun
OUTPUT (Emisi)					
CO2 (pembakaran langsung)	16.494,80	2.821,50	-	-	kg/tahun
CH4 (fosil, dari pembakaran)	16,42	10,98	-	-	kg CO2eq/tahun
N2O (fosil, dari pembakaran)	12,98	9,76	-	-	kg CO2eq/tahun
CH4 biogenik (dekomposisi anaerobik)	-	-	9.358,57	-	kg CO2eq/tahun
N2O (dekomposisi limbah organik)	-	-	473,12	-	kg CO2eq/tahun
Embodied carbon (kemasan)	-	-	-	14.518,30	kg CO2eq/tahun
Total Emisi per Sumber	**16.524,20**	**2.842,24**	**9.831,69**	**14.518,30**	**kg CO2eq/tahun**

Sumber: Data primer SPPG X (2025-2026); IPCC (2006, 2023); U.S. EPA WARM v16 (2023)

2.4. Faktor Emisi dan Asumsi Perhitungan

Untuk menjamin transparansi dan replikabilitas penelitian, berikut disajikan persamaan dan asumsi utama yang digunakan pada setiap kategori sumber emisi.

(a) Emisi dari pembakaran LPG dihitung dengan persamaan:

$$E_{LPG} = Q_{LPG} \times EF_{LPG}$$

dengan ELPG = emisi gas rumah kaca dari LPG (kg CO2-eq/tahun), QLPG = massa LPG yang dikonsumsi (kg/tahun), dan EFLPG = faktor emisi pembakaran LPG (kg CO2-eq/kg LPG) yang mencakup kontribusi CO2, CH4, dan N2O hasil pembakaran, mengacu pada IPCC (2006) Tier 1 default combustion emission factors untuk LPG.

(b) Emisi dari transportasi dihitung dengan persamaan:

$$FC = D/FE$$

$$E_{transportasi} = FC \times EF_{fuel}$$

dengan D = total jarak tempuh kendaraan operasional (km/tahun), FE = efisiensi konsumsi kendaraan (km/liter), FC = estimasi konsumsi bahan bakar (liter/tahun), dan EFfuel = faktor emisi bahan bakar (kg CO2-eq/liter). Data primer yang diperoleh pada aktivitas transportasi berupa jarak tempuh kendaraan, sedangkan konsumsi bahan bakar tidak tersedia sebagai catatan aktual. Oleh karena itu, konsumsi Pertalite diestimasi berdasarkan total jarak tempuh (12.326,33 km/tahun) dan asumsi efisiensi kendaraan sebesar 10 km/liter, menghasilkan estimasi konsumsi sebesar 1.232,63 liter/tahun. Emisi CO2, CH4, dan N2O dari pembakaran Pertalite dihitung menggunakan faktor emisi IPCC (2006) Volume 2 Chapter 3, yaitu 2,289 kg CO2/liter, 3,3×10-4 kg CH4/liter, dan 2,9×10-5 kg N2O/liter.

(c) Emisi metana dari limbah organik di TPA dihitung menggunakan pendekatan estimasi pembentukan metana berbasis kandungan karbon organik yang dapat terurai, dengan parameter mengacu pada IPCC (2006).

$$CH_4 \text{ dihasilkan}(t) = MSW_t \times DOC \times DOCf \times F \times (16/12)$$

dengan MSWt = massa limbah organik yang dibuang pada tahun t (kg), DOC = degradable organic carbon (fraksi karbon organik yang dapat terurai), DOCf = fraksi DOC yang benar-benar terdekomposisi, F = fraksi metana dalam gas TPA, dan 16/12 = faktor konversi massa karbon ke metana, dengan nilai parameter mengacu pada IPCC (2006) Volume 5 Chapter 3. Nilai parameter yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Parameter Estimasi Pembentukan Metana

Parameter	Nilai	Sumber
DOC	0,15	IPCC (2006)
DOCf	0,50	IPCC (2006)
F	0,50	IPCC (2006)
GWP100 CH4	27	IPCC (2021)
GWP100 N2O	273	IPCC (2021)

Emisi CH4 kemudian dikonversi ke kg CO2-eq menggunakan nilai GWP100 = 27 (IPCC, 2023), sedangkan emisi N2O dikonversi menggunakan GWP100 = 273 (IPCC, 2021).

(d) Emisi dari limbah anorganik dihitung menggunakan pendekatan embodied carbon:

$$E_{anorganik} = \sum (massa_i \times EF_{embodied,i})$$

dengan massai = massa kemasan anorganik jenis ke-i yang dibuang (kg/tahun) dan EFembodied,i = faktor emisi tertanam (*embodied carbon*) untuk memproduksi material kemasan jenis ke-i (kg CO2-eq/kg material), mengacu pada database U.S. EPA (2023) yang mencakup emisi dari ekstraksi bahan baku hingga produksi material kemasan, bukan emisi dari proses dekomposisi, karena sebagian besar material anorganik seperti plastik dan komposit tidak terdekomposisi secara biologis dalam skala waktu yang relevan. Dalam penelitian ini digunakan nilai representatif sebesar 2,0 kg CO_2-eq/kg material sebagai faktor embodied carbon untuk kemasan anorganik, dengan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

mempertimbangkan keterbatasan ketersediaan faktor yang spesifik terhadap kombinasi material kemasan yang digunakan. Nilai tersebut kemudian diuji melalui analisis sensitivitas pada rentang 1,5–2,5 kg CO_2-eq/kg material. Untuk mengevaluasi pengaruh pemilihan nilai faktor tersebut terhadap hasil, dilakukan analisis sensitivitas (dibahas lebih lanjut pada Bagian 3.3).

Seluruh emisi CH4 dan N2O dikonversi ke kg CO2-eq menggunakan nilai karakterisasi GWP100 IPCC AR6 (2021), yaitu CH4 = 27 dan N2O = 273, sedangkan emisi CO2 langsung digunakan tanpa konversi (faktor karakterisasi = 1).

Setiap faktor emisi digunakan sesuai dengan karakteristik aktivitas yang dianalisis. Emisi penggunaan LPG dihitung berdasarkan jumlah LPG yang digunakan dan faktor emisi pembakaran LPG. Emisi transportasi dihitung berdasarkan jarak tempuh kendaraan operasional yang diperoleh melalui observasi rute, kemudian dikonversi menjadi estimasi konsumsi bahan bakar berdasarkan asumsi efisiensi kendaraan. Emisi limbah organik dihitung menggunakan pendekatan estimasi pembentukan metana berbasis parameter IPCC untuk proses dekomposisi anaerobik di TPA, sedangkan emisi pengomposan dihitung berdasarkan faktor emisi CH4 dan N2O dari IPCC. Untuk limbah anorganik, pendekatan embodied carbon digunakan berdasarkan jenis material kemasan dan faktor yang tersedia dalam U.S. EPA WARM Version 16.

2.5. Penentuan Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Tahapan ini dilakukan untuk mengevaluasi seberapa besar potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari data inventarisasi pada tahap LCI. Karakterisasi dilakukan dengan mengalikan setiap parameter emisi dengan faktor karakterisasi *Global Warming Potential* (GWP100), yaitu CH4 = 27 dan N2O = 273 (IPCC, 2021), sehingga seluruh emisi dapat dinyatakan dalam satuan yang setara yaitu kg CO2-eq. Emisi dari pembakaran LPG dan bahan bakar kendaraan dihitung berdasarkan faktor emisi IPCC (2006), emisi dari dekomposisi limbah organik di TPA dihitung menggunakan pendekatan estimasi pembentukan metana berbasis parameter (IPCC, 2006), dan emisi dari limbah anorganik dihitung menggunakan pendekatan embodied carbon berdasarkan U.S. EPA (2023).

2.6. Diagram Alur Penelitian

Gambar 1 menyajikan diagram alur tahapan penelitian mulai dari penentuan tujuan dan ruang lingkup hingga penyusunan skenario perbaikan berbasis green logistics, mengikuti kerangka kerja standar LCA sesuai ISO 14040:2006 dan ISO 14044:2006.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil LCIA

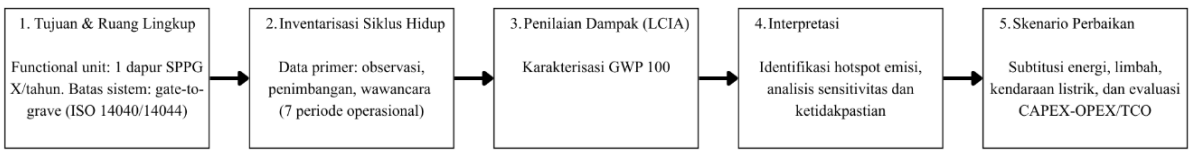
SPPG X memproduksi rata-rata 3.120 porsi makanan per hari menggunakan LPG sebagai sumber energi memasak, dengan konsumsi rata-rata 18,7 kg per hari. Berdasarkan hasil karakterisasi Life Cycle Impact Assessment, total emisi gas rumah kaca pada kondisi eksisting mencapai 43.716,43 kg CO2-eq per tahun, yang bersumber dari empat proses utama yaitu penggunaan LPG, transportasi, pengelolaan limbah organik, dan pengelolaan limbah anorganik, sebagaimana dirangkum pada **Tabel 3**.

Kapasitas operasional SPPG dalam pelaksanaannya mengalami perubahan mengikuti ketentuan dan standar operasional yang berlaku. Pada periode awal operasional, kapasitas maksimum yang digunakan mencapai sekitar 4.500 porsi per hari, sedangkan ketentuan yang lebih baru menetapkan kapasitas sekitar 3.000 porsi per hari. SPPG X pada periode pengamatan secara konsisten beroperasi hingga mencapai kapasitas maksimum yang ditetapkan pada masing-masing periode. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik operasional SPPG X dipengaruhi oleh kapasitas pelayanan yang berlaku pada periode penelitian. Dengan karakteristik tersebut, hasil penelitian ini terutama merepresentasikan kondisi operasional SPPG dengan tingkat utilisasi kapasitas yang tinggi. Oleh karena itu, hasil penelitian tidak dimaksudkan sebagai nilai yang secara langsung berlaku untuk seluruh SPPG, tetapi dapat menjadi initial operational baseline yang mendukung perbandingan pada penelitian selanjutnya terhadap SPPG lain dengan karakteristik kapasitas dan pola operasional yang serupa.

Tabel 3. Rekapitulasi Emisi Gas Rumah Kaca Kondisi Eksisting SPPG X

Sumber Emisi	Emisi (kg CO2-eq/tahun)	Kontribusi (%)
Penggunaan LPG	16.524,20	37,8
Transportasi	2.842,24	6,5
Limbah Organik (TPA)	9.831,69	22,5
Limbah Anorganik (Embodied Carbon)	14.518,30	33,2
Total	**43.716,43**	**100**

Sumber: hasil analisis Life Cycle Assessment (LCA)



Gambar 1. Diagram Alur Tahapan Penelitian

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

3.1.1. Emisi dari Penggunaan LPG

Penggunaan LPG merupakan kontributor emisi terbesar dengan nilai 16.524,20 kg CO2-eq per tahun atau 37,8% dari total emisi. Emisi ini didominasi oleh CO2 yang dihasilkan langsung dari proses pembakaran LPG untuk memasak, yang dilakukan secara rutin setiap hari dalam skala besar untuk memenuhi kebutuhan produksi. Tingginya kontribusi LPG menunjukkan bahwa konsumsi energi pada tahap produksi makanan menjadi hotspot utama dalam sistem operasional SPPG X, sejalan dengan temuan bahwa konsumsi energi pada proses produksi makanan merupakan kontributor utama emisi pada sistem food service (Chung et al., 2022).

3.1.2. Emisi dari Transportasi

Aktivitas transportasi distribusi dan reverse logistics menyumbang emisi sebesar 2.842,24 kg CO2-eq per tahun atau 6,5% dari total emisi, menjadikannya kontributor terkecil di antara seluruh sumber emisi. Rendahnya kontribusi ini disebabkan oleh jarak tempuh distribusi SPPG X yang relatif terbatas, yaitu sekitar 12.326,33 km per tahun untuk kegiatan distribusi makanan ke sekolah maupun pengangkutan kembali limbah kemasan.

3.1.3. Emisi dari Limbah Organik (TPA)

Pengelolaan limbah organik melalui pembuangan ke TPA menghasilkan emisi sebesar 9.831,69 kg CO2-eq per tahun atau 22,5% dari total emisi. Emisi ini terutama bersumber dari gas metana (CH4) biogenik yang terbentuk akibat proses dekomposisi anaerobik bahan organik di TPA, dihitung menggunakan pendekatan estimasi pembentukan metana berbasis parameter IPCC. Semakin tinggi timbulan limbah organik yang dibuang ke TPA tanpa pengolahan lanjutan, semakin besar pula potensi emisi metana yang dihasilkan, mengingat metana memiliki potensi pemanasan global 27 kali lebih besar dibandingkan CO2 pada horizon 100.

3.1.4. Emisi dari Limbah Anorganik

Limbah anorganik berupa kemasan komposit dan plastik tunggal menyumbang emisi sebesar 14.518,30 kg CO2-eq per tahun atau 33,2% dari total emisi, menjadikannya kontributor terbesar kedua setelah LPG. Emisi ini dihitung menggunakan pendekatan embodied carbon yang merepresentasikan emisi dari proses produksi material kemasan, mengacu pada U.S. EPA WARM. Tingginya kontribusi ini erat kaitannya dengan karakteristik material kemasan yang digunakan pada distribusi makanan program MBG, yang umumnya berupa kemasan sekali pakai (single-use packaging) seperti kotak makan plastik/styrofoam, kantong plastik pembungkus, serta kemasan komposit multilayer yang digunakan untuk menjaga higienitas dan suhu makanan selama distribusi. Material tersebut memiliki nilai embodied carbon yang relatif tinggi karena proses produksinya bersifat energi-intensif, sementara sebagian besar sulit didaur ulang akibat sifat multilayer/multimaterialnya, sehingga pendekatan embodied carbon (bukan emisi dekomposisi) menjadi relevan untuk mengestimasi emisinya U.S. EPA (2023).

Temuan ini sejalan dengan studi jejak karbon kemasan pada layanan pengiriman makanan yang juga mengidentifikasi kemasan sekali pakai sebagai kontributor signifikan terhadap jejak karbon sistem pangan (Arunan & Crawford, 2021), serta studi jejak karbon limbah layanan kesehatan yang menyoroti kontribusi signifikan limbah kemasan non-organik terhadap total jejak karbon institusi (Rizan et al., 2021). Tingginya kontribusi limbah anorganik menunjukkan bahwa evaluasi jenis dan desain kemasan, termasuk potensi substitusi menuju material yang lebih mudah didaur ulang atau reusable, menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan dalam upaya penurunan emisi jangka panjang. Dari perspektif green logistics, temuan ini menempatkan evaluasi jenis dan desain kemasan sebagai bagian dari green packaging yang kedudukannya setara penting dengan efisiensi energi dan transportasi, mengingat kontribusi emisi dari produksi material kemasan pangan dapat bervariasi signifikan tergantung jenis material dan strategi pengelolaan pascapakainya (Kan & Miller, 2022).

3.2. Interpretasi

Berdasarkan hasil LCIA, penggunaan LPG dan limbah anorganik merupakan dua kontributor terbesar terhadap emisi gas rumah kaca pada sistem operasional SPPG X, masing-masing sebesar 37,8% dan 33,2%, diikuti limbah organik (22,5%) dan transportasi (6,5%). Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar emisi berasal dari aspek penggunaan energi dan pengelolaan limbah, sehingga kedua aspek tersebut menjadi prioritas utama dalam penyusunan skenario perbaikan. Hasil ini sejalan dengan penelitian pada sistem *food service* yang menunjukkan bahwa konsumsi energi dan pengelolaan limbah merupakan kontributor utama emisi (Chung et al., 2022), serta menegaskan bahwa metode LCA mampu mengidentifikasi tahapan proses yang menjadi environmental hotspot sehingga dapat digunakan sebagai dasar penentuan strategi pengurangan dampak lingkungan yang lebih efektif (Takacs & Borrion, 2020). Dalam perspektif *green logistics*, hasil identifikasi hotspot ini berfungsi sebagai dasar penentuan prioritas intervensi pada aktivitas logistik yang berkontribusi paling besar terhadap dampak lingkungan, alih-alih menerapkan perbaikan secara merata pada seluruh proses operasional tanpa mempertimbangkan kontribusi relatifnya; dengan kata lain, LCA berperan sebagai alat bantu pengambilan keputusan (*decision-support tool*) yang mengarahkan perancangan strategi *green logistics* agar lebih terarah dan efisien dari segi sumber daya, bukan sebagai tujuan akhir itu sendiri (Kamewor et al., 2024).

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

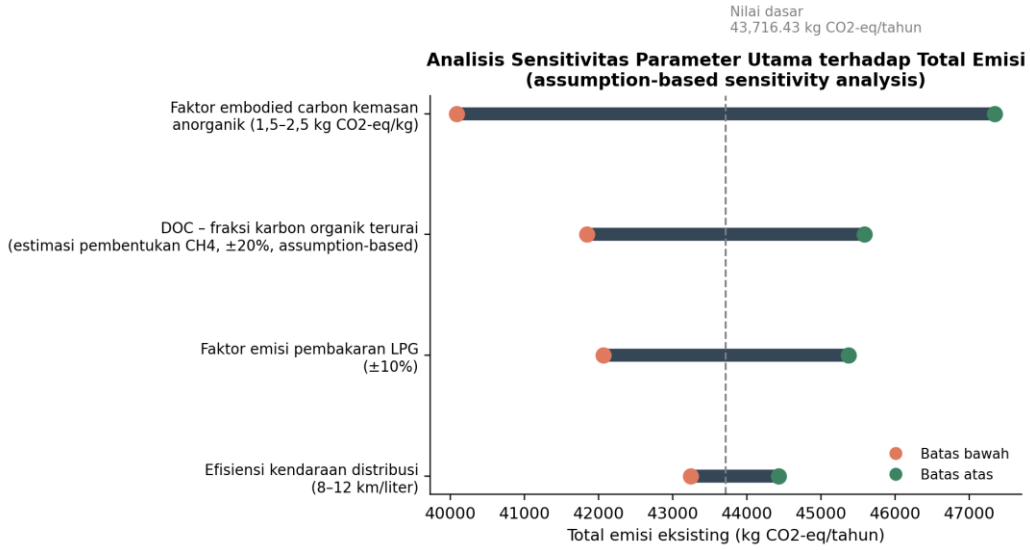
3.3. Analisis Sensitivitas dan Ketidakpastian

Untuk mengevaluasi pengaruh asumsi dan parameter kunci terhadap hasil, dilakukan analisis sensitivitas satu-faktor-pada-satu-waktu (*one-at-a-time*/OAT) terhadap total emisi. Perlu ditegaskan bahwa analisis ini bersifat *assumption-based sensitivity analysis*, yaitu menguji seberapa besar hasil berubah apabila asumsi yang digunakan peneliti bergeser dalam rentang yang wajar, dan bukan merupakan confidence interval atau statistical uncertainty resmi dari parameter IPCC. Empat parameter yang diuji adalah: (1) faktor emisi pembakaran LPG (rentang ±10%, mengikuti ketidakpastian umum default Tier 1 IPCC untuk faktor pembakaran bahan bakar) (IPCC, 2006); (2) DOC (*degradable organic carbon*) pada pendekatan estimasi pembentukan metana (rentang ±20% dari nilai dasar DOC=0,15) (IPCC, 2006), mengingat DOC merupakan parameter dengan variabilitas tinggi bergantung pada komposisi limbah organik dan belum diukur secara site-specific pada penelitian ini; (3) faktor embodied carbon kemasan anorganik, diuji pada rentang 1,5-2,5 kg CO2-eq/kg (nilai dasar 2,0 kg CO2-eq/kg) (U.S. EPA, 2023) untuk mengevaluasi pengaruh pemilihan nilai representatif tersebut terhadap hasil; dan (4) efisiensi konsumsi bahan bakar kendaraan distribusi, diuji pada rentang 8-12 km/liter (nilai dasar 10 km/liter) untuk mengevaluasi ketidakpastian yang berasal dari estimasi konsumsi bahan bakar berbasis jarak tempuh (International 2021). Nilai GWP100 tidak diperlakukan sebagai parameter sensitivitas pada analisis ini karena telah dikoreksi menggunakan nilai definitif IPCC AR6 (CH4=27, N2O=273) (IPCC, 2021) sebagaimana dijelaskan pada Bagian 2.4-2.5.

Hasil pada Gambar 2 menunjukkan bahwa total emisi paling sensitif terhadap variasi faktor *embodied carbon* kemasan anorganik, dengan potensi variasi total emisi sekitar ±8,30% dari nilai dasar (setara 40.086,86-47.346,00 kg CO2-eq/tahun pada rentang 1,5-2,5 kg CO2-eq/kg). Parameter kedua paling berpengaruh adalah DOC pada pendekatan estimasi pembentukan metana (±4,28%, setara 41.844,72-45.588,14 kg CO2-eq/tahun), diikuti oleh faktor emisi pembakaran LPG (±3,78%, setara 42.064,01-45.368,85 kg CO2-eq/tahun). Sebaliknya, hasil relatif kurang sensitif terhadap variasi efisiensi kendaraan: pada skenario kendaraan lebih boros (8 km/liter), total emisi naik menjadi sekitar 44.426,99 kg CO2-eq/tahun (+1,63%), sedangkan pada skenario kendaraan lebih efisien (12 km/liter), total emisi turun menjadi sekitar 43.242,72 kg CO2-eq/tahun (-1,08%); asimetri ini terjadi karena konsumsi bahan bakar berbanding terbalik dengan efisiensi kendaraan (FC=D/FE). Temuan ini menegaskan bahwa akurasi data faktor embodied carbon material kemasan dan parameter DOC lokal (alih-alih mengandalkan nilai representatif/*default global*) merupakan prioritas untuk meningkatkan keandalan hasil LCA pada studi lanjutan, sejalan dengan rekomendasi metodologis pada studi LCA berbasis *Black Soldier Fly* (BSF) sebelumnya yang juga menekankan pentingnya analisis sensitivitas dalam mengevaluasi ketidakpastian parameter pengelolaan limbah organik (Mertenat et al., 2019).

3.4. Indikator Emisi per Porsi untuk Benchmarking

Untuk memudahkan perbandingan (*benchmarking*) antar-SPPG maupun dengan studi jejak karbon layanan pangan institusi lain, hasil penelitian ini juga dinyatakan dalam bentuk indikator emisi per porsi makanan. Total produksi tahunan yang digunakan sebagai basis perhitungan adalah 441.383 porsi, hasil penskalaan produksi aktual SPPG X ke basis tahunan sesuai kondisi operasional normal dan khusus (Bagian 2.3), sehingga indikator emisi per porsi dihitung sebagai total emisi tahunan dibagi total produksi tahunan tersebut.



Gambar 2. Analisis Sensitivitas Parameter Utama terhadap Total Emisi (Tornado Chart)

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Pada kondisi eksisting, indikator ini setara dengan sekitar 0,0990 kg CO2-eq (99,0 gram CO2-eq) per porsi, sedangkan pada skenario perbaikan turun menjadi sekitar 0,0494 kg CO2-eq (49,4 gram CO2-eq) per porsi, atau penurunan sekitar 50% secara per-porsi. Perlu ditekankan bahwa nilai ini secara nominal jauh lebih rendah dibandingkan angka jejak karbon per porsi pada studi food service internasional yang menggunakan batas sistem lebih luas, misalnya sekitar 0,10-0,40 kg CO2-eq per porsi pada aktivitas memasak dan transportasi layanan pangan rumah sakit maupun kantin sekolah (Bux et al., 2025; Martinez et al., 2020); perbedaan ini bukan menunjukkan performa SPPG X yang secara inheren lebih unggul, melainkan mencerminkan perbedaan batas sistem, karena penelitian ini menggunakan pendekatan gate-to-grave yang tidak mencakup emisi dari produksi bahan baku pangan (sebagaimana dijelaskan pada Bagian 2.1), yang pada studi jejak karbon pangan cradle-to-grave umumnya justru menjadi kontributor terbesar (Poore & Nemecek, 2018). Indikator emisi per porsi pada penelitian ini sebaiknya digunakan untuk perbandingan antar-SPPG dengan batas sistem yang setara, bukan untuk perbandingan langsung dengan jejak karbon pangan secara keseluruhan.

3.5. Skenario Potensi Perbaikan Berkelanjutan

Berdasarkan hasil interpretasi, skenario perbaikan disusun dengan menyasar tiga sumber emisi utama. Pertama, substitusi LPG dengan energi listrik berbasis panel surya berkapasitas sekitar 35-47 kWp mampu menghilangkan seluruh direct emission dari proses memasak.

Kapasitas panel surya ditentukan melalui hubungan antara kebutuhan energi listrik tahunan, specific yield PV, dan luas lahan yang tersedia. Kebutuhan energi listrik tahunan untuk menggantikan konsumsi LPG diestimasi sekitar 52.670-56.180 kWh/tahun, sedangkan produksi energi panel surya di Indonesia diestimasi berkisar 1.200-1.500 kWh/kWp/tahun bergantung pada kondisi lokasi dan efisiensi sistem. Dengan membagi kebutuhan energi tahunan tertinggi (56.180 kWh) terhadap specific yield terendah (1.200 kWh/kWp) sebagai pendekatan konservatif, diperoleh kapasitas PV yang dibutuhkan sekitar 35-47 kWp, dengan 47 kWp digunakan pada skenario perhitungan ekonomi (Tabel 3) untuk memastikan kebutuhan energi tahunan terpenuhi bahkan pada kondisi specific yield rendah. Kebutuhan lahan untuk sistem panel surya berkapasitas sekitar 50 kWp diestimasi sekitar 185 m^2, sementara lahan yang tersedia di lokasi SPPG X sekitar 400 m^2, sehingga kapasitas yang dipilih masih berada dalam batas kelayakan luas lahan.

Kedua, pengelolaan limbah organik diubah dari 100% pembuangan ke TPA menjadi kombinasi 70% TPA, 15% kompos, dan 15% biokonversi maggot Black Soldier Fly (BSF) sebagai alokasi skenario penelitian, mengacu pada target Pemerintah Kota Bandung untuk mengalihkan sekitar 30% timbulan sampah ke pengelolaan non-TPA (Diskominfo Kota Bandung, 2024), proporsi 15%/15% pada penelitian ini merupakan pembagian asumsi dari target 30% tersebut menjadi dua metode alternatif (kompos dan BSF) yang relevan dengan skala operasional SPPG, bukan komposisi pengelolaan aktual Kota Bandung, sehingga menurunkan emisi limbah organik dari 9.831,69 menjadi 6.975,70 kg CO2-eq per tahun. Ketiga, kendaraan distribusi berbahan bakar fosil digantikan kendaraan listrik untuk menghilangkan emisi langsung dari aktivitas transportasi. Limbah anorganik tidak dimasukkan ke dalam skenario perbaikan karena pengelolaannya memerlukan dukungan infrastruktur eksternal di luar kendali operasional SPPG.

Ketiga intervensi di atas merepresentasikan tiga dimensi green logistics yang saling melengkapi pada sistem operasional SPPG X, bukan tiga inisiatif yang berdiri sendiri. Substitusi LPG dengan panel surya merupakan bentuk green energy melalui pengurangan ketergantungan pada energi berbasis fosil pada tahap produksi, sejalan dengan temuan bahwa integrasi teknologi energi terbarukan pada operasional dapur institusi dan restoran mampu menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan sekaligus menghilangkan sumber emisi langsung dari pembakaran bahan bakar (Yang et al., 2025). Pengalihan sebagian limbah organik dari TPA menuju kompos dan biokonversi maggot BSF merepresentasikan praktik green waste management sekaligus reverse logistics, karena limbah yang semula hanya dibuang dialihkan menjadi input bagi proses produksi kompos maupun pakan alternatif, sejalan dengan prinsip pemulihan nilai dari aliran limbah pada ekonomi sirkular berbasis pangan (Santagata et al., 2021). Sementara itu, substitusi kendaraan distribusi berbahan bakar fosil dengan kendaraan listrik merupakan bentuk green transportation yang menghilangkan emisi langsung pada titik penggunaan, meskipun kajian siklus hidup kendaraan listrik menunjukkan bahwa manfaat lingkungan bersihnya perlu turut memperhitungkan emisi tidak langsung dari tahap produksi baterai dan infrastruktur pendukungnya (Oliveri et al., 2023).

3.5.1. Keuntungan Lingkungan

Secara keseluruhan, penerapan skenario perbaikan menurunkan total emisi dari 43.716,43 menjadi 21.815,51 kg CO2-eq per tahun, atau sekitar 50%, sebagaimana dirangkum pada **Tabel 4** dan **Gambar 3**. Skenario ini juga mampu menghilangkan seluruh *direct emission* (*Scope* 1) yang sebelumnya berasal dari pembakaran LPG dan bahan bakar kendaraan sebesar 42.745,16 kg CO2-eq per tahun, atau penurunan 100% pada kategori emisi langsung tersebut.

Perlu ditegaskan bahwa klaim penurunan 100% ini merujuk secara spesifik pada eliminasi emisi langsung (*direct/Scope* 1 *emissions*) dari titik penggunaan (*point of use*) di lokasi SPPG, dan bukan berarti skenario perbaikan ini bebas emisi secara

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

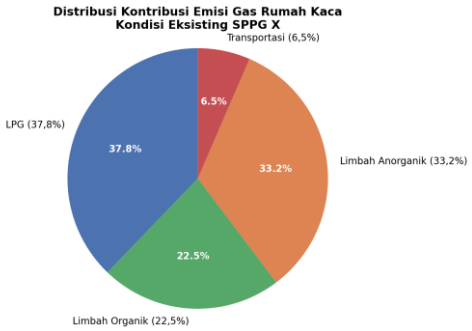
keseluruhan dalam perspektif siklus hidup penuh. Panel surya dan kendaraan listrik tetap memiliki potensi emisi tidak langsung (*indirect/embodied emissions*) yang berasal dari tahap produksi modul panel surya dan baterai kendaraan listrik, yang menurut berbagai studi LCA *cradle-to-grave* dapat berkontribusi signifikan terhadap total jejak karbon sistem energi terbarukan meskipun secara operasional bebas emisi langsung (International Council on Clean Transportation, 2018; Muteri et al., 2020). Selain itu, apabila sistem panel surya yang digunakan bersifat *on-grid/hybrid* dan sewaktu-waktu masih memerlukan pasokan listrik cadangan dari jaringan PLN yang di Indonesia sebagian besar masih berbasis bahan bakar fosil, maka akan timbul pula emisi tidak langsung dari penggunaan listrik grid tersebut. Studi penerapan biokonversi maggot *Black Soldier Fly* (BSF) untuk pengelolaan limbah organik juga menunjukkan bahwa konsumsi listrik pada proses budidaya dan pengolahan turut memengaruhi *Global Warming Potential* secara signifikan, sehingga sumber energi yang digunakan pada proses BSF turut menentukan besaran manfaat lingkungan bersih dari skenario ini (Mertenat et al., 2019). Oleh karena itu, kajian siklus hidup lanjutan yang turut memasukkan tahap produksi infrastruktur energi terbarukan dan kendaraan listrik (pendekatan *cradle-to-grave*) diperlukan untuk memperoleh gambaran yang lebih menyeluruh mengenai manfaat lingkungan bersih (*net environmental benefit*) dari skenario perbaikan ini. Meskipun demikian, penurunan emisi langsung tetap memberikan manfaat penting, terutama terkait perbaikan kualitas udara lokal di lingkungan dapur.

Hasil ini menegaskan bahwa integrasi prinsip green logistics melalui efisiensi energi, transportasi, dan pengelolaan limbah berbasis ekonomi sirkular mampu meningkatkan kinerja lingkungan operasional SPPG (Veloso et al., 2025), sekaligus menunjukkan bahwa ketiga praktik tersebut perlu dirancang secara simultan dan bukan sebagai perbaikan yang berdiri sendiri, mengingat kontribusi masing-masing sumber emisi terhadap total dampak berbeda signifikan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3 (Jayarathna et al., 2023).

Tabel 4. Rekapitulasi Perbandingan

Parameter	Kondisi Eksisting	Skenario Perbaikan	Perubahan
Total Emisi (kg CO2-eq/tahun)	43.716,43	21.815,51	-50%
Emisi Langsung (kg CO2-eq/tahun)	42.745,16	0	-100%
CAPEX (Rp)	23.493.051	975.030.059	+4.050%
OPEX 10 Tahun (Rp)	1.337.191.528	131.600.000	-90%

Sumber: hasil analisis LCA dan estimasi biaya berdasarkan HPS



Gambar 3. Distribusi Kontribusi Emisi

3.5.2. Keuntungan Ekonomi

Dari aspek ekonomi, skenario perbaikan pada sektor energi memerlukan investasi awal (CAPEX) sebesar Rp975.030.058,67 untuk pengadaan panel surya dan peralatan masak listrik, jauh lebih tinggi dibandingkan kondisi eksisting sebesar Rp23.493.051,00. Namun, biaya operasional (OPEX) selama sepuluh tahun turun sekitar 90% dari Rp1.337.191.527,69 menjadi Rp131.600.000,00 akibat berkurangnya konsumsi LPG. Pada sektor transportasi, kendaraan listrik memerlukan harga awal yang sedikit lebih tinggi (Rp313.950.000,00) dibandingkan kendaraan konvensional (Rp273.000.000,00), namun biaya operasional bahan bakar turun hingga 82%, sehingga total biaya kepemilikan (*Total Cost of Ownership*) selama sepuluh tahun lebih rendah sekitar 17% dibandingkan kendaraan berbahan bakar fosil. Dengan demikian, meskipun skenario perbaikan membutuhkan investasi awal yang jauh lebih besar, penghematan biaya operasional jangka panjang menunjukkan bahwa investasi tersebut berpotensi memberikan manfaat ekonomi yang layak dalam jangka panjang.

Perhitungan CAPEX dan OPEX pada skenario ini didasarkan pada estimasi Harga Perkiraan Sendiri (HPS) dan asumsi harga energi pada saat penelitian dilakukan, sehingga proyeksi penghematan biaya bersifat indikatif dan dapat berubah mengikuti fluktuasi harga LPG, tarif listrik, maupun teknologi panel surya dan kendaraan listrik di masa mendatang.

3.5.3. Keuntungan Sosial

Penerapan skenario perbaikan berbasis green logistics turut memberikan manfaat sosial bagi operasional SPPG X dan masyarakat sekitar. Penurunan emisi gas rumah kaca dan penghapusan emisi langsung dari pembakaran LPG berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara di lingkungan dapur dan sekitarnya, sehingga mendukung kesehatan pekerja dapur maupun masyarakat penerima manfaat Program MBG. Pengalihan sebagian limbah organik ke pengolahan kompos dan biokonversi maggot juga membuka peluang kolaborasi dengan bank sampah atau kelompok pengelola limbah setempat, yang dapat menciptakan nilai ekonomi tambahan bagi masyarakat sekitar SPPG. Selain itu, penerapan energi terbarukan dan kendaraan listrik pada operasional SPPG X turut

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

mendukung komitmen nasional dalam Global Methane Pledge dan transisi menuju sumber energi yang lebih bersih, sehingga dapat memberikan gambaran awal mengenai praktik operasional berkelanjutan yang berpotensi dipertimbangkan pada SPPG lain dengan karakteristik operasional yang serupa.

Penerapan skenario perbaikan berbasis green logistics, yaitu substitusi LPG dengan panel surya, pengelolaan limbah organik melalui kombinasi TPA, kompos, dan biokonversi maggot, serta penggunaan kendaraan listrik, terbukti mampu menurunkan total emisi gas rumah kaca sekitar 50% dan menghilangkan seluruh emisi langsung dari pembakaran bahan bakar, meskipun emisi tidak langsung dari produksi infrastruktur energi terbarukan tetap perlu dipertimbangkan dalam kajian siklus hidup yang lebih menyeluruh.

Dari aspek ekonomi, skenario ini berpotensi menurunkan biaya operasional jangka panjang secara signifikan meskipun memerlukan investasi awal yang jauh lebih besar, sementara dari aspek sosial skenario ini turut mendukung perbaikan kualitas udara lingkungan kerja dan membuka peluang kolaborasi ekonomi sirkular dengan masyarakat sekitar.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi bahwa sumber dampak lingkungan pada operasional SPPG X berasal dari empat proses utama, yaitu penggunaan LPG, transportasi, pengelolaan limbah organik, dan pengelolaan limbah anorganik, dengan total emisi gas rumah kaca pada kondisi eksisting sebesar 43.716,43 kg CO2-eq per tahun, dan penggunaan LPG serta limbah anorganik sebagai dua kontributor terbesar.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu menjadi perhatian dalam menginterpretasikan hasilnya. Pertama, penelitian hanya dilakukan pada satu lokasi SPPG (SPPG X) dengan karakteristik operasional tertentu, sehingga generalisasi hasil pada ribuan SPPG lain dalam Program MBG yang memiliki variasi kapasitas produksi, karakteristik geografis, dan pola distribusi yang berbeda masih terbatas dan memerlukan pengujian lebih lanjut pada beberapa lokasi. Kedua, batas sistem gate-to-grave yang digunakan tidak mencakup tahap produksi bahan baku pangan, sehingga total emisi yang dilaporkan bukan merupakan jejak karbon penuh (*cradle-to-grave*) dari makanan yang diproduksi. Ketiga, sebagian besar faktor emisi yang digunakan bersumber dari nilai default Tier 1 dan belum sepenuhnya menggunakan data spesifik lokasi (*site-specific*), meskipun analisis sensitivitas pada penelitian ini menunjukkan bahwa hasil relatif *robust* terhadap variasi parameter dalam rentang ketidakpastian yang wajar. Keempat, evaluasi kelayakan skenario perbaikan masih terbatas pada aspek lingkungan dan estimasi biaya (CAPEX-OPEX), tanpa mencakup evaluasi kelayakan ekonomi yang lebih mendalam atau uji operasional pada skala penuh.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk: (1) memperluas cakupan studi kasus pada beberapa SPPG dengan karakteristik operasional yang berbeda guna menguji generalisasi temuan dan memperkuat potensi replikasi skenario pada skala nasional; (2) mengevaluasi pengelolaan limbah anorganik yang belum tercakup dalam skenario perbaikan penelitian ini, misalnya melalui evaluasi kemasan ramah lingkungan, *material reusable*, maupun penerapan prinsip *reduce-reuse-recycle* (3R); (3) melakukan analisis kelayakan ekonomi yang lebih mendalam untuk pengolahan kompos dan biokonversi maggot *Black Soldier Fly* (BSF), serta kajian siklus hidup penuh (*cradle-to-grave*) untuk skenario panel surya dan kendaraan listrik guna menghitung manfaat lingkungan bersih secara lebih akurat; dan (4) menerapkan optimasi rute distribusi menggunakan pendekatan *Vehicle Routing Problem* (VRP) untuk menurunkan jarak tempuh, konsumsi energi, dan emisi kendaraan operasional secara lebih signifikan. Dengan mempertimbangkan keterbatasan sekaligus arah pengembangan tersebut, hasil penelitian ini tetap dapat menjadi acuan awal yang bermanfaat bagi pengembangan operasional SPPG yang lebih berkelanjutan dalam mengevaluasi Program MBG.

DAFTAR PUSTAKA

Ali Pramono, Miranti Ariani, Titi Sopiawati, & Suharsih. (2025). Penerapan Prinsip-Prinsip Siklus Daur Hidup (Life Cycle Assessment) SNI ISO 140442017 untuk Menghitung Emisi GRK pada Sistem Integrasi Tanaman-Ternak. *Warta Agrostandar*, *1*, 1–5.

Arunan, I., & Crawford, R. H. (2021). Greenhouse gas emissions associated with food packaging for online food delivery services in Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, *168*, 105299. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105299

Avató, J. L., & Mannheim, V. (2022). Life Cycle Assessment Model of a Catering Product: Comparing Environmental Impacts for Different End-of-Life Scenarios. *Energies*, *15*(15), 5423. https://doi.org/10.3390/en15155423

Badan Gizi Nasional. (2026, February 8). *Daftar Satuan Pelayanan Pemenuhan Gizi (SPPG) yang telah operasional*. BGN. https://www.bgn.go.id/operasional-sppg

Bux, C., Zizzo, G., Roe, B. E., & Amicarelli, V. (2025). A comparative assessment of food waste and carbon footprint toward a more sustainable healthcare foodservice. *Journal of Cleaner Production*, *495*, 145102. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145102

Chepurna, M., Alvarez-Palau, E. J., Castillo Gutiérrez, C., & Viu Roig, M. (2025). Green Logistics: In Pursuit of a Final Definition. *Business Strategy and the Environment*, *34*(7), 8983–9007. https://doi.org/10.1002/bse.70055

Chung, M. M. S., Bao, Y., Zhang, B. Y., Le, T. M., & Huang, J.-Y. (2022). Life Cycle Assessment on Environmental Sustainability of Food Processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, *13*(1), 217–237.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

https://doi.org/10.1146/annurev-food-062420-014630

Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic greenhouse gas emissions. *Nature Food*, *2*, 198–209. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9

Diskominfo Kota Bandung. (2024, November 5). *Pemda Kota Bandung Menyiapkan Sejumlah Strategi Kurangi Sampah*. Gapura Jabar. https://www.jabarprov.go.id/berita/pemda-kota-bandung-menyiapkan-sejumlah-strategi-kurangi-sampah-15696

George, E. (2026, April 22). *UCLA Emmett Institute cites largest methane emissions from landfills around the world*. UCLA. https://newsroom.ucla.edu/releases/ucla-emmett-institute-extreme-methane-emissions-worlds-landfills

International Council on Clean Transportation. (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. https://theicct.org/publication/effects-of-battery-manufacturing-on-electric-vehicle-life-cycle-greenhouse-gas-emissions/

IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* .

IPCC. (2021). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

ISO. (2006). *ISO 14044 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.

Jayarathna, C. P., Agdas, D., & Dawes, L. (2023). Exploring Sustainable Logistics Practices toward a Circular Economy: A Value Creation Perspective. *Business Strategy and the Environment*, *32*(1), 704–720. https://doi.org/10.1002/bse.3170

Kamewor, F. T., Kwateng, K. O., & Mensah, J. (2024). Green Logistics Practices: A Bibliometric and Systematic Methodological Review and Future Research Opportunities. *Journal of Cleaner Production*, *476*, 143735. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143735

Kan, M., & Miller, S. A. (2022). Environmental Impacts of Plastic Packaging of Food Products. *Resources, Conservation and Recycling*, *180*, 106156. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106156

Li, Y., & Feng, H. (2025). Comprehensive spatial LCA framework for urban scale net zero energy buildings in Canada using GIS and BIM. *Applied Energy*, *388*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125649

Martinez, S., Delgado, M. del M., Marin, R. M., & Alvarez, S. (2020). Carbon footprint of school lunch menus adhering to the Spanish dietary guidelines. *Carbon Management*, *11*(4), 427–439. https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1796169

McKinnon, A. C. (2015). Environmental sustainability: A new priority for logistics managers. In A. McKinnon, M. Browne, M. Piecyk, & A. Whiteing (Eds.), *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics* (3rd ed., pp. 3–31). Kogan Page.

Mertenat, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2019). Black Soldier Fly biowaste treatment – Assessment of global warming potential. *Waste Management*, *84*, 173–181. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.040

Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. *Energies*, *13*(1), 252. https://doi.org/10.3390/en13010252

Oliveri, L. M., D'Urso, D., Trapani, N., & Chiacchio, F. (2023). Electrifying Green Logistics: A Comparative Life Cycle Assessment of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. *Energies*, *16*(23), 7688. https://doi.org/10.3390/en16237688

Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, *360*(6392), 987–992. https://doi.org/10.1126/science.aaq0216

Rizan, C., Bhutta, M. F., Reed, M., & Lillywhite, R. (2021). The carbon footprint of waste streams in a UK hospital. *Journal of Cleaner Production*, *286*, 125446. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125446

Santagata, R., Ripa, M., Genovese, A., & Ulgiati, S. (2021). Food Waste Recovery Pathways: Challenges and Opportunities for an Emerging Bio-Based Circular Economy. A Systematic Review and an Assessment. *Journal of Cleaner Production*, *286*, 125490. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125490

Takacs, B., & Borrion, A. (2020). The Use of Life Cycle-Based Approaches in the Food Service Sector to Improve Sustainability: A Systematic Review. *Sustainability*, *12*(9), 3504. https://doi.org/10.3390/su12093504

U.S. EPA. (2023). *Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM)*.

Veloso, V., Santos, A., Carvalho, A., & Barbosa-Póvoa, A. (2025). A comprehensive framework for assessing circular economy strategies in agri-food supply chains. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-024-05755-3

WRI. (2025, July 23). *WRI Indonesia memperkuat sistem Pengukuran, Pelaporan, dan Verifikasi Emisi Metana melalui peluncuran proyek SMART Waste Indonesia*. WRI Indonesia.

Yang, S.-Y., Huang, C.-E., Mwangi, J. K., Mutuku, J. K., & Chang-Chien, G.-P. (2025). Green Technology Innovations for Carbon Footprint Reduction in the Restaurant Industry: A Systematic Review. *Aerosol and Air Quality Research*, *25*, 42. https://doi.org/10.1007/s44408-025-00042-w

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP