



Analisis jejak karbon pada produksi ayam potong dengan pendekatan *life cycle assessment*

Silmi Azmi*, Junervin, Syamsuwarni Rambe, Muhammad Luqmanul Hakim, Amina Kurniasi Alu

Teknik Industri Pertanian, Universitas Linggabuana PGRI Sukabumi, Sukabumi, Indonesia

Article history

Diterima:

11 Januari 2025

Diperbaiki:

12 Februari 2025

Disetujui:

19 Februari 2025

Keyword

Broiler chicken meat production;

Carbon footprint;

Global warming;

Greenhouse gas emissions;

Life cycle assessment

ABSTRACT

Broiler chicken agroindustry has significant potential to produce carbon emissions from using resources, energy, and waste. Awareness of environmental sustainability encourages the industry to improve its production system to be more environmentally friendly. Before improving the production system, carbon emission analysis needs to be carried out in the production process to assess its impact. This study aimed to evaluate the impact of global warming throughout the life cycle of broiler chicken products through carbon footprint analysis using the Life Cycle Assessment (LCA) method. The data inventory consisted of inputs and outputs from three subsystems: feed production, broiler chicken production, and chicken meat production. The impact calculation used the CML-IA (Center of Environmental Science of Leiden University) baseline method on the SimaPro software. The results showed that 1 kg of frozen packaged carcass produced a carbon footprint of 4.35 kg CO₂ eq. Feed production, especially soybean meal, bio waste, and electricity use, were the primary sources of emissions in the three subsystems. Improvement scenarios to reduce the carbon footprint included substituting soybean meal with local feed ingredients, processing biowaste into compost, and increasing energy efficiency in the cooling system.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

* Penulis korespondensi

Email : silmiazmi@unlip.ac.id

DOI 10.21107/agrointek.v19i4.28806

PENDAHULUAN

Produksi ayam potong menjadi salah satu sektor peternakan yang penting dalam pemenuhan kebutuhan pangan di Indonesia. Industri ini mengalami perkembangan yang signifikan karena pertumbuhan konsumsi daging ayam yang semakin pesat. Namun, peningkatan produksi ayam potong juga diikuti dengan peningkatan dampak lingkungan, terutama emisi gas rumah kaca (GRK). Penggunaan sumber daya dan energi, serta limbah yang terbentuk pada produksi ayam potong akan menghasilkan emisi karbon sebagai penyebab pemanasan global (Silva et al. 2014, Kalhor et al. 2016, Skunca et al. 2018, Lima et al. 2019, Azmi et al. 2021). Pemanasan global adalah peristiwa naiknya suhu permukaan bumi karena adanya efek rumah kaca, yang mengakibatkan perubahan iklim global (Abdallah and El-Shennawy 2013). Gas rumah kaca yang berpotensi mengakibatkan pemanasan global diantaranya CO_2 , CH_4 , dan N_2O . Gas CO_2 memiliki kontribusi paling besar (50%) dari total GRK (IPCC 2006).

Beberapa penelitian sebelumnya tentang analisis jejak karbon pada industri peternakan telah dilakukan. Kalhor et al. (2016) dan Lima et al. (2019) menemukan bahwa produksi ayam potong di negara berkembang menyumbang emisi GRK yang signifikan, terutama dari penggunaan energi fosil dan limbah. Skunca et al. (2018) menambahkan bahwa penggunaan energi di pabrik pengolahan daging ayam berkontribusi tinggi terhadap terbentuknya emisi karbon. Chai et al. (2015) melaporkan bahwa limbah cair juga menghasilkan emisi karbon. Diperkuat oleh Macleod et al. (2013) yang menyebutkan bahwa estimasi emisi yang dihasilkan oleh agroindustri daging ayam mencapai 0,6 gigaton CO_2 eq. Namun, belum banyak penelitian di Indonesia yang memetakan jejak karbon secara komprehensif dalam industri ayam potong. Sehingga perhitungan jejak karbon pada produksi ayam potong perlu dilakukan untuk menjawab tantangan tersebut. Metode yang dapat digunakan untuk menghitung jejak karbon secara komprehensif adalah metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Metode ini akan memberikan gambaran menyeluruh tentang titik-titik kritis emisi karbon di sepanjang rantai pasok produksi ayam potong.

Hasil LCA dalam berbagai penelitian sering kali menunjukkan perbedaan signifikan berdasarkan kondisi lokal dan regional. Sebagai

contoh, penelitian oleh Lima et al. (2019) mengungkapkan bahwa jejak karbon produksi ayam di Brasil lebih rendah dibandingkan dengan Eropa, karena faktor-faktor seperti efisiensi energi, iklim yang mendukung pertumbuhan ayam, dan komposisi pakan yang lebih bervariasi. Hal ini menegaskan bahwa hasil LCA sangat dipengaruhi oleh variabel-variabel seperti sumber energi yang digunakan, kondisi cuaca, jenis pakan, serta metode pengolahan dan pengelolaan limbah. Skunca et al. (2018) juga mencatat bahwa emisi GRK dari industri ayam di Eropa lebih rendah dibandingkan dengan negara berkembang akibat penerapan teknologi produksi yang lebih maju dan kebijakan lingkungan yang lebih ketat. Penelitian oleh Azmi et al. (2023) juga mendukung kesimpulan ini, dengan menunjukkan bahwa faktor-faktor lokal seperti sumber daya energi yang tersedia dan kapasitas teknologi dapat menghasilkan variasi signifikan dalam hasil LCA di berbagai tempat. Oleh karena itu, meskipun metode LCA digunakan secara luas dalam menilai jejak karbon, hasil yang diperoleh selalu harus dipertimbangkan dalam konteks spesifik geografis dan kondisi produksi setempat. Khususnya di negara berkembang yang memiliki karakteristik penggunaan energi dan manajemen limbah yang berbeda dibandingkan dengan penelitian-penelitian yang dilakukan di negara maju.

Meskipun LCA telah banyak diterapkan dalam analisis dampak lingkungan industri peternakan di berbagai negara, namun penerapannya di Indonesia masih terbatas, terutama dalam konteks spesifik produksi ayam potong. Penelitian Azmi et al. (2023) memberikan dasar yang kuat, namun masih diperlukan penelitian lanjutan yang lebih mendetail untuk memperdalam analisis jejak karbon di berbagai wilayah di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini perlu dilakukan untuk memperkaya pemahaman tentang bagaimana perbedaan kondisi geografis dan teknologi produksi dapat menghasilkan variasi yang signifikan dalam emisi karbon. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak pemanasan global di sepanjang daur hidup produk ayam potong melalui analisis jejak karbon dengan pendekatan *cradle-to-gate* menggunakan metode LCA. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan untuk merancang strategi pengurangan emisi karbon di industri ayam potong.

METODE

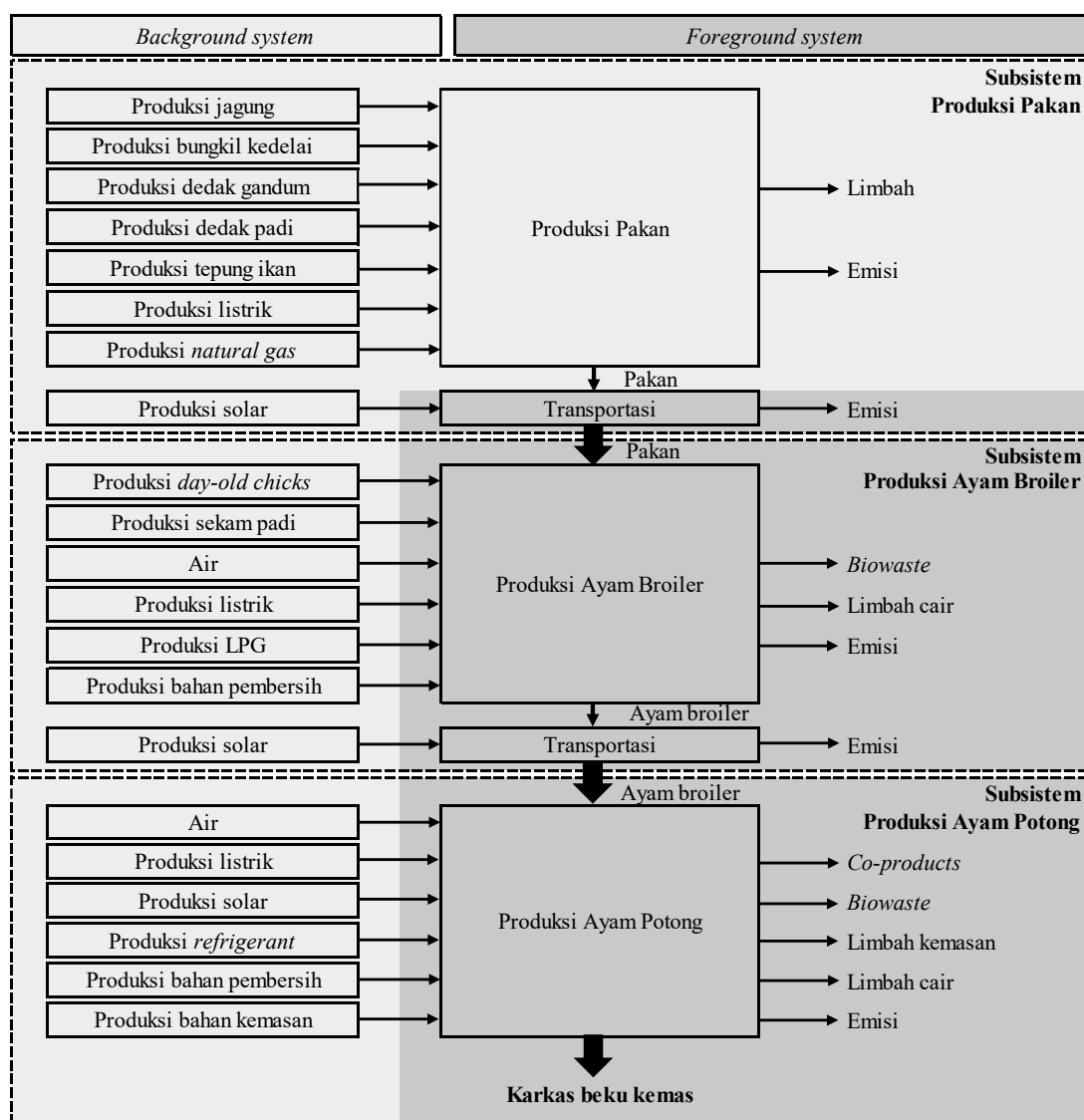
Berdasarkan ISO 14040, LCA adalah metode yang bersifat komprehensif untuk mengevaluasi dampak lingkungan potensial dari suatu produk atau jasa di sepanjang siklus hidup produk. Kerangka LCA terdiri dari 4 tahapan, yaitu (1) penentuan tujuan dan ruang lingkup, (2) analisis inventori daur hidup, (3) analisis dampak daur hidup, dan (4) interpretasi hasil (ISO 2006).

Penentuan Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dampak pemanasan global di sepanjang daur hidup ayam potong melalui analisis jejak karbon dengan pendekatan *cradle-to-gate*. Jejak karbon merupakan jumlah total emisi GRK yang dihasilkan oleh aktivitas manusia

(Minx et al. 2009) dengan satuan kg CO₂ eq (Browne et al. 2009). Batasan sistem dari daur hidup produk adalah *cradle-to-gate* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1. Batasan sistem dibagi menjadi tiga subsistem: produksi pakan, produksi ayam broiler, dan produksi ayam potong.

Perhitungan jejak karbon didasarkan pada unit fungsi. Unit fungsi mendeskripsikan kuantifikasi fungsi yang diidentifikasi dari suatu produk sebagai acuan dalam menghubungkan *input* dan *output* dari sistem produk sehingga hasil yang diperoleh bisa dibandingkan (ISO 2006). Unit fungsi yang digunakan dalam perhitungan jejak karbon melalui pendekatan LCA ini adalah 1 kg karkas beku kemas yang siap didistribusikan.



Gambar 1 Batasan sistem *cradle-to-gate* dari daur hidup produk ayam potong

Alokasi adalah salah satu hal penting dalam kajian LCA, yang merupakan pembagian aliran *input* atau *output* dari proses produksi pada sistem produk yang dikaji (ISO 2006). Dalam kajian LCA ini, metode alokasi didasarkan pada alokasi massa. Produksi ayam broiler menghasilkan ayam hidup siap potong. Selain itu, produksi ayam broiler juga menghasilkan *litter*, yang masih bisa dimanfaatkan menjadi pupuk sehingga lebih bernilai ekonomis. Sehingga beban lingkungan produksi ayam broiler di peternakan dialokasikan pada dua *output*, yaitu ayam hidup dan *litter*. Pada produksi ayam potong, produk utama yang dihasilkan adalah ayam potong atau karkas beku kemas. Selain produk utama, produksi ayam potong juga menghasilkan produk samping (*co-products*) berupa kepala, leher, hati, ampela, usus, jantung dan kaki ayam, yang masih bernilai ekonomis. Beban lingkungan produksi ayam potong di rumah pemotongan ayam dialokasikan pada dua *output*, yaitu karkas ayam dan produk samping.

Analisis Inventori Daur Hidup

Analisis inventori daur hidup bertujuan untuk mengidentifikasi aliran *input* (bahan baku, bahan tambahan, dan energi) serta *output* (produk, produk samping, limbah, dan emisi) di sepanjang daur hidup produk ayam potong. Analisis inventori terdiri dari proses pengumpulan data dan perhitungan data. *Input* dan *output* dari ketiga subsistem (produksi pakan, produksi ayam broiler, dan produksi ayam potong) diidentifikasi dalam proses pengumpulan data. Data yang harus dikumpulkan dalam tahap inventori adalah data *material* dan energi yang memasuki sistem, serta produk, limbah, dan emisi yang keluar dari sistem. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer yang disebut *foreground system* dikumpulkan langsung dari produksi ayam broiler, transportasi, dan produksi ayam potong. Data yang dikumpulkan berupa data produksi selama 12 bulan untuk subsistem produksi ayam broiler dan produksi ayam potong. Data produksi ayam broiler diperoleh dari peternakan PT. X yang berlokasi di Kabupaten Cianjur dengan jumlah kandang yang diamati sebanyak 36 kandang berkapasitas 25.000 ekor ayam/kandang. Sedangkan data produksi ayam potong diperoleh dari Rumah Pemotongan Ayam (RPA) PT. Y yang berlokasi di Kabupaten Cianjur dengan kapasitas produksi 24 ton/hari.

Data sekunder yang disebut juga dengan *background system* berasal dari *database*

Ecoinvent 3 dan *Agrifoot-print 5* dalam *software* SimaPro. *Database* yang digunakan meliputi produksi pakan, bahan baku pakan, pupuk, pestisida, *day-old chicks*, listrik, solar, LPG, gas alam, bahan pembersih, *refrigerant*, dan bahan pengemas. *Database-database* tersebut berasal dari *database* Indonesia dan luar negeri. *Database* dari Indonesia meliputi *database* produksi listrik dan produksi bungkil kelapa. *Database* lain yang sumbernya belum ada dari Indonesia, digunakan *database* RoW (*Rest of World*), yaitu *database* dari negara-negara berkembang. *Database* RoW ini digunakan dengan asumsi bahwa *database-database* tersebut adalah yang paling mendekati kondisi di Indonesia, yang juga merupakan negara berkembang.

Data yang teridentifikasi dihitung secara kuantitatif dan divalidasi menggunakan neraca massa dan energi untuk menggambarkan aliran bahan dan energi. Semua data yang dikumpulkan selanjutnya diproses dengan menggunakan Microsoft Office 365 dan dianalisis menggunakan *software* SimaPro. Hasil analisis inventori ini selanjutnya akan digunakan pada tahapan analisis dampak lingkungan.

Analisis Dampak Daur Hidup

Analisis dampak daur hidup dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi dampak lingkungan potensial yang dihasilkan berdasarkan hasil analisis inventori. Berdasarkan data dari hasil analisis inventori, kemudian dilakukan perhitungan dan analisis untuk mendapatkan nilai estimasi emisi yang dihasilkan dari setiap tahapan proses. Semua data inventori yang dimasukkan ke dalam *software* SimaPro akan secara otomatis menghitung nilai emisi yang dihasilkan di sepanjang siklus hidup produk.

Kategori dampak lingkungan yang dikaji dalam penelitian ini adalah dampak pemanasan global yang diakibatkan oleh emisi karbon. Perhitungan jejak karbon dianalisis berdasarkan kandungan CO₂, N₂O, CH₄, dan HFC. Total emisi GRK dinyatakan sebagai kg CO₂ eq. Perhitungan emisi menggunakan rumus perhitungan emisi yang telah diakui oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) yaitu mengalikan volume inventori dengan faktor emisi bahan (IPCC 2006). Data faktor emisi diperoleh dari *database* yang terdapat dalam *library software* SimaPro. Analisis dampak pemanasan global akan dianalisis dari hasil analisis inventori

menggunakan *software* SimaPro versi 9.1.1.1 *Faculty* dengan metode CML-IA *baseline* V3.06.

Interpretasi Daur Hidup

Interpretasi daur hidup adalah tahap akhir LCA. Pada tahap ini, hasil analisis inventori serta analisis dampak akan dipertimbangkan secara bersamaan. Hasil interpretasi daur hidup dapat berupa kesimpulan serta rekomendasi perbaikan untuk mengurangi dampak lingkungan. Identifikasi skenario perbaikan dilakukan untuk semua subsistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Inventori Daur Hidup

Analisis inventori daur hidup terdiri dari *input* dan *output* dari tiga subsistem, yaitu subsistem produksi pakan, subsistem produksi ayam broiler, dan subsistem produksi ayam potong. Subsistem produksi pakan meliputi produksi bahan pakan, pengolahan pakan, dan transportasi. Inventori data dari produksi bahan pakan dan pengolahan pakan berasal dari *database Ecoinvent 3* dalam *software* SimaPro yang dimodifikasi dengan data primer, yaitu menggunakan komposisi pakan yang digunakan oleh peternakan ayam. Inventori dari produksi bahan pakan meliputi produksi jagung, produksi bungkil kedelai, produksi dedak gandum, produksi dedak padi, dan produksi tepung ikan. Inventori dari pengolahan pakan meliputi produksi listrik dan produksi *natural gas*. Proses transportasi pakan ke peternakan ayam memerlukan *input* berupa bahan bakar solar.

Subsistem produksi ayam broiler meliputi produksi *day-old chicks*, sterilisasi, pemeliharaan, pemanenan, dan transportasi. Inventori dari produksi *day-old chicks* diperoleh dari *database Agrifoot-print 5* dalam *software* SimaPro. Inventori data dari proses sterilisasi, pemeliharaan, pemanenan, dan transportasi dikumpulkan langsung dari peternakan ayam broiler. Proses produksi ayam broiler memerlukan *input* bahan baku (*day-old chicks*), bahan tambahan (air, bahan pembersih (*sodium hypochlorite*, *formaldehyde*, kalium *permanganate*, *benzal chloride*), dan sekam padi), serta sumber energi (listrik dan LPG (*liquefied petroleum gas*)). Produksi ayam broiler di peternakan akan menghasilkan produk utama berupa ayam hidup. Selain produk utama, produksi ayam broiler juga menghasilkan limbah (limbah cair dan *biowaste*) serta emisi. Proses

transportasi ayam hidup ke rumah pemotongan ayam juga memerlukan *input* berupa bahan bakar solar.

Subsistem produksi ayam potong meliputi proses penerimaan ayam hidup, penimbangan, penggantungan, pemingsanan, penyembelihan, penirisan darah, perebusan, pencabutan bulu, pemotongan kepala dan leher, pengeluaran jeroan, pemotongan kaki, pencucian dan perendaman karkas, penimbangan dan *grading*, pengemasan, penyimpanan dingin, pembekuan cepat, dan penyimpanan karkas beku. Inventori data dari proses produksi ayam potong dikumpulkan langsung dari rumah pemotongan ayam. Proses produksi ayam potong memerlukan *input* bahan baku (ayam hidup), bahan tambahan (air, *sodium hypochlorite*, *low-density polyethylene* (LDPE), *polypropylene*, dan *refrigerant* NH₃), dan sumber energi (listrik dan solar). Produksi ayam potong menghasilkan produk utama berupa karkas ayam beku yang telah dikemas. Produksi ayam potong juga menghasilkan produk samping (kepala, leher, hati, ampela, usus, jantung, dan kaki ayam), limbah (limbah cair, *biowaste*, dan limbah plastik), serta emisi. Hasil analisis inventori berupa rangkuman data inventori produksi ayam potong per unit fungsi dapat dilihat pada Tabel 1.

Analisis Jejak Karbon

Sumber emisi karbon di sepanjang siklus hidup ayam potong berasal dari penggunaan *material* dan energi, serta *output* berupa limbah dan emisi yang dihasilkan pada setiap tahapan prosesnya. Penggunaan *material* berupa bahan baku (*day-old chicks*), pakan, sekam padi, bahan pembersih (*sodium hypochlorite*, *formaldehyde*, kalium *permanganate*, dan *benzalkonium chloride*), bahan pendingin (*refrigerant* NH₃), serta bahan kemasan (LDPE dan *polypropylene*) memberikan kontribusi terhadap jejak karbon. Sumber energi pada produksi ayam potong berasal dari bahan bakar solar, LPG, dan listrik. Solar digunakan sebagai bahan bakar *boiler* untuk proses perebusan ayam, serta sebagai bahan bakar truk pengangkut pada proses transportasi. LPG digunakan sebagai bahan bakar *heater* di peternakan ayam. Sedangkan energi listrik digunakan untuk mengoperasikan mesin dan peralatan produksi. *Output* berupa limbah padat (bangkai ayam, *litter*, bulu ayam, dan sisa kemasan plastik), limbah cair (sisa air pencucian peralatan dan kandang, darah, sisa air perebusan, sisa air pencucian dan perendaman karkas), serta

limbah gas yang dihasilkan pada setiap tahapan proses juga menghasilkan emisi karbon.

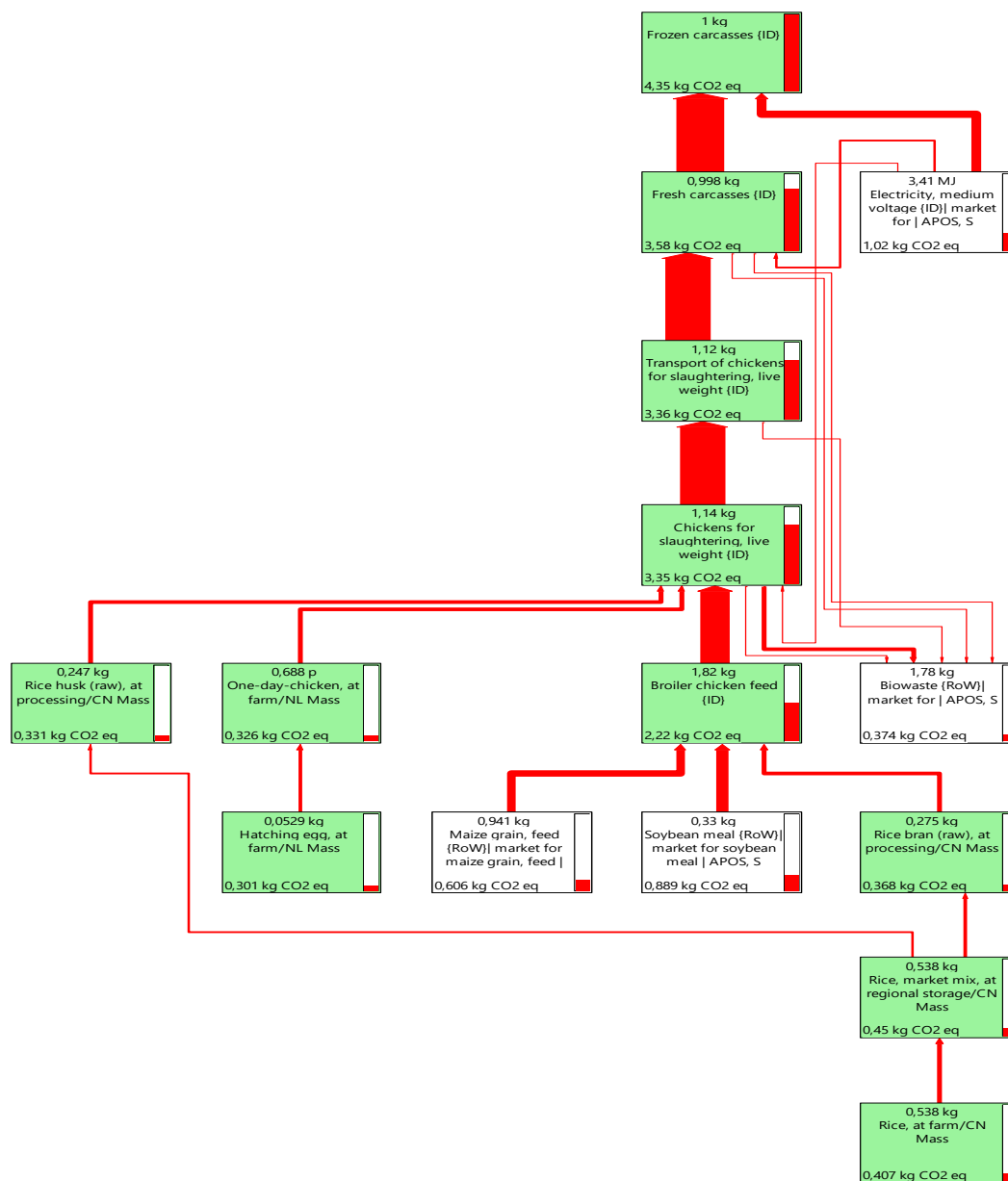
Nilai jejak karbon yang dihasilkan di sepanjang daur hidup produk ayam potong dapat dilihat pada Gambar 2 dan Tabel 2. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa 1 kg karkas beku kemas menghasilkan jejak karbon sebesar 4.35 kg CO₂ eq. Nilai jejak karbon yang dihasilkan dalam penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan hasil penelitian Silva et al. (2014) (2.75 kg CO₂ eq), Wiedemann et al. (2017) (2.80 kg CO₂

eq), Azmi et al. (2023) (4.09 kg CO₂ eq), tetapi lebih rendah dibandingkan dengan hasil penelitian Leinonen et al. (2012) (5.66 kg CO₂ eq), Pishgar-Komleh et al. (2017) (8.50 kg CO₂ eq), dan Cesari et al. (2017) (5.52 kg CO₂ eq). Perbedaan hasil tersebut dikarenakan adanya perbedaan lokasi geografis tempat penelitian dilakukan, batasan ruang lingkup dalam penilaian, kualitas data, jumlah penggunaan *material* dan energi, komposisi pakan, kebutuhan panas dan sumber pemanas yang digunakan di peternakan, serta penanganan limbah.

Tabel 1 Ringkasan data inventori pada siklus hidup produk ayam potong per unit fungsi

Input Output	Unit	Kuantitas (per unit fungsi ^a)		
		Produksi Pakan ^b	Produksi Ayam Broiler ^c	Produksi Ayam Potong ^c
Input				
Jagung	kg	1,25	-	-
Bungkil kedelai	kg	4.31 x 10 ⁻¹	-	-
Dedak gandum	kg	2.42 x 10 ⁻¹	-	-
Dedak padi	kg	3.63 x 10 ⁻¹	-	-
Tepung ikan	kg	1.21 x 10 ⁻¹	-	-
Air	m ³	-	5.64 x 10 ⁻²	1.50 x 10 ⁻³
Sodium hypochlorite	kg	-	1.81 x 10 ⁻⁵	2.83 x 10 ⁻⁴
Formaldehide	kg	-	1.31 x 10 ⁻⁶	-
Kalium permanganate	kg	-	6.05 x 10 ⁻⁴	-
Benzal chloride	kg	-	5.93 x 10 ⁻⁴	-
Sekam padi	kg	-	3.25 x 10 ⁻¹	-
Day-old chicks ^d	kg	-	3.78 x 10 ⁻²	-
Refrigerant NH ₃	kg	-	-	4.62 x 10 ⁻⁵
LDPE	kg	-	-	3.48 x 10 ⁻³
Polypropylene	kg	-	-	1.73 x 10 ⁻³
Listrik	MJ	7.17 x 10 ⁻¹	4.41 x 10 ⁻¹	3.16
LPG	MJ	-	1.85	-
Natural gas	MJ	3.07 x 10 ⁻¹	-	-
Solar	MJ	-	-	5.60 x 10 ⁻¹
Transport ^c	tkm ^e	3.39 x 10 ⁻²	3.91 x 10 ⁻²	-
Output				
Pakan ayam	kg	2.41	-	-
Ayam broiler	kg ^f	-	1.47	-
Karkas beku kemas	kg ^g	-	-	1
Co-products	kg	-	-	3.18 x 10 ⁻¹
Limbah cair	m ³	-	7.06 x 10 ⁻⁴	6.06 x 10 ⁻²
Biowaste	kg	-	2.25	9.84 x 10 ⁻²
Limbah plastik	kg	-	-	4.44 x 10 ⁻⁶

Note: a= per kg karkas beku kemas; b= *background system* (database Ecoinvent 3); c= *foreground system* (data primer); d= *background system* (database Agrifoot-print 5) e= ton.km (unit transportasi dalam SimaPro); f= kg ayam hidup; g= kg karkas.



Gambar 2 Nilai jejak karbon 1 kg karkas beku kemas (kg CO₂ eq) dari hasil software SimaPro

Jejak Karbon pada Subsistem Produksi Pakan

Subsistem produksi pakan merupakan subsistem yang memberikan kontribusi jejak karbon tertinggi (2.22 kg CO₂ eq (51.03%)) (Tabel 2). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian lain bahwa pakan merupakan penyumbang jejak karbon terbesar pada industri daging ayam (Pelletier 2008, Cesari et al. 2017, Kheiralipour et al. 2017, Pishgar-Komleh et al. 2017, Wiedemann et al. 2017, Suffian et al. 2018, Arrieta and González 2019, Ramedani et al. 2019, Martinelli et al. 2020). Dalam penelitian ini, produksi pakan berkontribusi sebesar 51.03% terhadap total jejak karbon. Sementara itu, Leinonen et al. (2012) melaporkan bahwa pakan berkontribusi lebih dari

70% dan hasil penelitian Pelletier (2008) pakan berkontribusi 82% terhadap emisi karbon.

Tabel 2 Nilai jejak karbon 1 kg karkas beku kemas pada setiap subsistem

Subsistem	Nilai Jejak Karbon (kg CO ₂ eq)
Produksi pakan	2.22
Produksi ayam broiler	1.14
Produksi ayam potong	0.99
Total	4.35

Emisi karbon yang dihasilkan pada subsistem produksi pakan berasal dari produksi bahan baku pakan (jagung, bungkil kedelai, dedak gandum, dedak padi, dan tepung ikan) serta

penggunaan energi (listrik, *natural gas*, dan solar). Produksi bungkil kedelai merupakan penyumbang emisi karbon terbesar (9.20×10^{-1} kg CO₂ eq (41.65%)), yang diikuti oleh produksi jagung (6.50×10^{-1} kg CO₂ eq (29.28%)), produksi dedak padi (3.20×10^{-1} kg CO₂ eq (14.25%)), dan penggunaan energi listrik (1.51×10^{-1} kg CO₂ eq (6.68%)) pada proses pengolahan pakan (Tabel 3; Gambar 3). Hal ini sejalan dengan penelitian Pardo et al. (2012) bahwa penggunaan bungkil kedelai dalam komposisi pakan merupakan penyumbang nilai dampak pemanasan global yang tinggi.

Pakan diproduksi melalui beberapa tahapan proses, yaitu produksi bahan pakan, transportasi bahan pakan, dan pengolahan pakan. Semua kegiatan ini bertanggung jawab terhadap nilai jejak karbon pada produksi pakan. Kalhor et al. (2016) menemukan bahwa kontribusi emisi terbesar berasal dari penggunaan bahan baku pakan ayam yang seringkali tidak dikelola dengan optimal. Studi tersebut juga menunjukkan adanya variasi signifikan dalam jejak karbon berdasarkan jenis pakan yang digunakan. Emisi karbon yang dihasilkan dari bahan pakan didominasi karena proses budidaya tanaman. Menurut González-García et al. (2014) dan López-Andrés et al. (2018), penggunaan bahan kimia dan energi pada produksi bahan pakan serta penggunaan energi pada pengolahan pakan merupakan proses utama yang berkontribusi terhadap emisi karbon yang dihasilkan. Pada proses produksi bahan pakan (budidaya tanaman) dibutuhkan *input* bahan kimia (pupuk kimia dan pestisida) dan bahan bakar fosil yang sangat besar untuk proses pembukaan lahan, perawatan dan perbaikan struktur tanah, serta pemupukan tanaman, yang dapat menimbulkan emisi karbon khususnya gas CO₂. Kegiatan penebangan pohon pada proses *land use change* dalam budidaya bahan pakan akan melepaskan karbon dari biomassa dan tanah ke atmosfer. Emisi CO₂ akibat *land use change* ini berkontribusi tinggi terhadap dampak pemanasan global (Leinonen and Williams 2015).

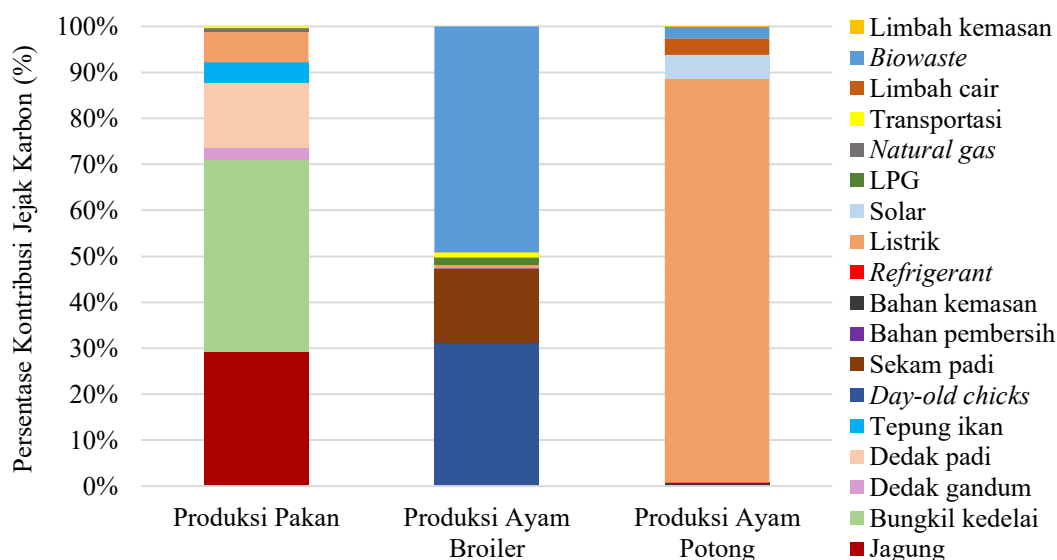
Jejak Karbon pada Subsistem Produksi Ayam Broiler

Subsistem produksi ayam broiler menghasilkan nilai jejak karbon (1.14 kg CO₂ eq (26.21%)) yang lebih rendah dibandingkan dengan subsistem produksi pakan, tetapi lebih tinggi dibandingkan dengan subsistem produksi ayam potong (Tabel 2). Pada subsistem produksi

ayam broiler, emisi karbon dihasilkan dari penggunaan bahan baku (*day-old chicks*), air, sekam padi, bahan pembersih, energi (listrik, LPG, dan solar), serta limbah (limbah cair dan *biowaste*). Persentase kontribusi jejak karbon pada subsistem produksi ayam broiler berdasarkan sumber emisinya dapat dilihat pada Gambar 3. *Biowaste*, yang didominasi oleh *litter*, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap emisi karbon (5.60×10^{-1} kg CO₂ eq (49.15%)). Produksi *day-old chicks* (3.60×10^{-1} kg CO₂ eq (31.17%)) dan sekam padi (1.80×10^{-1} kg CO₂ eq (16.04%)) memiliki kontribusi jejak karbon yang lebih kecil dibandingkan dengan *biowaste*. Limbah cair merupakan penyumbang jejak karbon terkecil (3.42×10^{-4} kg CO₂ eq (0.03%)) pada subsistem ini (Tabel 3; Gambar 3).

Tabel 3 Nilai jejak karbon per 1 kg karkas beku kemas berdasarkan sumber emisi di setiap subsistem

Sumber Emisi	Nilai Jejak Karbon (kg CO ₂ eq)
Subsistem Produksi Pakan	
Jagung	6.50×10^{-1}
Bungkil kedelai	9.20×10^{-1}
Dedak gandum	6.00×10^{-2}
Dedak padi	3.20×10^{-1}
Tepung ikan	1.00×10^{-1}
Listrik	1.51×10^{-1}
<i>Natural gas</i>	2.00×10^{-2}
Transportasi	8.67×10^{-3}
Subsistem Produksi Ayam Broiler	
<i>Day-old chicks</i>	3.60×10^{-1}
Sekam padi	1.80×10^{-1}
Bahan pembersih	2.05×10^{-3}
Listrik	1.00×10^{-2}
LPG	2.00×10^{-2}
Limbah cair	3.42×10^{-4}
<i>Biowaste</i>	5.60×10^{-1}
Transportasi	1.00×10^{-2}
Subsistem Produksi Ayam Potong	
Bahan pembersih	1.00×10^{-4}
Bahan kemasan	1.00×10^{-2}
<i>Refrigerant</i> NH ₃	1.00×10^{-4}
Listrik	8.70×10^{-1}
Solar	5.00×10^{-2}
Limbah cair	4.00×10^{-2}
<i>Biowaste</i>	3.00×10^{-2}
Limbah kemasan	1.98×10^{-6}



Gambar 3 Persentase kontribusi jejak karbon berdasarkan sumber emisi pada setiap subsistem

Pada penelitian ini, *biowaste* memberikan kontribusi jejak karbon sebesar 49.15%. Hasil ini sejalan dengan hasil penelitian lain (Suffian et al. 2018) yang menyatakan bahwa pengelolaan limbah padat organik pada peternakan ayam memberikan kontribusi yang tinggi terhadap emisi karbon. Chai et al. (2015) menyatakan bahwa limbah organik dapat menambah emisi metana dan karbon dioksida akibat proses dekomposisi bahan organik dalam limbah. Hasil ini sejalan dengan Lima et al. (2019) bahwa dari total emisi pengelolaan limbah organik di peternakan, kontribusi emisi CH_4 sebesar 18.9%. *Biowaste* yang dihasilkan di peternakan PT. X didominasi oleh limbah *litter*, yaitu sekam padi yang bercampur dengan kotoran ayam. Limbah *litter* yang terkumpul setelah panen akan disimpan dan ditumpuk di sekitar kandang. Penumpukan limbah ini dapat meningkatkan emisi NH_3 , N_2O , dan CH_4 yang dapat menimbulkan bau dan lalat di sekitar kandang.

Selain *biowaste*, penggunaan sekam padi dan *day-old chicks* juga memberikan kontribusi jejak karbon. Emisi yang dihasilkan ini berasal dari penggunaan bahan dan energi pada produksi sekam padi dan *day-old chicks*. Penggunaan energi listrik untuk mengoperasikan mesin dan peralatan produksi juga akan menghasilkan emisi CO_2 . Penggunaan bahan bakar LPG di masa *brooding* pada produksi ayam broiler juga menghasilkan emisi CO_2 , CH_4 , dan N_2O . Selain itu, penggunaan bahan bakar solar pada proses transportasi juga menghasilkan emisi karbon.

Jejak Karbon pada Subsistem Produksi Ayam Potong

Subsistem produksi ayam potong memberikan kontribusi jejak karbon yang lebih rendah ($0.99 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ (22.76%)) dibandingkan dengan subsistem produksi pakan dan produksi ayam broiler (Tabel 2). Hal ini konsisten dengan hasil dari beberapa penelitian lain (González-García et al. 2014, Kalhor et al. 2016). Emisi karbon yang dihasilkan pada subsistem produksi ayam potong berasal dari penggunaan energi (listrik dan solar), bahan kemasan, bahan pembersih, *refrigerant*, serta limbah (limbah cair, *biowaste*, dan limbah kemasan). Energi listrik merupakan kontributor terbesar terhadap nilai jejak karbon ($8.70 \times 10^{-1} \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ (87.97%)) pada subsistem ini (Tabel 3; Gambar 3). Penggunaan solar ($5.00 \times 10^{-2} \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ (5%)), limbah cair ($4.00 \times 10^{-2} \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ (3.65%)), dan *biowaste* ($3.00 \times 10^{-2} \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ (2.59%)) juga memberikan kontribusi jejak karbon pada subsistem ini, meskipun dalam jumlah yang tidak signifikan. Limbah kemasan memiliki kontribusi jejak karbon yang paling kecil ($1.98 \times 10^{-6} \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ (0.0002%)) pada subsistem ini (Tabel 3; Gambar 3).

Sumber emisi karbon yang dihasilkan pada produksi ayam potong didominasi oleh penggunaan energi listrik (87.97%). Sumber energi listrik ini digunakan untuk mengoperasikan mesin dan peralatan produksi serta lampu penerangan yang dibutuhkan selama proses produksi. Penggunaan energi listrik didominasi

oleh keperluan pendingin yaitu untuk mengoperasikan kompresor mesin pendingin. RPA PT. Y memiliki 4 unit kompresor ammonia yang digunakan untuk mendinginkan ruangan *clean area, flake ice machine, chiller, air blast freezer, packing room*, serta *cold storage*. Penggunaan energi listrik untuk mengoperasikan kompresor mesin pendingin tersebut sebanyak 97.32 % dari total konsumsi listrik di RPA. Hasil ini sejalan dengan hasil penelitian Hafiz et al. (2017) bahwa persentase konsumsi listrik di rumah pemotongan ayam sangat tinggi dan didominasi untuk mengoperasikan kompresor sebanyak 72%.

Tingginya konsumsi listrik menyebabkan semakin banyaknya emisi CO₂ dari hasil pembakaran bahan bakar pembangkit listrik. Menurut López-Andrés et al. (2018), listrik, uap, dan proses pendinginan memberikan dampak yang signifikan terhadap rumah potong hewan. Penelitian Silva et al. (2014) menyoroti bahwa penggunaan energi dalam pabrik pengolahan ayam merupakan salah satu sumber emisi karbon terbesar, khususnya karena bergantung pada energi fosil seperti minyak bumi dan batu bara. Menurut Radu et al. (2013), minyak bumi serta batu bara akan menghasilkan emisi CO₂ yang tinggi ketika proses pembakaran untuk menghasilkan energi. Selain gas CO₂, proses pembakaran juga menghasilkan gas lain (CH₄, N₂O, HFC, PFC, dan SF₆) yang bisa dikonversi menjadi CO₂ ekuivalen.

Nilai jejak karbon pada subsistem produksi ayam potong dalam penelitian ini (0.99 kg CO₂ eq) lebih tinggi dibandingkan Skunca et al. (2018) (0,41 ± 0,11 kg CO₂ eq). Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi ayam potong dalam penelitian ini membutuhkan konsumsi energi yang lebih tinggi (3.87 MJ/unit fungsi) dibandingkan produksi karkas ayam di Serbia (1.40 ± 1.01 MJ/unit fungsi) dalam penelitian Skunca. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan efisiensi energi mesin yang digunakan serta perbedaan lama penyimpanan karkas ayam di *cold storage*. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa produksi ayam potong di RPA PT. Y kurang efisien dibandingkan di Serbia. Penggunaan energi listrik pada fasilitas produksi di negara berkembang memiliki dampak yang lebih tinggi dibandingkan di negara maju, terutama karena ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.

Skenario Perbaikan

Berdasarkan hasil perhitungan LCA, dapat diidentifikasi bahwa masih ada peluang perbaikan dalam upaya mengurangi jejak karbon di industri ayam potong. Rekomendasi skenario perbaikan untuk mengurangi jejak karbon dapat diimplementasikan untuk setiap subsistem berdasarkan sumber emisi terbesar.

Pada subsistem produksi pakan, proses produksi bahan pakan khususnya produksi bungkil kedelai menghasilkan jejak karbon yang paling tinggi (41.65%). Substitusi bahan pakan khususnya bungkil kedelai dengan bahan pakan lokal merupakan strategi yang relevan untuk mengurangi jejak karbon (Kebreab et al. 2016, Garcia-Launay et al. 2018, Tallentire et al. 2018). Menurut Giannenas et al. (2017), menambahkan *protease* dan mengganti bungkil kedelai menghasilkan kinerja lingkungan yang lebih baik. Sejalan dengan Arroyo et al. (2013) bahwa substitusi bungkil kedelai sangat efisien dalam mengurangi dampak pemanasan global. Sumber protein lokal, seperti bungkil kelapa (Haryati et al. 2006) dan bungkil inti sawit (Pasaribu 2018) dapat digunakan untuk menggantikan sebagian atau seluruh bungkil kedelai dalam pakan. Berdasarkan perhitungan dampak dalam *software* SimaPro, produksi bungkil kelapa (0.613 kg CO₂ eq) dan produksi bungkil inti sawit (0.173 kg CO₂ eq) menghasilkan jejak karbon yang lebih kecil dibandingkan dengan produksi bungkil kedelai (0.92 kg CO₂ eq). Hasil penelitian Dairo and Fasuyi (2008) menunjukkan bahwa bungkil inti sawit dan bungkil kelapa dapat menjadi sumber protein yang efektif dan berkelanjutan dalam pakan ternak. Penggunaan sumber daya lokal yang lebih berkelanjutan sebagai pengganti parsial bungkil kedelai dapat mengurangi emisi karbon akibat penggunaan bahan kimia dan energi yang tinggi dari produksi kedelai yang intensif. Hal ini juga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan pakan impor dan berkontribusi pada pengurangan jejak karbon karena sumber lokal yang lebih berkelanjutan.

Biowaste memberikan kontribusi jejak karbon terbesar (49.15%) pada subsistem produksi ayam broiler. Pengelolaan *biowaste*, yang didominasi oleh *litter*, di peternakan yang dievaluasi dalam penelitian ini masih belum optimal. Peningkatan pengelolaan *biowaste* melalui pengolahan *litter* menjadi kompos dapat menjadi opsi perbaikan untuk mengurangi emisi karbon. Mengolah *litter* menjadi kompos dapat

mengurangi emisi metana dan meningkatkan nilai tambah sebagai pupuk organik (Lima et al. 2019). Pengurangan emisi ini terjadi karena adanya proses penguraian bahan organik dalam *litter* selama pengomposan. Pada penelitian Cesari et al. (2017), 50% *biowaste* dari peternakan diolah menjadi kompos, sehingga dampak pemanasan global yang ditimbulkan (3.03 kg CO₂ eq) menjadi lebih kecil dibandingkan dengan hasil penelitian ini. *Litter* yang diolah menjadi pupuk organik dapat memberikan manfaat lingkungan tambahan dengan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia.

Pada subsistem produksi ayam potong, energi listrik merupakan sumber emisi terbesar (87.97%). Penggunaan energi listrik pada produksi ayam potong didominasi untuk mengoperasikan kompresor mesin pendingin (97.32%). Opsi perbaikan yang dapat dilakukan berdasarkan sumber emisi utama tersebut adalah melalui peningkatan efisiensi energi pada sistem pendingin. Peningkatan efisiensi energi dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi kompresor berdaya hemat dan teknologi *inverter* untuk mengurangi konsumsi listrik pada sistem pendingin. Sejalan dengan penelitian Hafiz et al. (2017) yang menyatakan bahwa pemasangan *inverter* pada kompresor refrigerasi di rumah potong hewan di Malaysia dapat mengurangi konsumsi listrik hingga 10%. Pengurangan konsumsi energi secara langsung dapat menurunkan emisi GRK seperti karbon dioksida (CO₂), yang biasanya dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan jejak karbon pada produksi ayam potong menunjukkan bahwa 1 kg karkas beku kemas menghasilkan jejak karbon sebesar 4.35 kg CO₂ eq. Subsistem produksi pakan merupakan subsistem yang memberikan kontribusi jejak karbon tertinggi (51.03%), dengan produksi bungkil kedelai sebagai sumber emisi utama (41.65%). Subsistem produksi ayam broiler merupakan penyumbang jejak karbon tertinggi kedua (26.21%), dengan *biowaste* sebagai sumber emisi utama (49.15%). Sedangkan subsistem produksi ayam potong merupakan kontributor jejak karbon terendah (22.76%), dengan energi listrik sebagai sumber emisi utama (87.97%). Rekomendasi perbaikan untuk mengurangi jejak karbon diantaranya substitusi bahan pakan khususnya bungkil kedelai dengan

bahan pakan lokal, peningkatan pengelolaan *biowaste* melalui pengolahan *litter* menjadi kompos, dan peningkatan efisiensi energi pada sistem pendingin.

Penelitian ini hanya menganalisis jejak karbon pada batasan sistem *cradle-to-gate*, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan batasan sistem yang lebih komprehensif yaitu *cradle-to-grave*, agar nilai jejak karbon dapat terkuantifikasi secara menyeluruh di sepanjang rantai pasok. Penelitian ini hanya menganalisis dari aspek lingkungan saja, sehingga perlu dilakukan analisis dari aspek ekonomi dan sosial untuk mewujudkan tiga pilar keberlanjutan pada agroindustri ayam potong.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Industri Pertanian, Universitas Linggabuana PGRI Sukabumi atas dukungan fasilitas dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdallah, L., and T. El-Shennawy. 2013. Reducing carbon dioxide emissions from electricity sector using smart electric grid applications. *Journal of Engineering (United Kingdom)* 2013:1–8.
- Arrieta, E. M., and A. D. González. 2019. Energy and carbon footprints of chicken and pork from intensive production systems in Argentina. *Science of the Total Environment* 673:20–28.
- Arroyo, J., L. Fortun-Lamothe, A. Auvergne, J. P. Dubois, F. Lavigne, M. Bijja, and J. Aubin. 2013. Environmental influence of maize substitution by sorghum and diet presentation on goose foie gras production. *Journal of Cleaner Production* 59:51–62.
- Azmi, S., T. Djatna, Suprihatin, and N. S. Indrasti. 2021. Analysis and design of life cycle assessment system of chicken meat based on digital business ecosystem. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian* 31:164–175.
- Azmi, S., Suprihatin, N. S. Indrasti, and M. Romli. 2023. The assessment of environmental impact of the chicken meat agroindustry in Indonesia: Life cycle assessment (LCA) perspective. *Tropical Animal Science Journal* 46(2):249–260.

- Browne, D., B. O'Regan, and R. Moles. 2009. Use of carbon footprinting to explore alternative household waste policy scenarios in an Irish city-region. *Resources, Conservation and Recycling* 54(2):113–122.
- Cesari, V., M. Zucali, A. Sandrucci, A. Tamburini, L. Bava, and I. Toschi. 2017. Environmental impact assessment of an Italian vertically integrated broiler system through a life cycle approach. *Journal of Cleaner Production* 143:904–911.
- Chai, C., D. Zhang, Y. Yu, Y. Feng, and M. S. Wong. 2015. Carbon footprint analyses of mainstream wastewater treatment technologies under different sludge treatment scenarios in China. *Water (Switzerland)* 7(3):918–938.
- Dairo, F. A. S., and A. O. Fasuyi. 2008. Evaluation of fermented palm kernel meal and fermented copra meal proteins as substitute for soybean meal protein in laying hens diets. *Journal of Central European Agriculture* 9(1):35–43.
- Garcia-Launay, F., L. Dusart, S. Espagnol, S. Laisse-Redoux, D. Gaudré, B. Méda, and A. Wilfart. 2018. Multiobjective formulation is an effective method to reduce environmental impacts of livestock feeds. *British Journal of Nutrition* 120:1298–1309.
- Giannenas, I., E. Bonos, V. Anestis, G. Filioussis, D. K. Papanastasiou, T. Bartzanas, N. Papaioannou, A. Tzora, and I. Skoufos. 2017. Effects of protease addition and replacement of soybean meal by corn gluten meal on the growth of broilers and on the environmental performances of a broiler production system in Greece. *PLoS ONE* 12:1–26.
- González-García, S., Z. Gomez-Fernández, A. C. Dias, G. Feijoo, M. T. Moreira, and L. Arroja. 2014. Life cycle assessment of broiler chicken production: A Portuguese case study. *Journal of Cleaner Production* 74:125–134.
- Hafiz, M. I. M., Z. M. Zulfattah, N. A. Munajat, A. B. F. Sakinah, and H. M. Asyraf. 2017. Cleaner production implementation at chicken slaughtering plant. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 12:4324–4328.
- Haryati, T., M. H. Togatorop, A. P. Sinurat, T. Purwadaria, and Murtiyeni. 2006. Pemanfaatan bungkil kelapa fermentasi dengan *Aspergillus niger* dalam ransum ayam pedaging. *JITV* 11(3):182–190.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2-Energy Chapter 2-Stationary Combustion*. IPCC, Washington, DC.
- ISO (International Organization for Standardization). 2006. *ISO 14040:2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. ISO, Switzerland.
- Kalhor, T., A. Rajabipour, A. Akram, and M. Sharifi. 2016. Environmental impact assessment of chicken meat production using life cycle assessment. *Information Processing in Agriculture* 3:262–271.
- Kebreab, E., A. Liedke, D. Caro, S. Deimling, M. Binder, and M. Finkbeiner. 2016. Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *Journal of Animal Science* 94:2664–2681.
- Kheiralipour, K., Z. Payandeh, and B. Khoshnevisan. 2017. Evaluation of environmental impacts in Turkey production system in Iran. *Iranian Journal of Applied Animal Science* 7:507–512.
- Leinonen, I., and A. G. Williams. 2015. Effects of dietary protease on nitrogen emissions from broiler production: A holistic comparison using life cycle assessment. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95:3041–3046.
- Leinonen, I., A. G. Williams, J. Wiseman, J. Guy, and I. Kyriazakis. 2012. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poultry Science* 91:8–25.
- Lima, N. D. da S., I. de A. Nääs, R. G. Garcia, and D. J. de Moura. 2019. Environmental impact of Brazilian broiler production process: Evaluation using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 237:117752.
- López-Andrés, J. J., A. A. Aguilar-Lasserre, L. F. Morales-Mendoza, C. Azzaro-Pantel, J. R. Pérez-Gallardo, and J. O. Rico-Contreras. 2018. Environmental impact assessment of chicken meat production via an integrated methodology based on LCA, simulation

- and genetic algorithms. *Journal of Cleaner Production* 174:477–491.
- Macleod, M., P. J. Gerber, A. Mottet, G. Tempio, A. Falcucci, C. Opio, T. Vellinga, B. Henderson, H. Steinfeld, and H. Steinfeld. 2013. *Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains - A global life cycle assessment*. Page *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Martinelli, G., E. Vogel, M. Decian, M. J. U. S. Farinha, L. V. M. Bernardo, J. A. R. Borges, R. M. T. Gimenes, R. G. Garcia, and C. F. Ruviano. 2020. Assessing the eco-efficiency of different poultry production systems: An approach using life cycle assessment and economic value added. *Sustainable Production and Consumption* 24:181–193.
- Minx, J. C., T. Wiedmann, R. Wood, G. P. Peters, M. Lenzen, A. Owen, K. Scott, J. Barrett, K. Hubacek, G. Baiocchi, A. Paul, E. Dawkins, J. Briggs, D. Guan, S. Suh, and F. Ackerman. 2009. Input-output analysis and carbon footprinting: An overview of applications. *Economic Systems Research* 21(3):187–216.
- Pardo, G., A. Ciruelos, N. Lopez, L. Gonzalez, S. Ramos, and J. Zufia. 2012. Environmental improvement of a chicken product through life cycle assessment methodology. Pages 86–91 in M. Corson and H. van der Werf, editors. *Proceedings of the 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector (LCA Food 2012)*. INRA, INRA, Rennes, France.
- Pasaribu, T. 2018. Upaya meningkatkan kualitas bungkil inti sawit melalui teknologi fermentasi dan penambahan enzim untuk unggas. *Wartazoa* 28(3):119–128.
- Pelletier, N. 2008. Environmental performance in the US broiler poultry sector: Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emissions. *Agricultural Systems* 98:67–73.
- Pishgar-Komleh, S. H., A. Akram, A. Keyhani, and R. van Zelm. 2017. Life cycle energy use, costs, and greenhouse gas emission of broiler farms in different production systems in Iran—a case study of Alborz province. *Environmental Science and Pollution Research* 24:16041–16049.
- Radu, A. L., M. A. Scricciu, and D. M. Caracota. 2013. Carbon footprint analysis: Towards a projects evaluation model for promoting sustainable development. Pages 353–363 *International Economic Conference of Sibiu 2013 Post Crisis Economy: Challenges and Opportunities, IECS 2013*. y Elsevier B.V.
- Ramedani, Z., L. Alimohammadian, K. Kheialipour, P. Delpisheh, and Z. Abbasi. 2019. Comparing energy state and environmental impacts in ostrich and chicken production systems. *Environmental Science and Pollution Research* 26:28284–28293.
- Silva, V. P., H. M. G. van der Werf, S. R. Soares, and M. S. Corson. 2014. Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: An LCA approach. *Journal of Environmental Management* 133:222–231.
- Skunca, D., I. Tomasevic, I. Nastasijevic, V. Tomovic, and I. Djekic. 2018. Life cycle assessment of the chicken meat chain. *Journal of Cleaner Production* 184:440–450.
- Suffian, S. A., A. A. Sidek, T. Matsuto, M. H. Al Hazza, H. M. Yusof, and A. Z. Hashim. 2018. Greenhouse gas emission of broiler chicken production in Malaysia using life cycle assessment guidelines: A case study. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture* 3:87–97.
- Tallentire, C. W., S. G. Mackenzie, and I. Kyriazakis. 2018. Can novel ingredients replace soybeans and reduce the environmental burdens of European livestock systems in the future? *Journal of Cleaner Production* 187:338–347.
- Wiedemann, S. G., E. J. McGahan, and C. M. Murphy. 2017. Resource use and environmental impacts from Australian chicken meat production. *Journal of Cleaner Production* 140:675–684.