

Life Cycle Assessment (LCA) Produksi Produk Berbasis Kayu: Sebuah Ulasan Singkat

Hardiansyah Tambunan^{1*}, Sundari Marsudi¹, Dayun Ifanda¹, and Hanna Tresia Silalahi¹

¹ Department of Forest Management, Faculty of Agriculture and Forestry, Universitas Satya Terra Bhinneka, Medan, Indonesia

Corresponding Author: hardiansyahtambunan@satyaterrabhinneka.ac.id

ABSTRAK

Introduction/Main Objectives: Industri kehutanan, khususnya yang memproduksi produk berbasis kayu, harus memerhatikan aspek lingkungan guna menjamin produk tidak berdampak negatif bagi kesehatan dan lingkungan secara signifikan dan dapat diterima di pasar, khususnya pasar luar negeri. **Background Problems:** Aktivitas dari industri kehutanan menghasilkan limbah dalam jumlah yang besar. Emisi lingkungan ke udara, tanah dan air dipicu dalam berbagai jenis dan jumlah yang berdampak pada lingkungan. **Novelty:** *Life Cycle Assessment* (LCA) beberapa produk berbasis kayu, khususnya produk penghasil energi (energi biomassa) masih belum banyak dilakukan. Selain itu, artikel ini membahas implementasi LCA produk berbasis kayu di luar negeri (Asia dan Amerika). **Research Methods:** Penelitian ini menggunakan metode *narrative literature review* (NLR) berupa artikel ikhtisar (*overview article*) dengan mengungkapkan hasil-hasil penelitian dalam bentuk naratif atau deskriptif. **Finding/Results:** LCA pada proses produksi di industri kehutanan, khususnya pada produk berbasis kayu, yaitu papan partikel, kayu lapis, dan pelet kayu (energi biomassa). Kegiatan produksi dari penyiapan bahan baku (*input*) hingga produk jadi, dan limbah yang dihasilkan dari proses produksi (*output*) yang menggunakan energi dan berdampak terhadap lingkungan. **Conclusion:** Berdasarkan hasil LCA, diketahui bahwa produk tersebut berdampak terhadap lingkungan seperti emisi GRK, asidifikasi, dan eutrofikasi akibat aliran produksi.

ARTICLE INFO

Keywords:
industri kehutanan, kayu,
LCA, produk, lingkungan

1. PENDAHULUAN

Kayu adalah bahan yang dapat diperbarui, diproduksi melalui proses alami dalam ekosistem hutan. Siklus hidup bahan kayu meliputi pertumbuhan pohon, pemanenan dan pengolahan biomassa kayu, pembuatan dan perakitan produk berbasis kayu, pemanfaatan dan pemeliharaan, serta pembongkaran dan pengelolaan akhir masa pakai. Industri kehutanan, khususnya yang memproduksi produk berbasis kayu, sangat bergantung pada sumber daya alam kayu, energi, dan air untuk menjalankan aktivitasnya. Selain itu, aktivitas dari industri kehutanan juga menghasilkan limbah dalam jumlah yang besar. Oleh karena itu, emisi lingkungan ke udara, tanah dan air dipicu dalam berbagai jenis dan jumlah yang berdampak pada lingkungan. Kekhawatiran masyarakat global semakin meningkat seiring dengan semakin mengkhawatirkannya isu lingkungan, khususnya pemanasan global (Sathre dan Garcia, 2014; Geetha *et al.*, 2020).

Industri kehutanan yang menghasilkan produk berbasis kayu, harus memerhatikan aspek lingkungan guna menjamin produk tidak berdampak negatif bagi kesehatan dan lingkungan secara signifikan dan dapat diterima di pasar, khususnya pasar luar negeri. Salah satu regulasi yang diberlakukan di Uni Eropa pada produk berbasis kayu untuk membuktikan bahwa produk tersebut ramah lingkungan adalah sertifikasi ecolabel. Untuk

memperoleh sertifikat ecolabel dan kepentingan untuk mengembangkan produk yang lebih hijau atau proses yang lebih hijau, maka pendekatan terintegrasi penilaian siklus hidup/*life cycle assessment* (LCA) hadir untuk diterapkan secara luas oleh pemerintah dan pemangku kepentingan untuk menilai kinerja lingkungan dari produk atau jasa (Geetha *et al.*, 2020; Prabowo dan Suhariyanto, 2021).

Metode LCA telah dikembangkan untuk mengklasifikasikan konsekuensi merugikan yang paling kritis dan titik utama seperti proses dan metode yang mengarah langsung pada dampak lingkungan (Azman *et al.*, 2021). Dengan demikian, LCA menilai aspek lingkungan dan potensi dampak yang terkait dengan suatu produk. Satu-satunya metode yang tersedia untuk mengukur dampak produk dan sistem terhadap lingkungan. Berdasarkan hal tersebut, perlu diketahui bagaimana dampak dari kegiatan industri kehutanan yang memproduksi produk berbasis kayu terhadap lingkungan, melalui metode penilaian LCA. Tulisan ini membahas mengenai metode LCA dalam penilaian dampak suatu proses produksi produk terhadap lingkungan dan menyajikan dampak beberapa produk berbasis kayu terhadap lingkungan dengan penilaian LCA.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Produk Berbasis Kayu*

Kayu telah digunakan oleh manusia sejak zaman dahulu. Bahan yang sangat penting

dalam berbagai aplikasi, mulai dari konstruksi hingga furnitur. Sifat khas yang membuat kayu unggul, yaitu alami, terbarukan, dapat didaur ulang, mudah dalam pengerjaan, dapat terurai secara alami, dan higroskopis. Akan tetapi, ketersediaan kayu dari hutan alam semakin terbatas akibat dari deforestasi yang terus berlangsung akibat tekanan ekonomi dan praktik pengelolaan yang tidak berkelanjutan (Warman, 2014). Oleh karena itu, untuk mengatasi hal tersebut, beberapa upaya yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan kayu secara lebih efisien, optimalisasi penggunaan bahan baku alami, dan mengubah limbah secara berkelanjutan menjadi produk bernilai tambah untuk pengembangan produk berbasis kayu (Savov *et al.*, 2023). Produk berbasis kayu adalah produk yang terbuat dari kayu, terutama yang terbuat dari limbah kayu dan produk sampingan dari operasional industri berbasis kayu (Pandey, 2022). Produk berbasis kayu dapat berupa produk non-energi dan produk energi. Pemanfaatan limbah kayu untuk menghasilkan energi meliputi arang, briket, briket arang, pelet kayu (Nuryawan *et al.*, 2021; Tambunan *et al.*, 2023; Simatupang *et al.*, 2024), sedangkan pemanfaatan non-energi meliputi produksi papan partikel, papan serat, oriented strand board (OSB), kayu lapis, kertas, kemasan, dan lain-lain (Nuryawan *et al.*, 2022; Hassegawa *et al.*, 2022). Substitusi produk fosil dengan produk berbasis kayu

dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca selama siklus hidup produk (*life cycle of products*) (Hassegawa *et al.*, 2022). Meskipun demikian, penting untuk memahami terkait dampak terhadap lingkungan dari produksi produk berbasis kayu melalui penilaian siklus hidup (*life cycle assesment*).

2.2. Life Cycle Assessment (LCA)

Life Cycle Assessment (LCA) umum diterapkan untuk mengukur keberlanjutan dari suatu kegiatan produksi dengan menggunakan teknologi. LCA merupakan alat untuk menilai lingkungan produk, proses, dan layanan. Mengintegrasikan dampak lingkungan selama siklus hidup suatu produk dan menghubungkannya dengan masalah lingkungan tertentu. Selain itu, juga memungkinkan penetapan prioritas tertentu untuk menentukan strategi pencegahan untuk peningkatan kinerja lingkungan (Gil, 2013). LCA sering digunakan dalam industri sebagai alat untuk mengukur dampak dari opsi produksi yang dijalankan.

LCA muncul dari tumbuhnya kesadaran akan perlindungan lingkungan dan dampak yang ditimbulkan oleh produk (barang dan jasa), mengingat dampak yang benar-benar signifikan, dengan mempertimbangkan seluruh siklus hidup (Iritani *et al.*, 2014). LCA menguantifikasi *input* (bahan dan energi) dan *output* (limbah gas, air, dan padatan) dari suatu produk/sistem dan mengevaluasi dampak

lingkungan dari setiap tahap siklus hidup. Alat mengukur keberlanjutan dan dampak “*cradle-to-grave*” atau “*cradle-to-cradle*” mulai dari perolehan bahan baku, pemrosesan, konsumsi, dan transportasi hingga pembuangan akhir suatu produk (Pokhrel *et al.*, 2022). Langkah pengerjaan LCA berdasarkan metodologi ISO 14010 terdiri atas empat fase sebagai berikut.

a. *Goal and scope definition*

Tujuan umum LCA, sebagai contoh pada sistem produksi produk berbasis kayu, yaitu menentukan dampak lingkungan dari siklus produksi dan mengidentifikasi sumber penyebab dampak lingkungan terbesar dari siklus tersebut.

b. *Life Cycle Inventory (LCI)*

Langkah kedua adalah mengelompokkan dan mengompilasi *input* dan *output* dari masing-masing tahapan yang menjadi ruang lingkup.

c. *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*

Tahap LCIA adalah mengonversi data *input* dan *output* dari LCI sehingga menghasilkan dampak lingkungan pada masing-masing siklus dan bagian penyebab dari dampak tersebut.

d. *Interpretation*

Tahap pembahasan hasil dari tahap sebelumnya dalam kaitannya dengan tujuan LCA (Irawati dan Kurniawati, 2020).

LCA adalah cara yang diterima secara internasional untuk mengukur dampak dan keluaran suatu produk dan efek yang sesuai

terhadap lingkungan. LCI sebagai salah satu komponen dari proses LCA yang merupakan proses berbasis data yang objektif untuk mengukur energi dan *input* bahan mentah serta emisi ke udara, air, dan tanah. *Lifecycle impact assessment* (LCIA) mencirikan dan menghitung efek dari emisi yang diidentifikasi dalam LCI ke dalam seperti potensi pemanasan global, modifikasi habitat, asidifikasi, atau polusi suara. Hasil dari LCA dapat digunakan untuk memilih lebih banyak produk "ramah lingkungan" atau untuk meningkatkan dampak lingkungan dari produk tertentu (Reed *et al.*, 2012).

LCA telah menjadi pendekatan yang umum untuk mengidentifikasi, menguantifikasi, dan mengevaluasi potensi dampak lingkungan total dari proses produksi atau produk, mulai dari pengadaan bahan baku (*the cradle*), hingga produksi dan pemanfaatan (*the gates*) dan pembuangan akhir (*the grave*), serta menentukan cara untuk memperbaiki kerusakan lingkungan (Skowrońska dan Filipiek, 2014). Salah satu implementasi dari penilaian LCA pada suatu produksi, yaitu LCA pada proses produksi di industri kehutanan, khususnya pada produk berbasis kayu. Artikel ini menyajikan beberapa implementasi LCA pada produksi produk berbasis kayu.

3. METODE DAN ANALISIS DATA

Metode *narrative literature review* (NLR) berupa artikel ikhtisar (*overview article*) digunakan dalam artikel ini. Metode NLR adalah salah satu metode untuk melakukan tinjauan literatur secara kualitatif yang bertujuan untuk menyusun sebuah tinjauan atau rangkuman dari hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai suatu topik tertentu (Nahdiyin, 2022). Langkah-Langkah dalam proses NLR pada artikel ini dimulai dari memilih topik ulasan, mencari dan

4.1. Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) di Industri Kehutanan (Kayu)

Siklus hidup (*life cycle*) yang terkait dengan industri kayu secara umum dimulai dengan pengambilan bahan baku kayu, kemudian kegiatan produksi, penggunaan produk, dan diakhiri dengan pembuangan yang dikenal sebagai *cradle-to-grave*. Proses dalam setiap tahap siklus hidup saling bergantung, sehingga keluaran dari salah satu tahap akan menjadi masukan untuk tahap siklus hidup berikutnya. Siklus hidup yang terkait dengan industri kayu disajikan pada Gambar 1. Industri kayu dianggap sangat penting bagi siklus karbon global. Namun, kegiatan pengangkutan dan pengolahan kayu menghasilkan karbon baru. Emisi CO₂ hampir tidak dapat dihindari

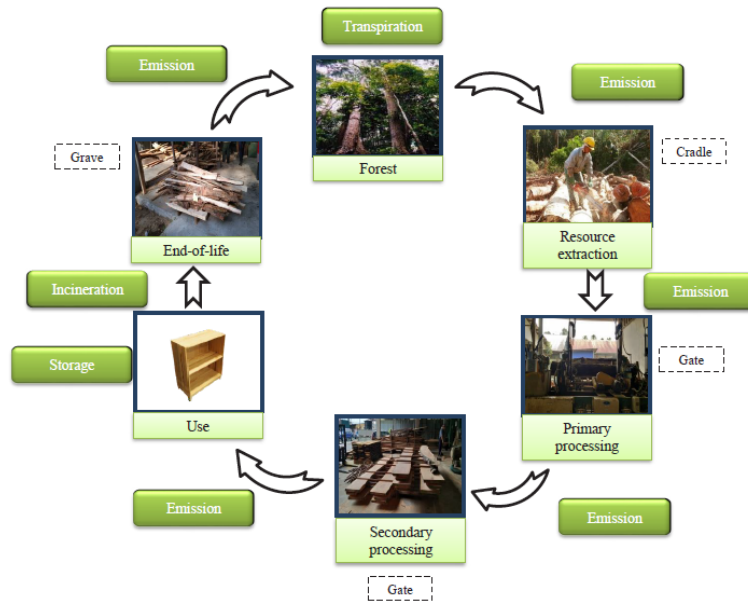
Gambar 1. Tahap siklus hidup *cradle-to-grave* industri kayu

memilih artikel yang sesuai, menganalisis dan mensintesis literatur, selanjutnya mengorganisasi penulisan ulasan. Pada metode ini, tidak ada analisis statistik yang digunakan terhadap data. Penulis mengungkapkan hasil-hasil penelitian dalam bentuk naratif atau deskriptif, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih holistik mengenai topik yang diteliti.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

sebagai akibat dari konsumsi energi selama kegiatan tersebut. Bahan bakar, terutama jenis fosil yang digunakan dalam kegiatan pengolahan kayu, memiliki kandungan karbon yang tinggi.

Terdapat beberapa penelitian LCA yang hanya berfokus pada penilaian *cradle-to-gate*. LCA parsial mengamati dari ekstraksi bahan baku dan diakhiri dengan kegiatan produksi. Konsep *cradle-to-gate* memberikan gambaran dampak terhadap lingkungan dalam rangka pembuatan suatu produk. Industri kayu yang memproduksi produk berbasis kayu berupa panel kayu atau bioenergi umumnya telah melakukan penilaian LCA, hal tersebut berkaitan dengan setiap tahap produksi yang berdampak terhadap lingkungan.



Sumber: Geetha *et al.* (2020)

4.2. Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) di Industri Kehutanan (Kayu)

4.2.1. Life Cycle Assessment (LCA) Papan Partikel Berkerapatan Menengah (MDP) yang Diproduksi di Brasil

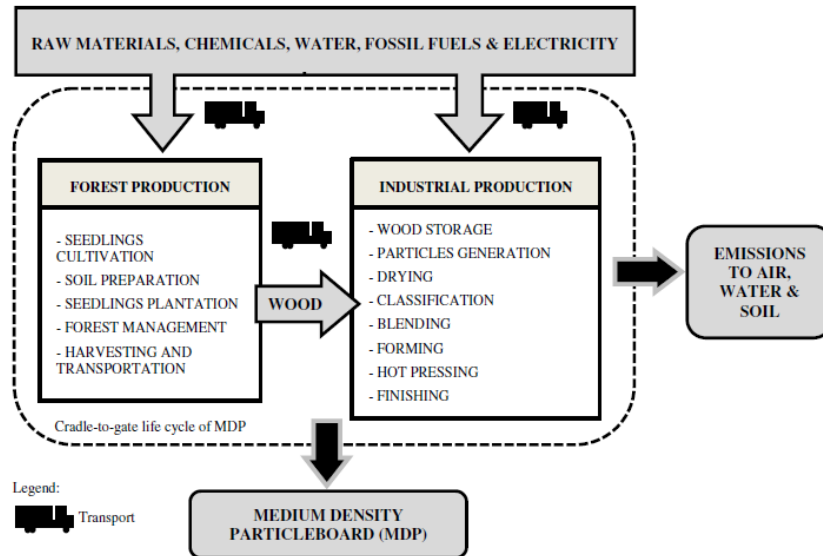
Latar belakang dari penelitian berkaitan dengan implementasi LCA MDP di Brazil adalah tidak ada LCA yang diterbitkan dari MDP yang diproduksi di Brasil, meskipun sejumlah penelitian telah dikembangkan untuk wilayah lain (Spanyol, AS, dan Portugal). Perbedaan utama mengenai produksi MDP di Brasil dan di wilayah tersebut terkait dengan sumber biomassa dan teknologi pembangkit energi di lokasi serta bahan bakar yang digunakan. Sementara di Amerika Serikat dan Eropa, kayu yang digunakan untuk memproduksi MDP sebagian besar adalah limbah kayu (prakonsumsi, misalnya dari operasi hutan dan

penggergajian, dan pascakonsumsi). Di Brasil, hutan khusus menyediakan biomassa untuk industri MDP. Di sisi lain, penelitian terbaru telah menganalisis penambahan limbah untuk menghasilkan panel kayu di Brasil. Mengenai penggunaan bahan bakar sebagai sumber energi panas dalam proses pembuatan MDP, baik penelitian di AS dan Eropa melaporkan penggunaan gas alam dan residu kayu. Sementara di pabrik Brasil, baik bahan bakar minyak berat (HFO) dan residu kayu digunakan. Oleh karena itu, disajikan LCA panel MDP yang diproduksi di Brasil.

Gambar 2 menyajikan batas sistem siklus hidup MDP dari perspektif *cradle-to-gate*. Unit fungsionalnya adalah produksi 1 m³ MDP tanpa pelapis, dengan ketebalan nominal 15 mm, kerapatan rata-rata 630 kg/m³, dan kadar air 8%. Produksi panel MDP ditandai dengan

penggunaan kayu yang berasal dari tanaman eukaliptus khusus.

Gambar 2. Batas sistem model siklus hidup MDP (perspektif *cradle-to-gate*)



Sumber: Silva *et al.* (2013)

Kegiatan utama yang termasuk dalam produksi industri adalah penerimaan dan penyimpanan kayu gelondongan, produksi, pengeringan, klasifikasi partikel, pencampuran, pembentukan lembaran, dan pengempaan serta penyelesaian. Kayu gelondongan yang disimpan dikupas kulitnya dan diproduksi *chips* dan *flake* diproduksi menggunakan *chopper* dan *ring flaker*. Partikel kayu kemudian dikeringkan dan diklasifikasikan. Partikel yang lebih besar membentuk lapisan internal panel, sedangkan yang lebih kecil tergabung dalam lapisan eksternal. Kulit kayu dan residu kayu lainnya dari proses manufaktur serta HFO dibakar untuk menghasilkan gas panas untuk pengeringan partikel dan proses pengempaan panas. Partikel kering kemudian dicampur dengan perekat sintetis dan lapisan partikel

yang direkatkan dibuat menggunakan mesin yang membentuk tiga lapisan panel. Langkah selanjutnya adalah pra pengempaan dan pengempaan panas (160–200°C) lembaran untuk menyatukan panel. Setelah itu, panel dipotong ke dimensi akhir dan diampelas.

Sejumlah subsistem tambahan dimasukkan dalam batas sistem. Termasuk *input* energi seperti pembangkit listrik dan bahan bakar (diesel dan HFO), produksi bahan kimia, seperti batu kapur, pupuk, dan herbisida untuk subsistem produksi hutan dan resin UF. Emulsi parafin dan amonium sulfat untuk subsistem produksi industri, dan proses transportasi. Data mewakili 1 tahun produksi MDP diperoleh dari pengukuran di tempat dan dokumen internal perusahaan seperti catatan konsumsi bahan baku, emisi, dan inventaris pengelolaan

limbah, selama 2011 dan 2012. Tabel 1 menunjukkan inventarisasi produksi hutan dan industri 1 m³ MDP. Tabel 2 menunjukkan inventarisasi produksi industri 1 m³ MDP.

Tabel 1. Inventarisasi produksi kehutanan (1 m³ MDP)

Inputs		Outputs	
Limestone (as calcium carbonate)	20 kg	Wood (as logs)	687.2 kg
Lubricants (oil and grease)	0.79 g		
Seedlings	0.52 kg		
Water	85 kg		
Energy consumption		Emissions to air	
Diesel	4.85 kg	Ammonia	75.1 g
Electricity	0.18 MJ	Carbon dioxide	15.1 kg
		Carbon monoxide	53.8 g
		Glyphosate particles	0.27 kg
		Nitrogen dioxide	10 g
		Nitrogen oxides	0.116 kg
		Particulate matter	10.3 g
		Sulfur dioxide	8.07 g
		VOCNM	78 g
Pesticides		Emissions to water	
Sulfluramid formicide	0.112 kg	Glyphosate particles	1.44 g
Glyphosate herbicide	0.154 kg	Runoff surface (from P ₂ O ₅)	0.11 kg
		Runoff surface and percolation (from N)	0.1 kg
Fertilizers		Emissions to soil	
Potassium chloride (60 % K ₂ O)	2.75 kg	Lubricants residue	2.36 g
Urea (46 % N)	0.1 kg		
Ammonium sulfate (21.2 % N)	0.4 kg		
Superphosphate (18.5 % P ₂ O ₅)	5.77 kg		

Sumber: Silva *et al.* (2013)

Penilaian dampak lingkungan yang terkait dengan produksi MDP dilakukan dengan menggunakan dua metode penilaian dampak siklus hidup (LCIA), yaitu CML 2001 (penurunan abiotik, asidifikasi, pemanasan global, eutrofikasi, dan oksidasi fotokimia) dan USEtox 2008 (ekotoksitas dan toksitas manusia). Tabel 3 menunjukkan hasil LCIA 1 m³ MDP dan Gambar 3 kontribusi relatif subsistem produksi hutan dan industri

terhadap dampak di setiap kategori dampak. Dapat diketahui, sebagian besar dampak dikaitkan dengan subsistem produksi industri, yang mewakili lebih dari 60% dampak di setiap kategori, kecuali kategori ekotoksitas, di mana produksi hutan merupakan kontribusi tertinggi terhadap dampak (sekitar 99%).

Tabel 2. Inventarisasi produksi industri (1 m³ MDP)

Inputs		Outputs	
Ammonium sulfate	1.38 kg	MDP panel	630 kg
Lubricants (oil and grease)	18 g		
Paraffin emulsion ^a	5.47 kg		
UF resin ^b	71.7 kg		
Water	90.4 kg		
Wood (as logs) ^c	687.2 kg		
Energy consumption		Emissions to air	
Diesel	1.72 kg	Ash (from wood residue)	0.39 kg
Electricity	507 MJ	Carbon dioxide (from fossil fuel) ^d	48 kg
Heavy fuel oil	13.7 kg	Carbon monoxide	0.19 kg
Wood residues	38.5 kg	VOC (not specified)	0.36 kg
		Formaldehyde	0.15 kg
		Hydrocarbons (not specified)	1.64 g
		Methane	1.69 g
		Nitrogen oxides	0.18 kg
		Particulate matter (not specified)	0.18 kg
		Sulfur oxides	1.32 kg
		VOCNM	9.48E-04 g
		Emissions to water	
		Ammonia	0.121 g
		BOD	0.616 g
		Effluent (not specified)	6 kg
		Formaldehyde	7.29E-02 g
		Suspended solids	24.4 g
		Emissions to soil	
		Lubricant residues	15.9 g
		Wood residues	97.2 kg

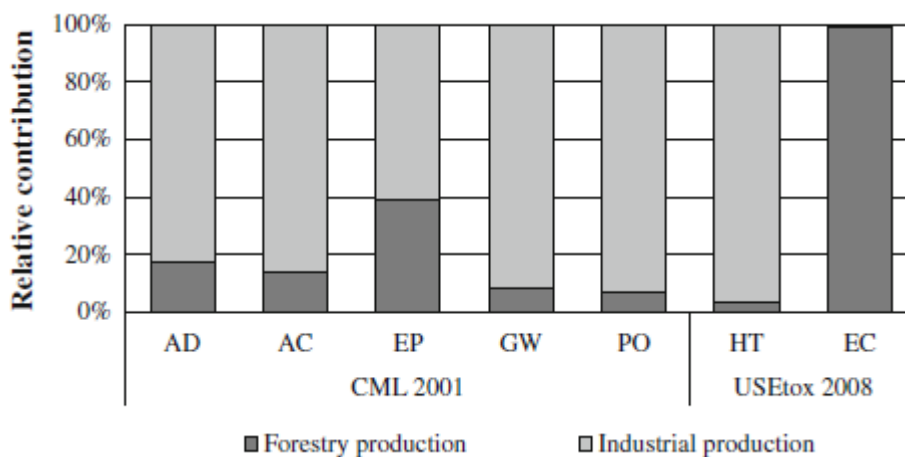
Sumber: Silva *et al.* (2013)

Tabel 3. Potensi dampak lingkungan dari 1 m³ MDP

Impact category	LCIA method	Unit	Value
Abiotic depletion (AD)	CML	kg Sb _{eq}	0.98
Acidification (AC)	CML	kg SO _{2eq}	2.40
Eutrophication (EP)	CML	kg PO ⁻³ _{4eq}	0.132
Global warming (GW)	CML	kg CO _{2eq}	333.28
Photochemical oxidation (PO)	CML	kg C ₂ H _{2eq}	0.28
Ecotoxicity (EC)	USEtox	PAF m ³ day	82.80
Human toxicity (HT)	USEtox	Cases	6.71E-07

Sumber: Silva *et al.* (2013)

Gambar 3. Kontribusi relatif (persen) subsistem produksi kehutanan dan industri untuk setiap kategori dampak



Sumber: Silva *et al.* (2013)

Penilaian LCA *cradle-to-gate* dari MDP yang diproduksi di Brasil, dengan mempertimbangkan dua subsistem utama (produksi hutan dan industri), inventarisasi terperinci mengenai produksi eukaliptus Brasil, dan produksi industri MDP dikumpulkan. Potensi dampak lingkungan dari MDP dinilai dalam tujuh kategori dampak, yaitu pengurangan abiotik (AD), asidifikasi (AC), eutrofikasi (EP), pemanasan global (GW), oksidasi fotokimia (PO), ekotoksisitas (EC), dan toksisitas manusia (HT), untuk mengidentifikasi hotspot utama untuk membantu industri panel kayu meningkatkan kelestarian lingkungan. Produksi industri bertanggung jawab atas sebagian besar dampak di semua kategori, kecuali EC. Hotspot utama yang teridentifikasi adalah penggunaan HFO sebagai sumber energi termal dalam pembuatan MDP serta produksi resin UF yang digunakan sebagai perekat sintetis. Herbisida glifosat adalah penyebab utama dampak di EC.

Skenario untuk substitusi HFO dinilai dan hasilnya menunjukkan bahwa substitusi HFO untuk residu kayu tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga layak terkait ketersediaan residu kayu yang dihasilkan di pabrik. Penggunaan solar juga dapat menjadi pilihan yang layak untuk mengurangi dampak lingkungan (Silva *et al.*, 2013).

4.2.2. Life Cycle Assessment (LCA) Proses Manufaktur Kayu Lapis di Cina

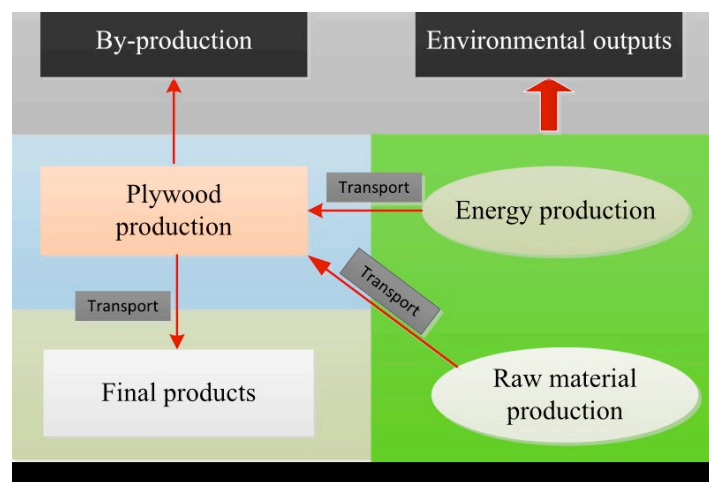
China merupakan salah satu produsen, pedagang, dan konsumen terbesar panel berbasis kayu di dunia. Provinsi Jiangsu adalah salah satu wilayah produksi panel berbasis kayu terbesar di Cina. Kayu lapis adalah produk bangunan berbasis kayu yang biasa digunakan di Cina untuk konstruksi komersial dan residensial. Proses pembuatan kayu lapis meliputi pengulitan, pengupasan, pengeringan, sortasi, perekatan, lay out (pengomposisian), dan pengempaan panas. Pada tahun 2017,

produksi kayu lapis di China mencapai 2,098 juta m³, dan permintaannya meningkat secara bertahap setiap tahun. Untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari manufaktur kayu lapis tradisional dan menentukan hotspot lingkungan, maka dilakukan penilaian LCA. Berdasarkan metode LCA dan perangkat lunak eBalance, diidentifikasi kategori dampak termasuk pengurangan abiotik (ADP), potensi asidifikasi (AP), pengurangan energi primer (PED), eutrofikasi air tawar (EP), potensi pemanasan global (GWP), dan partikulat (RI) untuk menganalisis hotspot lingkungan. Hasil LCA dapat mengungkapkan bidang minat yang terkait dengan dampak lingkungan, keberlanjutan, dan skenario lingkungan. Temuan juga dapat menginformasikan rekomendasi untuk menggantikan teknologi dan bahan pengolahan kayu lapis tradisional di industri pengolahan kayu lapis.

Penelitian menilai pembuatan kayu lapis dari perspektif LCA untuk mengidentifikasi

beban lingkungan dan memberikan parameter untuk produksi yang lebih bersih. Dalam penelitian, ADP, AP, PED, EP, GWP, dan RI dianalisis berdasarkan metode LCA sebagai kategori dampak untuk mengidentifikasi hotspot. Penelitian mencakup siklus hidup manufaktur kayu lapis dari perspektif cradle-to-gate dan mengabaikan data latar belakang untuk bahan baku (internal) dan data penjualan produk (eksternal). Sistem produk disajikan pada Gambar 4 dan mencakup tahapan utama, yaitu produksi bahan mentah dan energi, transportasi, produksi kayu lapis, dan pembuangan limbah. Pengaturan batas memfasilitasi pelacakan bahan dan aliran energi lintas batas. Batas-batas sistem dalam penelitian meliputi apa yang terjadi selama produksi dengan pengukuran di tempat, seperti sumber daya yang dikonsumsi dalam produksi energi, produksi bahan baku, aditif dan transportasi, dan pembangkit listrik. Fitur-fitur tersebut sebagian dikumpulkan dan dianalisis.

Gambar 4. Batas sistem proses manufaktur kayu lapis pada LCA



Sumber: Jia *et al.* (2019)

Semua data dalam penelitian yang berkaitan dengan *input* dan *output* dari pengolahan kayu lapis diperoleh melalui pengukuran di tempat dan investigasi *database Eco-invent* dan *Chinese Life Cycle Database (CLCD)*. Data konsumsi bahan, listrik, bahan tambahan, air, dan solar berasal dari pengukuran di tempat yang digunakan dalam *database*. Data kunci termasuk teknologi yang digunakan untuk produksi kayu lapis dan *input* dan *output* energi per prosedur.

Beberapa kategori dampak yang dianalisis dalam penelitian, yaitu ADP, AP, PED, GWP, dan RI. Hasil dari langkah karakterisasi disajikan pada Tabel 4. Untuk melakukan evaluasi LCA kayu lapis yang akurat, dipisahkan pemrosesan produksi kayu lapis dan persiapan bahan baku untuk menganalisis dampak lingkungan seperti yang disajikan pada Gambar 5 dan 6.

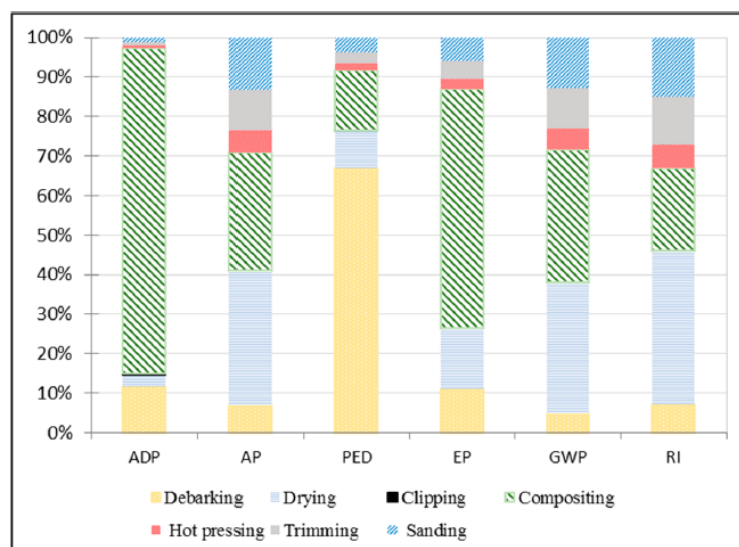
Tabel 4. Hasil penilaian dampak (langkah karakterisasi) pembuatan kayu lapis untuk 1 m³ kayu lapis

Impact Category	Unit	Value
ADP	kg antimony eq. *	2.90×10^{-1}
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.	3.32×10
RI	kg PM2.5 eq.	3.43×10
AP	kg SO ₂ eq.	1.38×10^2
GWP	Kg CO ₂ eq.	1.88×10^4
PED	MJ	9.85×10^6

* Indicator for assessing product and measure unit.

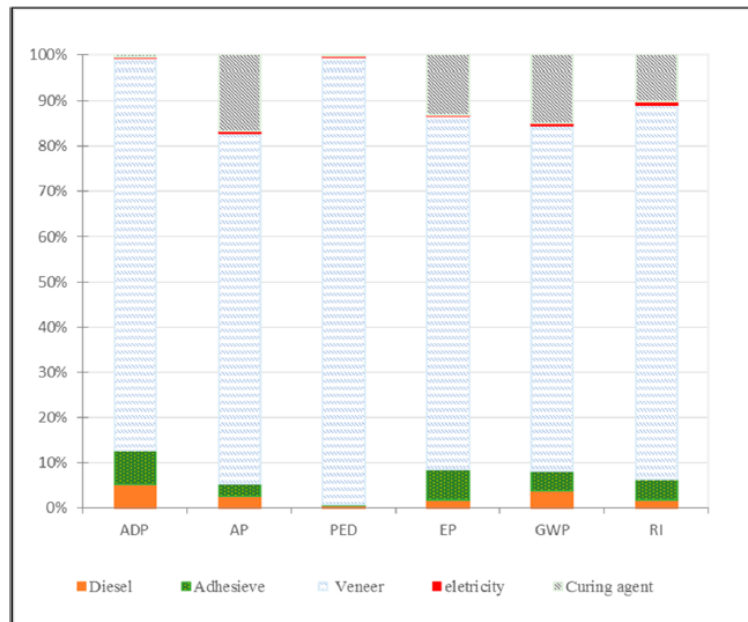
Sumber: Jia *et al.* (2013)

Gambar 5. Kontribusi per subsistem (%) untuk setiap kategori dampak



Sumber: Jia *et al.* (2019)

Gambar 6. Kontribusi relatif dari produksi bahan (%) untuk setiap kategori dampak; veneer meliputi tahap pengulitan dan pengeringan



Sumber: Jia *et al.* (2019)

Berdasarkan hasil, pembuatan vinir di semua bahan baku memiliki dampak terbesar terhadap lingkungan, terutama disebabkan oleh tahap pengeringan dari proses pembuatan vinir. Tahap pengomposisian (*compositing*) merupakan penyumbang terbesar di semua subsistem untuk semua kategori dampak bagi lingkungan, diikuti oleh penebangan kayu karena pembakaran bahan bakar fosil sebagai energi dan limbah kulit kayu. Penelitian yang mencakup proses pembuatan kayu lapis dari perspektif *cradle-to-gate* dan menganalisis setiap subsistem dan bahan baku dalam proses produksi kayu lapis. Untuk meningkatkan kinerja lingkungan, teknologi canggih dan bahan ramah lingkungan dapat digunakan

sebagai pengganti proses tradisional. Dalam penelitian, disarankan agar *bio-oil* pirolisis menggantikan fenol (tidak terbarukan) untuk menghasilkan resin fenolik hijau untuk mengurangi kontribusi dalam kategori dampak termasuk GWP, PED, AP, dan PM selama proses pembuatan kayu lapis, terutama untuk mengurangi dampak ADP dan EP. Selain itu, teknologi baru perekatan kayu hijau dapat mengurangi tahap pengeringan vinir dan mengurangi emisi NOX dan COX yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil dan limbah kayu (mengandung perekat) selama produksi vinir. Teknologi ramah lingkungan tersebut juga dapat menurunkan semua kategori dampak, terutama RI, GWP, AP, dan

EP. Selain itu, lokasi pabrik yang dekat dengan pasokan sumber daya kayu berkualitas dapat mengendalikan dampak lingkungan secara substansial (Jia *et al.*, 2019).

4.2.3. Life Cycle Assessment (LCA) Produksi Pelet Kayu (Wood Pellet) di Perusahaan Korintiga Hutani (KTH), Kalimantan Tengah, Indonesia

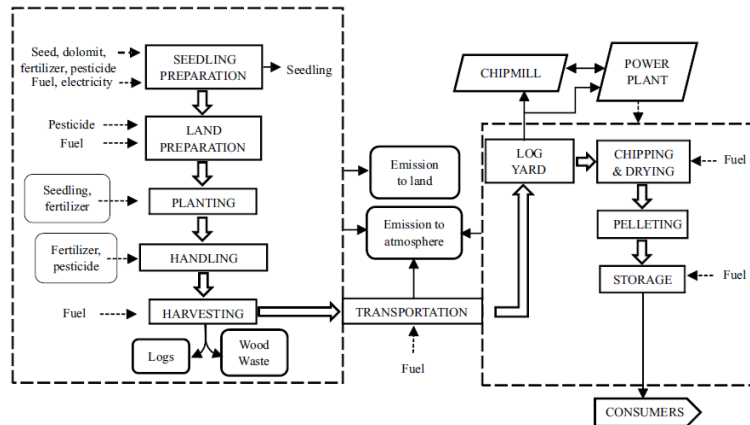
Pelet kayu yang berasal dari biomassa hutan lebih ramah lingkungan untuk menggantikan energi fosil. Dalam hal pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi, beberapa faktor perlu dipertimbangkan, yaitu efisiensi energi dari teknologi konversi, efisiensi siklus hidup, dan dampaknya terhadap lingkungan. Evaluasi diperlukan pada tahap siklus hidup produksi biomassa, mulai dari produksi, pengolahan, dan konversi energi. Salah satu teknik untuk menilai dampak lingkungan adalah life cycle assessment (LCA). LCA mampu mengidentifikasi keunggulan atau manfaat suatu produk untuk kategori dampak yang berbeda mengenai lingkungan lokal atau global.

Emisi gas rumah kaca (GRK) dan pengendalian emisi lainnya perlu fokus pada efisiensi dalam produksi, transmisi, distribusi, dan konsumsi energi. Publikasi terkini tentang produk pelet kayu terutama menekankan pada aspek lingkungan dari energi terbarukan, tetapi

jarang berfokus pada aspek siklus hidup produk. Oleh karena itu, dilakukan penilaian LCA pelet kayu untuk mengidentifikasi posisinya dalam mengurangi emisi sebagai bioenergi, terutama selama proses produksi dalam sistem hutan tanaman industri yang dianggap sebagai emisi. Penelitian bertujuan untuk menganalisis *input* (sumber daya) dan *output* (emisi) aliran produksi pelet kayu yang meliputi kegiatan di hutan tanaman dan pabrik pelet kayu dan menganalisis potensi dampak lingkungan berupa emisi GRK, asidifikasi, dan eutrofikasi akibat aliran produksi pelet kayu.

Gambar 7 menunjukkan ruang lingkup penelitian ini, yaitu *cradle to gate*, artinya seluruh proses dari penyiapan bahan baku di hutan tanaman industri (HTI) hingga produksi pelet kayu dalam 1 (satu) siklus, yaitu dalam waktu 6 tahun. Pengumpulan dan analisis data LCA dilakukan dengan mengidentifikasi dan membuat daftar semua *input* dan *output* yang relevan dari sistem yang dinilai, yang dilakukan secara kuantitatif dengan inventarisasi semua proses di HTI dan pelet kayu. Data *input* terdiri atas bahan dan energi yang dibutuhkan dalam siklus hidup, seperti listrik, solar, bensin, pupuk, dan lain-lain. Sedangkan *output* adalah yang berdampak pada lingkungan, antara lain emisi GRK, asidifikasi, dan eutrofikasi.

Gambar 7. Batas sistem produksi pelet kayu



Sumber: Iswanto *et al.* (2021)

Tabel 5 menunjukkan *input* energi tertinggi sebesar 1.308 kWh listrik, konsumsi listrik terbesar di seluruh proses produksi pelet kayu, yang digunakan di pabrik. Listrik yang digunakan untuk produksi chip sebesar 700 kWh dan proses produksi pelet sebesar 477 kWh. Sedangkan pada tahap HTI, konsumsi listriknya hanya 131 kWh yang berasal dari tenaga untuk mesin pompa air. *Input* energi terbesar kedua dalam sistem produksi adalah 788 L solar, yang digunakan pada tahap HTI dan pabrik pelet kayu, untuk mengoperasikan mesin generator listrik, bor putar, gergaji mesin, bucket excavator, truk kayu, dan dump truck. Tabel 5 juga menunjukkan bahwa *input*

bahan tertinggi adalah pupuk NPK 500 kg, yang dibutuhkan pada tahap produksi bibit dan pemeliharaan tanaman. *Input* bahan tertinggi kedua adalah pupuk P sp-36 sebesar 111,10 kg, diperlukan pada tahap pindah tanam sebagai pupuk dasar tanaman dengan dosis 100 g/tanaman. *Input* lain berupa bahan adalah pestisida 14,86 L yang digunakan untuk melindungi tanaman dari serangan hama penyakit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kebutuhan terbesar ITP untuk memproduksi bahan baku pelet kayu adalah solar untuk alat berat, pupuk untuk nutrisi tanaman, dan pestisida untuk pelindung tanaman dari hama dan penyakit.

Tabel 5. *Input* energi dan bahan di HTI dan pabrik pelet kayu

Input per ha	SP	LP	PI	HI	Hv	Tp	WS	CD	Pt	St	Total
Energy											
Diesel (liter)	132.50	3.50	28	-	162	120	162	110	-	70	788
Gasoline (liter)	2.50	12.60	-	-	10	-	-	-	-	-	25.10
Electricity (kWh)	131	-	-	-	-	-	-	700	477	-	1,308
Materials											
Fertilizer N urea (kg)	0.61	-	-	0.55	-	-	-	-	-	-	1.16
Fertilizer P SP 36 (kg)	-	-	111.10	-	-	-	-	-	-	-	111.10
Fertilizer NPK compound 65 (kg)	1.83	-	-	500	-	-	-	-	-	-	501.78
Liquid fertilizer growmore (kg)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Pesticide (liter)	6.20	4	-	4.66	-	-	-	-	-	-	14.86
Tapioca flour (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	500	-	500

Catatan: SP = persiapan bibit; LP = persiapan lahan; PI = penanaman; HI = penanganan; Hv = pemanenan; Tp = transportasi; WS = tempat penampungan kayu; CD = chipping dan pengeringan; Pt = pembuatan pelet; St = penyimpanan

Sumber: Iswanto *et al.* (2013)

Tabel 6 menyajikan kegiatan produksi kayu dan emisi yang dihitung dari setiap kegiatan selama satu siklus produksi, per ha, untuk 100 ton pelet kayu di HTI. Emisi atau gas rumah kaca terbesar yang dihasilkan adalah emisi berupa N₂O sebesar 551,2927 kg, diikuti NH₃ sebesar 7,5275 kg. Kedua emisi tersebut berasal dari aplikasi pupuk NPK. Meskipun NH₃ bersifat basa, amonium kemudian diubah menjadi nitrat, melepaskan H⁺ dan

menghasilkan NO₃-N di tanah oleh bakteri, menyebabkan pengasaman tanah (asidifikasi). Sedangkan emisi eutrofikasi dalam bentuk PO₄³⁻ sangat rendah, yaitu 0,1792-0,2229 kg dari pupuk cair dan pestisida. Emisi utama N₂O adalah penambahan nitrogen ke dalam tanah, mengakibatkan proses nitrifikasi dan denitrifikasi akibat pencucian dan penguapan unsur tersebut.

Tabel 6. *Output* emisi GRK, asidifikasi, dan eutrofikasi produksi pelet kayu

The process steps	Emissions (kg ha ⁻¹)						
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂	NO _x	NH ₃	PO ₄ ³⁻
Industrial plantation forest:							
Diesel (liter)	0.0918	0.0048	0.0037	-	-	-	-
Gasoline (liter)	0.0057	0.0027	0.0003	-	-	-	-
Electricity (kWh)	63.5350	-	-	1.0611	0.5463	-	-
Fertilizer N urea (kg)	-	-	-	-	0.0027	0.0534	-
Fertilizer P SP 36 (kg)	-	-	64.2036	-	0.2000	3.9996	-
Fertilizer NPK (kg)	-	-	551.2927	-	0.3764	7.5275	-
Liquid fertilizer (kg)	-	-	-	-	0.0070	0.1400	0.1792
Pesticide (liter)	-	-	-	-	-	-	0.2229
Transportation:							
Diesel (liter)	0.0338	0.0018	0.0014	-	-	-	-
Wood pellet mill:							
Diesel (liter)	0.0963	0.0051	0.0039	-	-	-	-
Total	63.76	0.01	614.36	1.06	0.59	11.72	0.40

Sumber: Iswanto *et al.* (2013)

Tabel 7 menunjukkan bahwa produksi pelet kayu di PT KTH mengeluarkan gas rumah kaca sebesar 678,0270 kg CO₂ eq, kemudian asidifikasi sebesar 13,3675 kg SO₂ eq, dan eutrofikasi sebesar 0,4021 kg PO₄³⁻ eq, yang dihasilkan mulai dari 4 tahapan budidaya di areal HTI. Sedangkan pabrik pelet kayu

hanya menghasilkan emisi GRK 0,1053 kg CO₂ eq. Di mana produksi 1 ton pelet kayu menghasilkan emisi GRK, asidifikasi, dan eutrofikasi masing-masing sebesar 38 kg CO₂ eq, 1,4 kg SO₂ eq, 0,002 kg PO₄³⁻ eq, bila menggunakan limbah kayu gergajian industri pengolahan, dan menjadi 83 kg CO₂ eq, 2,7 kg

SO₂ eq, dan 0,005 kg PO₄³⁻ eq, masing-masing bila menggunakan kayu yang diperoleh langsung dari kegiatan pemanenan.

Tabel 7. Potensi dampak GRK, asidifikasi, dan eutrofikasi

Impact category	Unit	Industrial timber plantation	Wood pellet mill	Total (kg)
Greenhouse gases	kg CO ₂ eq	678.0270	0.1053	678.1323
Acidification	kg SO ₂ eq	13.3675	-	13.3675
Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻ eq	0.4021	-	0.4021

Sumber: Iswanto *et al.* (2013)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi pelet kayu memiliki dampak yang cukup besar terhadap lingkungan, yaitu dengan melepaskan beberapa zat ke atmosfer dan tanah. Zat-zat yang dihasilkan dari kegiatan budidaya di HTI sebagai emisi terbesar, berupa GRK dan asidifikasi, yaitu CO₂, CH₄, N₂O, SO₂, dan NO_x. Namun demikian, total emisi yang dikeluarkan dari produksi pelet kayu tersebut masih cukup rendah dibandingkan dengan kapasitas tahunan HTI untuk menyerap gas CO₂ di atmosfer yang rata-rata sangat tinggi, yaitu 41,18–67,69 ton/ha/tahun (Iswanto *et al.*, 2021).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Implementasi LCA bertujuan untuk menguantifikasi *input* (bahan dan energi) dan *output* (limbah gas, air, dan padatan) dari suatu produk/sistem dan mengevaluasi dampak lingkungan dari setiap tahap siklus hidup. Berdasarkan metodologi ISO 14010, langkah pengerjaan LCA terdiri atas empat fase, yaitu

goal and scope definition, *life cycle inventory* (LCI), *life cycle impact assessment* (LCIA), dan *interpretation*. Industri kehutanan, khususnya yang memproduksi produk berbasis kayu merupakan kegiatan yang mengimplementasikan LCA. Hal tersebut berkaitan dengan kegiatan produksi dari penyiapan bahan baku (*input*) hingga produk jadi, dan limbah yang dihasilkan dari proses produksi (*output*) yang menggunakan energi dan berdampak terhadap lingkungan. Kegiatan produksi produk berbasis kayu berupa papan partikel, kayu lapis, dan pelet kayu (energi biomassa) telah mengimplementasikan LCA. Secara umum, penilaian LCA di industri yang memproduksi produk tersebut dilakukan pada sistem produksi bahan baku di hutan/HTI dan produk di pabrik. Berdasarkan hasil LCA, diketahui bahwa produk tersebut berdampak terhadap lingkungan seperti emisi GRK, asidifikasi, dan eutrofikasi akibat aliran produksi.

REFERENCE

- Azman, M. A. H. M., Ahmad Sobri, S., Norizan, M. N., Ahmad, M. N., Wan Ismail, W. O. A. S., Hambali, K. A., ... & Mat Noor, N. A. (2021). Life cycle assessment (Lca) of particleboard: Investigation of the environmental parameters. *Polymers*, *13*(13), 2043. <https://doi.org/10.3390/polym13132043>
- Geetha, R. Gan, K.S., dan Zairul, A.R. 2020. Concept of Life Cycle Assessment (LCA) in Timber Industry. *FRIM Technology Bulletin*, *105*: 1-7.
- Gil, M. P., Moya, A. M. C., & Domínguez, E. R. (2013). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, *41*, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.006>
- Hassegawa M, Van Brusselen J, Cramm M, Verkerk PJ. Wood-Based Products in the Circular Bioeconomy: Status and Opportunities towards Environmental Sustainability. *Land*, *11*(12), 2131. <https://doi.org/10.3390/land11122131>
- Irawati, D. Y., & Kurniawati, M. (2020). Life cycle assessment dan life cycle cost untuk serat kenaf. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, *9*(3), 213-224. <https://doi.org/10.26593/jrsi.v9i3.4109.213-224>
- Iritani, D. R., Silva, D. L., Saavedra, Y. M. B., Graef, P. F. F., & Ometto, A. R. (2015). Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: a case study in a furniture industry. *Journal of Cleaner Production*, *96*, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.029>
- Iswanto, N. D., & Siregar, U. J. (2021). Life Cycle Assessment (LCA) of Wood Pellet Production at Korintiga Hutani Company, Central Kalimantan, Indonesia. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, *27*(3), 200-207. <https://doi.org/10.7226/jtftm.27.3.200>
- Jia, L., Chu, J., Ma, L., Qi, X., & Kumar, A. (2019). Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China. *International journal of environmental research and public health*, *16*(11), 2037. <https://doi.org/10.3390/ijerph16112037>
- Nahdiyin, N. A. (2023). Penelitian Kinerja Pustakawan di Perpustakaan Melalui Database Google Scholar: *Narrative Literature Review*. *BIBLIOTIKA: Jurnal Kajian Perpustakaan dan Informasi*, *7*(2), 227-239. <https://doi.org/10.17977/um008v7i22023p227-239>
- Nuryawan A, Sutiawan J, Rahmawaty, Masruchin N, Bekhta P. Panel Products Made of Oil Palm Trunk: A Review of Potency, Environmental Aspect, and Comparison with Wood-Based Composites. *Polymers*, *14*(9):1758. <https://doi.org/10.3390/polym14091758>
- Nuryawan, A., Syahputra, R. S., Azhar, I., & Risnasari, I. (2021, November). Basic properties of the mangrove tree branches as a raw material of wood pellets and briquettes. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 891, No. 1, p. 012005). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/891/1/012005>
- Pandey, S. (2022). Wood waste utilization and associated product development from under-utilized low-quality wood and its prospects in Nepal. *SN Applied Sciences*, *4*(6), 168. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05061-5>
- Pokhrel, G., Gu, H., Gardner, D. J., & O'Neill, S. (2022). Life cycle assessment (LCA) of wood flour and pellets for manufacturing wood-plastic composites (WPCs). *Recent Progress in Materials*, *4*(1), 1-28.
- Prabowo, E. D., & Suhariyanto, T. T. (2021). Implementation of Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Life (LCC) on Particle Board Wood Furniture Industry in Yogyakarta. *Opsi*, *14*(2), 271-282. <https://doi.org/10.31315/opsi.v14i2.6089>
- Reed, D., Bergman, R., Kim, J. W., Taylor, A., Harper, D., Jones, D., ... & Puettmann, M. E. (2012). Cradle-to-gate life-cycle inventory and impact assessment of wood fuel pellet manufacturing from hardwood flooring residues in the Southeastern United States. *Forest products journal*, *62*(4), 280-288. <https://doi.org/10.13073/fpj-d-12-00015.1>
- Sathre, R., & González-García, S. (2014). Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. In Eco-efficient construction and building materials (pp. 311-337). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.2.311>
- Savov, V., Antov, P., Zhou, Y., & Bekhta, P. (2023). Eco-friendly wood composites: design, characterization and applications. *Polymers*, *15*(4), 892. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-7186-7>

- Silva, D. A. L., Lahr, F. A. R., Garcia, R. P., Freire, F. M. C. S., & Ometto, A. R. (2013). Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1404-1411. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0583-3>
- Simatupang, J., Nuryawan, A., Risnasari, I., Nur, T. B., & Fatriasari, W. (2024, May). Physical, chemical, and thermal properties of branches mangrove wood of *Bruguiera gymnorhiza* during conversion into charcoal and charcoal briquette. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1352, No. 1, p. 012038). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1352/1/012038>
- Skowrońska, M., & Filipek, T. (2014). Life cycle assessment of fertilizers: a review. *International Agrophysics*, 28(1), 101-110. <https://doi.org/10.2478/intag-2013-0032>
- Tambunan, H., Nuryawan, A., Iswanto, A. H., Risnasari, I., Basyuni, M., & Fatriasari, W. (2023). Briquettes made of branches wood of three mangrove species bonded by starch adhesive. *Materials*, 16(15), 5266. <https://doi.org/10.3390/ma16155266>
- Warman, R. D. (2014). Global wood production from natural forests has peaked. *Biodiversity and Conservation*, 23, 1063-1078. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0633-6>.