

**ANALISIS POTENSI DAMPAK LINGKUNGAN DARI BUDIDAYA TEBU
MENGUNAKAN PENDEKATAN LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)**

**POTENTIAL ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACT OF SUGARCANE
PLANTATION USING LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) APPROACH**

Arieyanti Dwi Astuti
Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Pati
Jl. Raya Pati-Kudus Km. 4 Pati. 59163. Jawa Tengah
Email : antiek24@gmail.com

Naskah Masuk: 21 Februari 2019

Naskah Revisi: 14 Maret 2019

Naskah Diterima: 22 April 2019

ABSTRACT

Minimizing the adverse impact of sugarcane plantation can be carried out through many ways including increasing the efficiency of energy and natural resources consumption as well as improving the management of waste and emissions. Life Cycle Assessment (LCA) was applied to assess the environmental impact of sugarcane plantation without considering sugarcane usage as a raw material in the sugar industry (gate to gate). CML (baseline) was used as Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method. This study aimed to: 1) examine the natural resources and energy consumption; 2) analyze and identify potential environmental impacts; and 3) recommend alternative improvements to reduce environmental impacts. It used primary data and secondary data. The results showed that: 1) natural resources were used to produce 16,097 ton of sugarcane or 1 ton of sugar, were land requirement (0.233 ha), water consumption (2,223.117 m³), and energy consumption (19,234.254 MJ); 2) there are five most potential environmental impacts which are analyzed by using openLCA including climate change (134,275.23 kg CO₂ eq), eutrophication (120.24 kg PO₄ eq), acidification (1.54 kg SO₂ eq), photochemical oxidation (0.36 kg ethylene eq), and human toxicity (0.15 kg 1,4-dichlorobenzene eq); 3) alternative recommendation could be conducted by reducing the usage of inorganic fertilizer, and utilizing cane trash (dry leaves, green leaves, and tops) as boiler fuel for production process in sugar factory.

Keywords: *environmental impacts, life cycle assessment, sugarcane plantation*

ABSTRAK

Budidaya tebu menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan sehingga diperlukan upaya untuk meminimalisir dampak negatif tersebut melalui efisiensi konsumsi energi, konsumsi sumber daya alam (SDA), serta pengelolaan limbah dan emisi. LCA merupakan salah satu metode untuk menganalisis dampak lingkungan dari budidaya tebu tanpa mempertimbangkan penggunaan tebu panen sebagai bahan baku industri gula (gate to gate). Metode yang digunakan untuk LCIA adalah CML (baseline). Penelitian ini bertujuan untuk: 1) menghitung penggunaan SDA dan energi, 2) menganalisis dan mengidentifikasi potensi dampak lingkungan, dan 3) menyajikan rekomendasi perbaikan untuk menurunkan dampak lingkungan. Data penelitian berupa data primer dan data sekunder. Unit fungsional pada penelitian ini adalah produksi 1 ton gula untuk satu tahun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa: 1) konsumsi SDA berupa lahan tebu seluas 0,233 ha, air sebanyak 2.223,117 m³ dan energi sebesar 19.234,254 MJ; 2) potensi dampak lingkungan yang dianalisis menggunakan OpenLCA menghasilkan 5 dampak lingkungan tertinggi, yaitu climate change (134.275,23 kg CO₂ eq), eutrophication (120,24 kg PO₄ eq), acidification (1,54 kg SO₂ eq), photochemical oxidation (0,36 kg ethylene eq), and human toxicity (0,15 kg 1,4-dichlorobenzene eq); 3) alternatif perbaikan yang direkomendasikan berupa penggunaan pupuk anorganik dengan dosis yang tepat dan memanfaatkan limbah pasca panen (daun kering, serasah) sebagai bahan bakar boiler untuk proses produksi industri gula.

Kata kunci: *budidaya tebu, dampak lingkungan, life cycle assessment*

PENDAHULUAN

Industri gula merupakan salah satu industri hilir berbasis pertanian perkebunan yang menggunakan tebu sebagai bahan baku produksinya. Industri ini memiliki potensi dan prospek menjanjikan untuk terus dikembangkan, karena menghasilkan produk utama berupa gula. Sebagaimana diketahui, gula merupakan salah satu komoditas strategis bagi perekonomian Indonesia karena selain sebagai salah satu dari sembilan bahan pokok yang dikonsumsi masyarakat Indonesia, gula juga dibutuhkan sebagai bahan baku industri lainnya, seperti industri makanan minuman.

Sama halnya dengan industri lainnya, industri gula juga menghasilkan limbah yang tidak hanya dikeluarkan dari proses produksi saja tetapi juga dari aktivitas rantai pasok (*supply chain*). Aktivitas *supply chain* adalah aktivitas yang meliputi proses dari hulu ke hilir yaitu proses dari mendapatkan bahan mentah sampai pada pendistribusiannya ke konsumen (Kautzar, dkk., 2014). Aktivitas *supply chain* pada industri gula meliputi tahap persiapan dan proses budidaya tebu, pemanenan, pengolahan, pengemasan dan penyimpanan di gudang (Asrol, 2015).

Pada penelitian ini, aktivitas yang dibahas dibatasi pada proses budidaya tebu. Pembatasan proses yang dianalisis berdasarkan pada hasil beberapa penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa proses budidaya tebu merupakan penyumbang emisi terbesar dibandingkan dengan proses lainnya dalam rangkaian proses industri gula. Mashoko, et al. (2010) menyatakan dalam penelitiannya bahwa proses budidaya tebu merupakan kontributor terbesar terhadap pemanasan global dan perubahan iklim, dibandingkan dengan proses lainnya seperti proses pembakaran tebu, proses transportasi pengangkutan tebu ke lokasi pabrik, dan proses produksi gula. Penelitian Seabra (2011) menyatakan hal serupa bahwa budidaya tebu menyumbang 42% dari total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dalam satu proses produksi gula. Oleh karenanya diperlukan suatu upaya perbaikan sistem untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari budidaya tebu, dengan mengelola unsur-unsur utama yang

terlibat didalamnya, diantaranya meliputi konsumsi energi dan sumber daya alam.

Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). Metode ini berfungsi untuk menganalisis potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari suatu aktivitas, dengan mengetahui input yang digunakan, baik energi maupun sumber daya alam. Metode ini juga dapat digunakan untuk memaksimalkan output dengan input yang sama, mengurangi penggunaan bahan baku dan transportasi, menerapkan pengendalian pencemaran, mengurangi emisi di lingkungan, dan memanfaatkan limbah (Chauhan, et al., 2011). Penggunaan metode tersebut mampu mengevaluasi dampak lingkungan yang dihasilkan pada proses budidaya tebu.

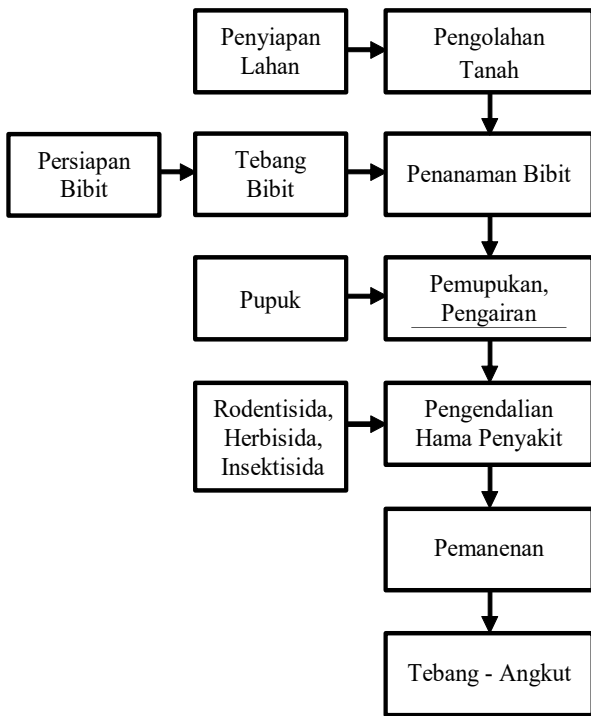
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk 1) menghitung penggunaan Sumber Daya Alam (SDA) dan energi dalam proses budidaya tebu, 2) menganalisis dan mengidentifikasi tahapan yang berkontribusi paling besar terhadap potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan, dan 3) menyajikan rekomendasi perbaikan dalam upaya penurunan dampak lingkungan pada proses budidaya tebu.

TINJAUAN PUSTAKA

Budidaya Tebu

Pada umumnya, proses budidaya tebu dimulai dari pengolahan tanah, penanaman bibit tebu, pemeliharaan, dan pemanenan tebu untuk kemudian diangkut ke pabrik. Berbagai tahapan dalam proses budidaya tebu ini dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya kualitas bibit tebu, pasokan air, kualitas tanah, pemupukan dan jika perlu pestisida. Proses budidaya tebu secara garis besar disajikan pada Gambar 1.

Selain menghasilkan tebu panen sebagai bahan baku industri gula, output lain yang dihasilkan dari budidaya tebu adalah emisi yang memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Umumnya, dampak negatif ini terkait dengan tata cara pemberian pupuk, pemanenan tebu, dan penggunaan solar pada proses pengolahan dan transportasi tebu panen menuju lokasi pabrik.



Gambar 1.
Budidaya Tebu
Sumber: Indrawanto dkk (2010)

Pemberian pupuk dalam proses budidaya tebu berpotensi menimbulkan emisi, baik terhadap udara, badan air (air permukaan), maupun tanah (asidifikasi tanah). Hal ini disebabkan akibat penggunaan pupuk anorganik dengan dosis yang berlebihan, terutama pada sistem intensifikasi pertanian yang dituntut untuk memberikan hasil panen secara maksimal. Semakin besar penggunaan pupuk khususnya pupuk anorganik, semakin besar emisi N₂O yang ditimbulkan (Kurnia & Sutrisno, 2008).

Proses pemanenan tebu juga merupakan salah satu tahapan dalam budidaya tebu yang berkontribusi terhadap degradasi lingkungan, terkait dengan kurang tepatnya penanganan limbah pascapanen (*cane trash*) yang selama ini dilakukan oleh para petani tebu. Beberapa bagian dari tanaman tebu yang memiliki kandungan serat (fiber) tinggi tertinggal di lahan perkebunan menjadi limbah pascapanen. Jika dibiarkan terlalu lama di lahan perkebunan, limbah ini dapat menghambat pertumbuhan tunas tebu (*ratoon cane*) dan juga dapat mengganggu pengolahan tanah saat penanaman tebu (Sugandi, dkk., 2013). Pembakaran limbah pascapanen secara terbuka, akan

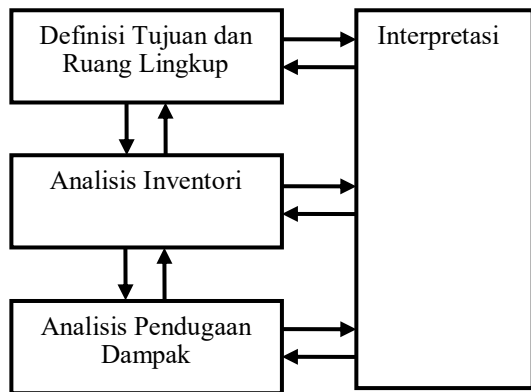
menghasilkan emisi yang berpotensi memberikan dampak lingkungan berupa pemanasan global (Mashoko, et al., 2010). Padahal limbah pascapanen termasuk dalam golongan limbah biomassa yang dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi potensial jika diolah secara optimal (Tajalli, 2015).

Setelah dipanen, tebu akan diangkut ke pabrik gula untuk selanjutnya diproses untuk menghasilkan produk utama berupa gula. Pengangkutan tebu dari lokasi panen sampai ke pabrik gula, umumnya dilakukan dengan menggunakan truk. Proses pengangkutan ini memberikan efek berupa emisi udara sebagai hasil pembakaran bahan bakar fosil. Kondisi ini diperburuk dengan adanya puluhan truk yang antri untuk masuk ke lokasi pabrik dalam kondisi mesin menyala.

Life Cycle Assessment (LCA)

Dampak lingkungan yang ditimbulkan dari suatu proses atau kegiatan industri memberikan pengaruh yang lebih luas, tidak hanya bagi lingkungan sekitar tetapi juga mempengaruhi lingkungan secara global. Hal ini telah memunculkan kepedulian dalam pengembangan teknik atau metode untuk lebih memahami dan mengurangi dampak tersebut. Salah satu teknik yang dikembangkan adalah *Life Cycle Assessment (LCA)*.

LCA merupakan salah satu teknik yang dikembangkan untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan dari suatu industri (produksi dan konsumsi), sehingga pada akhirnya mampu memberikan perlindungan terhadap lingkungan (Finkbeiner, 2013). LCA dapat dilakukan dengan pendekatan siklus hidup dan dapat digunakan untuk penghitungan karbon serta untuk mengevaluasi dampak lingkungan penting lainnya seperti pengasaman, penipisan ozon, eutrofikasi, asap, dan efek kesehatan terhadap manusia (Aziz, dkk., 2016). Berdasarkan ISO 14040 (1997), LCA merupakan suatu prosedur kuantitatif yang digunakan untuk menilai aspek lingkungan dan dampak potensial yang terkait dengan produk. Tahapan yang harus dilakukan dalam penentuan dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA, dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2.
Tahapan LCA
Sumber: ISO 14040 (1997)

Tahapan LCA pada Gambar 2 merupakan tahapan-tahapan yang harus dilakukan dalam penentuan dampak lingkungan menggunakan metode LCA berdasarkan standar ISO. Standar ISO mengenai LCA dikelompokkan dalam standar ISO 14000 series mengenai sistem manajemen lingkungan (*environmental management*).

Standar pertama mengenai LCA adalah ISO 14040 yang diterbitkan tahun 1997 mengenai *Principle and Framework LCA*. ISO kemudian menerbitkan beberapa standar terkait dengan penerapan LCA, yaitu:

1. ISO 14041 (1998) – *Goal and Scope* atau Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup.
 - a. Memuat tujuan analisis LCA, yaitu membandingkan satu proses dengan proses lainnya, sehingga dapat dipilih alternatif produk atau proses yang lebih ramah secara lingkungan dan ekonomi.

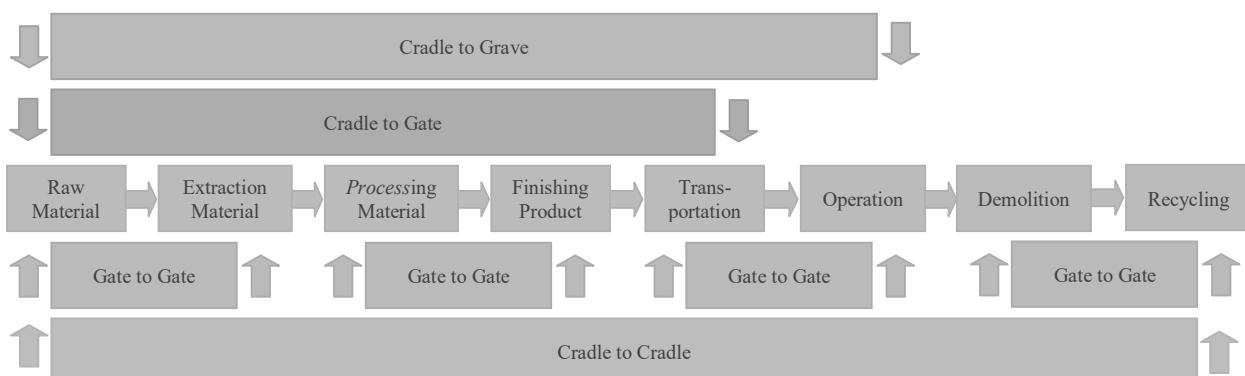
- b. Perlu dilakukan pembatasan ruang lingkup, yang digolongkan menjadi 4 (Gambar 3), yaitu:
 - *Cradle to grave*: dimulai dari bahan mentah sampai pemakaian produk.
 - *Cradle to gate*: dimulai dari bahan mentah sampai ke *gate* sebelum pemakaian produk.
 - *Gate to gate*: hanya meninjau kegiatan/aktivitas terdekat.
 - *Cradle to cradle*: dimulai dari bahan mentah sampai pada daur ulang material.

2. ISO 14042 (1999)–*Life Cycle Inventory* (LCI) atau Analisis Inventori.

Tahap ini merupakan tahap pengumpulan dan penghitungan data untuk mengukur input yang relevan dan output dari sistem secara keseluruhan. Data persediaan mencakup bahan baku dan konsumsi energi, emisi padat, cair dan gas. Tujuan dari LCI adalah untuk menunjukkan pengaruh lingkungan per bagian dari *life cycle*.

3. ISO 14043 (2002)–*Life Cycle Interpretation Assessment* (LCIA) atau Analisis Pendugaan Dampak.

Tahapan ini bertujuan untuk mengevaluasi seberapa signifikan potensi dampak lingkungan yang ditimbulkan terkait dengan beban lingkungan yang diukur pada tahap LCI. Data-data hasil LCI akan dikonversi ke dalam kategori indikator dampak lingkungan (seperti *global warming*, asidifikasi, penipisan lapisan ozon atau *ecotoxicology*), sehingga akan lebih mudah dipahami untuk mendapatkan informasi lingkungan (Gala, 2015).



Gambar 3.
Skema Lingkup LCA
Sumber: Bayer, et al. (2010)

4. ISO 14044 (2006)–Requirements and Guidelines.

Tahap ini merupakan tahap akhir dari tahapan LCA, dimana hasil LCI/LCIA dirangkum, kemudian dibahas sebagai dasar kesimpulan, rekomendasi, dan pengambilan keputusan sesuai dengan definisi tujuan dan ruang lingkup (ISO 14043, 2002). Hasil dari tahap ini akan dikembangkan, kemudian dilakukan *process improvement* atau pemilihan terbaik dari berbagai skenario yang ditawarkan.

Software OpenLCA

Pengolahan data pada tahap LCI menggunakan *software OpenLCA*. Pertimbangan pemilihan *OpenLCA* sebagai alat untuk menganalisis data didasarkan pada pertimbangan bahwa *OpenLCA* merupakan satu-satunya *software LCA* yang tidak berbayar. Selain itu, *OpenLCA* merupakan *software* yang dapat diakses dengan mudah dan legal, dengan cara pengoperasian yang sederhana.

OpenLCA merupakan salah satu *software* untuk membantu menganalisis tahapan penelitian LCA. *OpenLCA* adalah perangkat lunak dengan sumber *database* terbuka yang digunakan untuk mengolah *Life Cycle Assessment (LCA)* dan *Sustainability Assessment*, yang dikembangkan sejak tahun 2006 oleh GreenDelta 2 (GmbH, 2016). *OpenLCA* dapat diaplikasikan ke berbagai area, yaitu:

1. *Environmental Life Cycle Assessment (LCA)*;
2. *Economic Life Cycle Costing (LCC)*;
3. *Social Life Cycle Assessment (Social LCA)*;
4. *Carbon and Water Footprint*;
5. *Design for Environment (DfE)*;
6. *Environmental Product Declaration (EPD)*.



Menurut GmbH (2016), proses dan fitur yang tersedia pada *software OpenLCA* secara garis besar dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Flows*, merupakan input dan output dari seluruh produk, material maupun energi pada proses produksi sebuah produk. Tipe

flow yang terdapat pada *OpenLCA* adalah:

- a. *elementary flows*, material atau energi dari lingkungan yang masuk dan keluar dari/ke proses produksi.
 - b. *product flows*, material atau energi yang bertukar pada saat proses produk.
 - c. *waste flows*, material atau energi yang keluar dari proses produk.
2. *Database*, pada penelitian ini *database* yang dipakai adalah “ELCD *database 3.2*” yang tidak berbayar pada Nexus web.
 3. *Basic modelling*, elemen *database* yang dibutuhkan untuk permodelan pada *OpenLCA*, diberi simbol seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1.
Simbol Fitur pada *OpenLCA 1.6*

Fitur	Simbol	Keterangan
<i>Flow</i>	F	<i>Flow</i> merupakan semua produk, material maupun energi baik input maupun output dalam suatu sistem yang sedang dianalisis.
<i>Process</i>	P	<i>Process</i> adalah kegiatan yang mengubah input menjadi output.
<i>Product system</i>		<i>Product system</i> berisi semua proses dalam suatu produk yang sedang dianalisis. <i>Product system</i> dapat terdiri dari satu atau beberapa proses.
<i>Project</i>		<i>Project</i> merupakan satu bagian besar yang terdiri dari beberapa <i>product system</i> . Pada <i>OpenLCA Project</i> dapat digunakan untuk membandingkan dampak dari berbagai <i>product system</i> yang ada di dalamnya.

Sumber: GmbH (2016).

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti prosedur LCA menurut ISO 14040. Pendekatan yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif untuk mengkaji aspek lingkungan. Data sekunder didapatkan dari Bagian Tanaman Pabrik Gula (PG) Trangkil. Data yang diperoleh selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan *software OpenLCA* 1.6 untuk dilakukan fase *assessment*. Perhitungan dampak dilakukan berdasarkan metode CML (*baseline*). Penelitian dilakukan pada bulan Mei-November 2017 dengan lokasi di perkebunan tebu milik Pabrik Gula (PG) Trangkil, Kabupaten Pati.

Penghitungan emisi dihitung berdasarkan pedoman inventarisasi gas rumah kaca untuk pembakaran stasioner (IPCC, 2016). Emisi N₂O dari proses penggunaan pupuk

$$\text{Emisi direct N}_2\text{O} = ((F_{\text{sn}} + F_{\text{on}}) * EF_1) \dots\dots(1)$$

$$\text{Emisi indirect N}_2\text{O} = ((F_{\text{sn}} \times \text{Frac}_{\text{GASF}}) + F_{\text{on}} \times \text{Frac}_{\text{GASM}}) * EF_4 \dots\dots(2)$$

(NPK, ZA dan blotong) dan emisi CH₄, N₂O, NO_x, CO dan SO₂ dari hasil pembakaran limbah pascapanen dihitung menggunakan rumus dari pedoman penyelenggaraan inventarisasi gas rumah kaca nasional (Kementerian Lingkungan Hidup, 2012). Rumus yang digunakan untuk menghitung emisi *direct* N₂O dan emisi *indirect* N₂O adalah:

Keterangan:

F_{sn} : Jumlah tahunan pupuk sintetis N yang diaplikasikan ke tanah, kg N per tahun.

F_{on} : Jumlah tahunan dari pupuk kandang, kompos, urin, dan kotoran ternak yang diaplikasikan ke tanah, kg N per tahun.

EF_1 : Faktor emisi untuk emisi N₂O dari input N untuk lahan kering, kg N₂O-N per (kg N input). Nilai EF_1 yang digunakan 0,1.

$\text{Frac}_{\text{GASF}}$: Fraksi pupuk N sintetis yang bervolatilasi sebagai NH₃ dan NO_x, kg N tervolatilasi per kg N yang digunakan.

$\text{Frac}_{\text{GASM}}$: Fraksi pupuk organik N (F_{on}) dan urin dan kotoran ternak yang dideposisi ternak (F_{PRP}) yang tervolatilasi sebagai NH₃ dan NO_x, kg N tervolatilasi per kg N yang digunakan.

EF_4 : Faktor emisi N₂O dari deposit N pada tanah dan permukaan air, (kg N-N₂O per (kg NH₃-N + NO_x-N volatilized)). Nilai EF_4 yang digunakan 0,01.

HASIL DAN PEMBAHASAN

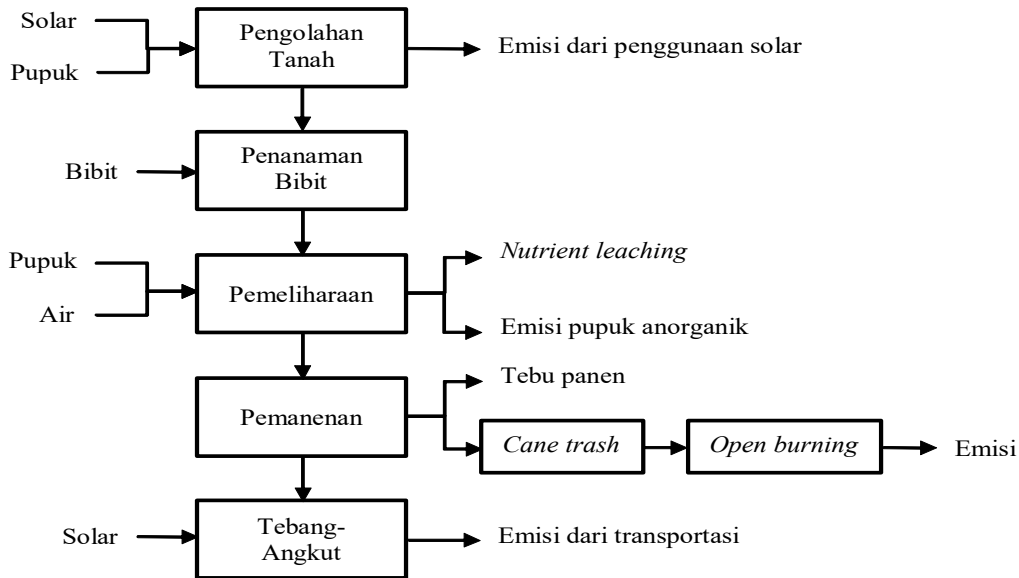
Definisi Tujuan dan Ruang Lingkup

Sebelum menentukan tujuan dan ruang lingkup, perlu ditentukan definisi unit fungsional yang dibahas. Unit fungsional pada penelitian ini adalah produksi satu ton gula untuk satu tahun. Tujuan yang akan dicapai adalah mengidentifikasi, mengevaluasi, dan membandingkan komponen atau tahapan dalam budidaya tebu. Adapun ruang lingkup yang digunakan adalah metode LCA *gate to gate*, dengan meninjau kegiatan pada aktivitas terdekat yaitu aktivitas budidaya tebu.

Analisis Inventori

Budidaya tebu meliputi 5 tahapan yaitu 1) pengolahan tanah, 2) penanaman bibit, 3) pemeliharaan (pemupukan dan pengairan), 4) panen-angkut, dan 5) pembakaran limbah pascapanen. Limbah pascapanen adalah limbah yang ditinggalkan di lahan tebu sesaat setelah proses panen selesai. Limbah pascapanen berupa daun kering, serasah dan pucuk tebu. Setiap tahapan proses budidaya tebu membutuhkan masukan (input) berupa sumber daya alam dan energi, dengan keluaran (output) berupa produk akhir, limbah, emisi, dan produk samping (*by-product*) sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.

Proses budidaya tebu dimulai dari tahap pengolahan tanah. Bahan bakar fosil yang digunakan sebagai input berupa solar, untuk bahan bakar traktor sebanyak 0,052 m³ dan menghasilkan output berupa emisi hasil pembakaran solar. Penggunaan solar pada tahap pengolahan tanah mengacu pada penelitian



Gambar 4.
Input dan Output Budidaya Tebu

Witayapairot & Yossapol (2009), yang menyebutkan bahwa kebutuhan solar untuk mengolah tanah pada budidaya tebu sebesar 3,26 liter per ton tebu. Pupuk yang digunakan di awal pengolahan lahan biasanya berupa blotong (*filter cake*) yang dihamparkan pada lahan sebelum dilakukan tanam baru. Pupuk salah satu input yang dibutuhkan pada tahap penanaman. Jumlah total bibit tebu yang ditanam di lahan baru PG. Trangkil tahun 2016 sekitar 10 ton bibit tebu per ha lahan. Luas lahan PG. Trangkil tahun 2016 untuk menghasilkan 1 ton gula adalah 0,233 ha.

Setelah tahap penanaman bibit, tahap selanjutnya adalah tahap pemeliharaan tebu yang meliputi pemupukan dan pengairan. Pupuk yang digunakan yaitu pupuk anorganik NPK dan ZA. Konsumsi pupuk diasumsikan sebesar 60 ton per ha untuk pupuk ZA dan 40 ton per ha untuk pupuk NPK (Data PG. Trangkil, 2016). PG. Trangkil tidak menggunakan pestisida pada proses budidaya tanaman tebu. Sedangkan untuk proses pengairan, mayoritas lahan tebu PG. Trangkil menggunakan sistem tadah hujan. Pengairan biasanya dilakukan saat proses penanaman dan pemupukan. Sistem tadah hujan menyebabkan volume air yang digunakan tidak tercatat. Oleh karena itu, kebutuhan air pada proses ini menggunakan asumsi berdasarkan hasil penelitian dari Balaji, dkk. (2008) dan Witayapairot & Yossapol (2009) yang memiliki kemiripan kondisi dan sistem pengairan dengan lahan tebu PG.

Trangkil yaitu 138,10 m³ air per ton tebu. Output yang dihasilkan dari tahap ini berupa emisi dari penggunaan pupuk anorganik, baik emisi ke tanah, emisi ke udara maupun emisi ke badan air terdekat. Aktivitas ini juga memberikan potensi terjadinya *nutrient leaching*, yaitu terangkutnya hara yang tersedia dalam larutan tanah melalui pergerakan air tanah keluar dari jangkauan perakaran tanaman sehingga unsur hara tersebut menjadi tidak tersedia bagi tanaman. Beberapa hara yang terdapat dalam pupuk anorganik, keberadaannya dalam tanah sangat *mobile* sehingga mudah hilang dari tanah melalui pencucian maupun penguapan (Nainggolan, dkk., 2009).

Tahap selanjutnya dari budidaya tebu adalah pemanenan tebu yang dilakukan pada musim kering sekitar bulan Mei. Pada musim kering, tanaman tebu berada dalam kondisi optimum dengan tingkat rendemen tinggi. Proses pemanenan (tebang) langsung dilanjutkan dengan proses muat dan angkut yang dilakukan secara manual. Pada proses pemanenan tebu, selain menghasilkan tebu panen (*cane stalk*), proses tersebut juga menghasilkan limbah pascapanen (*cane trash*) berupa daun kering, serasah dan pelepah tebu, yang jumlahnya mencapai 20-25 ton/ha atau sekitar 10-15% dari total biomassa tebu (Toharisman, 1991; Basit & Nurhidayati, 2016). Limbah pascapanen dibiarkan tertinggal di areal tebu untuk kemudian

Tabel 2.
Data Input Output pada Subsistem Budidaya Tebu

Input	Jumlah	Satuan	Output	Jumlah	Satuan
Solar	498,23	liter	Tebu panen	16.097	kg
Tanah	0,233	ha	Emisi CO (udara)	11,051	kg
Bibit tebu	2,331	ton	Emisi CO ₂ (udara)	1.365,995	kg
Air	2.223,117	m ³	Emisi SO ₂ (udara)	1,270	kg
Pupuk ZA	13,986	ton	Emisi CH ₄ (udara)	0,508	kg
Pupuk NPK	9,324	ton	Emisi N ₂ O (udara)	445,280	kg
			Emisi NO ₂ (udara)	0,025	kg
			Emisi PO ₄ ³⁻ (udara)	0,00324	kg
			Emisi NO _x (udara)	0,300	kg
			Emisi CO ₂ biogenik	181,981	kg

dibakar secara terbuka (*open burning*). Hal tersebut bertujuan mempercepat proses pembersihan areal untuk proses tanam selanjutnya. Pembakaran limbah pascapanen secara terbuka akan menghasilkan emisi tebu terbakar

Limbah pascapanen yang dibakar sebesar 2,414 ton atau sebesar 15% dari total tebu panen sebagaimana studi yang dilakukan oleh Basit & Nurhidayati (2016). Luas panen tebu sebesar 0,233 ha dengan fraksi biomassa yang dibakar 0,1 menurut pedoman penyelenggaraan inventarisasi GRK nasional (Kementerian Lingkungan Hidup, 2012).

Setelah tebu dipanen, selanjutnya tebu akan diangkut dari areal tebu menuju ke lokasi pabrik menggunakan sarana transportasi berupa truk. Pada proses pengangkutan dibutuhkan bahan bakar (solar) sebanyak 0,446 m³ untuk menghasilkan output berupa emisi transportasi. Kebutuhan solar untuk pengangkutan tebu mengacu pada penelitian Witayapairot & Yossapol (2009) yang menggunakan 27,69 liter solar per ton tebu. Tebu yang telah diangkut kemudian masuk ke tahap selanjutnya yaitu tahap produksi gula. Tebu tersebut akan mengalami pengolahan di PG sesegera mungkin untuk mencegah berkurangnya rendemen pada tebu.

Emisi yang dihasilkan dari budidaya tebu berupa CO, CO₂, SO₂, CH₄, N₂O, NO₂, PO₄³⁻, dan NO_x. Emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran limbah pascapanen (*cane trash*) termasuk emisi non-CO₂ dari biomassa yang dibakar. Emisi CO₂ dari biomassa yang dibakar tidak dihitung karena karbon yang

dilepaskan selama proses pembakaran diasumsikan akan diserap kembali oleh tanaman pada musim berikutnya atau biasa disebut CO₂ biogenik. Setelah dilakukan perhitungan data, maka diperoleh data hasil analisis inventori (input dan output) pada subsistem budidaya tebu yang disajikan pada Tabel 2.

Setelah data inventori diperoleh maka selanjutnya data dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui adanya dampak lingkungan yang dihasilkan pada setiap tahapan proses. Dampak lingkungan dalam kaitannya dengan budidaya tebu dari berbagai literatur meliputi *energy depletion, nitrification, acidification, global warming, photo oxidant, aquatic toxicity, human toxicity, eutrophication*, Gas Rumah Kaca (GRK), dan penggunaan lahan (Ramjeawon, 2004; Renouf & Wegener, 2007; Purwaningsih, 2016).

Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Proses budidaya tebu terdiri dari lima tahapan, yaitu pengolahan tanah, penanaman bibit, pemeliharaan tebu, panen-angkut, dan pembakaran limbah pascapanen secara terbuka (*open burning*). Diantara kelima tahapan tersebut, tahapan-tahapan yang menghasilkan emisi yaitu pengolahan tanah akibat penggunaan solar, pemeliharaan tebu dengan outputnya emisi dari penggunaan pupuk anorganik, dan panen-angkut dari proses penggunaan solar untuk mengangkut tebu menuju lokasi pabrik, serta pada pembakaran terbuka dari proses pembakaran limbah pascapanen (*cane trash*). Hasil analisis LCIA disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3.
Hasil Analisis LCIA

Dampak Lingkungan	Satuan	Nilai
<i>Climate change</i>	kg CO ₂ eq.	134.275,23
<i>Eutrophication</i>	kg PO ₄ eq.	120,24
<i>Acidification</i>	kg SO ₂ eq.	1,54
<i>Photochemical oxidation</i>	kg ethylene eq.	0,36
<i>Human toxicity</i>	kg dichlorobenzene eq.	0,15

Tabel 3 menunjukkan bahwa lima kategori dampak lingkungan terbesar menurut hasil analisis menggunakan *OpenLCA* adalah *climate change*, *eutrophication*, *acidification*, *photochemical oxidation*, dan *human toxicity*. Selanjutnya, masing-masing kategori dampak dipersentase berdasarkan kontribusi dari tiap-tiap tahapan dalam budidaya tebu (Tabel 4).

Perubahan Iklim (*Climate Change*)

Perubahan iklim merupakan dampak lingkungan yang sumber terbesarnya berupa emisi N₂O dari penggunaan pupuk N dan pembakaran limbah pascapanen secara terbuka. Emisi yang dihasilkan merupakan Gas Rumah Kaca (GRK) yaitu berupa N₂O, CH₄, dan CO₂. (Silalertruksa, et al., 2016). Pada penelitian ini, tahapan pada budidaya tebu yang berkontribusi paling tinggi terhadap dampak lingkungan perubahan iklim adalah pemeliharaan tebu sebesar 98,82%. Pemeliharaan tebu pada penelitian ini meliputi proses pemupukan dan pengairan. Tingginya kontribusi pada tahapan ini dimungkinkan terjadi karena emisi N₂O dari proses pemupukan pupuk N. Gas tersebut terlepas ke udara sebagai hasil dari proses denitrifikasi yang memberikan dampak negatif bagi lingkungan karena setiap kg N₂O berpengaruh 300 kali lebih besar terhadap perubahan iklim dibandingkan dengan emisi dari 1 kg CO₂ (Syafuddin, 2015).

Eutrofikasi (*Eutrophication*)

Sumber polutan utama pada eutrofikasi berasal dari aktivitas penggunaan pupuk kimia serta pengolahan limbah cair jika limbah dibuang ke lingkungan. Emisi yang ditimbulkan berupa *phosphat* yang terkandung dalam suatu perairan. Pada penelitian ini, tahapan pada budidaya tebu yang berkontribusi paling besar terhadap dampak eutrofikasi adalah tahapan pemeliharaan tebu. Sebagaimana diketahui bahwa proses pemberian pupuk kimia pada lahan tebu memberikan dampak negatif bagi lingkungan karena menimbulkan emisi terhadap tanah maupun terhadap perairan yang berada di sekitar lahan tebu.

Kondisi ini diperkuat dengan teori yang disampaikan Syafruddin (2015) bahwa pupuk N-anorganik yang diaplikasikan ke dalam tanah akan terurai menjadi NH₄⁺ atau NO₃⁻. Selain diserap tanaman, hara N dalam bentuk NH₄⁺ dan NO₃⁻. NH₄⁺ berubah menjadi NH₃ dan akan menguap, sedangkan NO₃⁻ sebagian mengalami pencucian dan denitrifikasi menjadi gas N₂O dan NO. Setelah teroksidasi, NH₃ akan meningkatkan kemasaman tanah. NO₃⁻ yang tercuci akan mencemari air tanah sehingga menurunkan kualitas air dan mengurangi keanekaragaman hayati pada perairan karena eutrofikasi. Hal yang sama dinyatakan oleh Mungcharoen (2016) dalam penelitiannya yang menyatakan bahwa

Tabel 4.
Persentase Kontribusi pada Budidaya Tebu

Tahap	<i>Climate Change</i>	<i>Eutrophication</i>	<i>Acidification</i>	<i>Human Toxicity</i>	<i>Photochemical Oxidation</i>
Pengolahan tanah	0,11%	0,001%	8,40%	2,76%	1,57%
Penanaman bibit	0	0	0	0	0
Pemeliharaan tebu	98,82%	99,95%	0	0	0
Panen dan angkut	0,92%	0,01%	72,05%	23,70%	13,49%
Pembakaran terbuka	0,16	0,03%	19,55%	73,54%	84,93%

penggunaan pupuk anorganik (pupuk N dan P) menghasilkan emisi dengan polutan utama NO_x , NH_3 , dan PO_4^{3-} yang berkontribusi terhadap dampak lingkungan eutrofikasi.

Eutrofikasi juga bisa ditentukan dari nilai *Total Dissolved Solid* (TDS) suatu perairan. TDS mencerminkan jumlah kepekatan padatan dalam suatu perairan. Pada umumnya, akan terjadi eutrofikasi suatu perairan jika nilai TDS pada perairan tersebut > 100 bpj (bagian per juta). Penyebab utama TDS adalah bahan anorganik berupa ion-ion yang umum dijumpai pada suatu perairan, salah satunya berasal dari penggunaan pestisida dan pupuk anorganik dari sektor pertanian (Astuti, 2014).

Asidifikasi (*Acidification*)

Parameter utama yang berkontribusi terhadap asidifikasi adalah SO_2 dan NO_x (Silalertruksa, et al., 2016). Pada penelitian ini, tahapan yang memberikan sumbangan tahap panen-angkut. Emisi SO_2 yang dihasilkan pada panen-angkut merupakan hasil dari penggunaan solar sebagai bahan bakar pada truk pengangkut tebu. Hal ini sesuai dengan penelitian Chandra, et al. (2018) yang menyebutkan bahwa penggunaan bahan bakar fosil menjadi penyebab utama asidifikasi dalam budidaya tebu.

Sebagaimana tersaji pada Tabel 4, persentase asidifikasi tertinggi dihasilkan dari tahap panen-angkut (72,05%), yang kemudian diikuti tahap pembakaran limbah pascapanen secara terbuka (19,55%), dan pengolahan tanah (8,40%). Hal ini dikarenakan, penggunaan bahan bakar fosil (solar) pada tahap panen-angkut lebih tinggi yaitu sebesar $0,446 \text{ m}^3$ dibandingkan dengan penggunaan solar pada tahap pengolahan tanah sebesar $0,052 \text{ m}^3$. Semakin besar jumlah bahan bakar fosil yang dikonsumsi, semakin besar pula jumlah emisi SO_2 yang dikeluarkan. Oleh karenanya, persentase asidifikasi yang dihasilkan dari tahap pengolahan tanah lebih kecil daripada tahap panen-angkut.

Selain emisi SO_2 , parameter lain yang memberikan kontribusi terhadap asidifikasi adalah emisi NO_x . Emisi ini dihasilkan dari tahap pembakaran limbah pascapanen secara terbuka. Limbah pascapanen merupakan limbah yang terbentuk setelah dilakukannya

panen tebu yaitu berupa serasah, daun kering dan pucuk tebu (Hassuani, 2005). Pada penelitian ini, pembakaran limbah pascapanen menyumbang 19,55% dari total dampak asidifikasi yang ditimbulkan. Kondisi tersebut serupa dengan penelitian Nguyen & Gheewala (2008) yang menyatakan bahwa pembakaran limbah pascapanen secara terbuka (*cane trash open burning*) pada budidaya tebu menjadi kontributor dampak asidifikasi, pengayaan nutrisi, dan *photochemical oxidation*.

Human Toxicity

Toksisitas manusia berkaitan dengan efek zat beracun terhadap manusia berupa gangguan pernafasan yang disebabkan oleh zat anorganik yang terlepas ke udara dan dinyatakan sebagai 1,4 dcb (*dichlorobenzene*) (Chandra, et al., 2018). *Human toxicity* pada penelitian ini berasal dari tahap pembakaran limbah pascapanen sebesar 73,54%. Hasil penelitian ini serupa dengan penelitian Ramjeawon (2004) yang menyebutkan bahwa pembakaran limbah pascapanen menyumbang $\pm 500 \text{ kg/ha}$ *particulate matter* yang memberikan dampak bagi kesehatan manusia, terutama pernafasan.

Tahapan selanjutnya yang memberikan kontribusi pada dampak *Human toxicity* adalah tahap panen-angkut (23,70%) dan tahap pengolahan tanah (2,76%). Proses yang terjadi pada kedua tahap tersebut berkaitan dengan konsumsi energi berupa bahan bakar fosil (solar). Hal ini sesuai dengan pernyataan Bloemhof-Ruwaard (1996) yang menyatakan bahwa semakin tinggi penggunaan energi, maka semakin tinggi pula dampak *Human toxicity* dan *acidification* yang ditimbulkan.

Photochemical Oxidation

Sumber utama yang berkontribusi pada dampak *photochemical oxidation* adalah pembakaran limbah pascapanen secara terbuka (*cane trash open burning*), dengan emisi yang dihasilkan berupa NO_x dan CO (Silalertruksa, et al., 2016). Pada penelitian ini, dampak *photochemical oxidation*, disumbang dari tahap pembakaran limbah pascapanen secara terbuka sebesar 84,93% yang merupakan kontributor dengan persentase tertinggi dari total dampak *photochemical oxidation* yang dihasilkan pada budidaya tebu. Kondisi ini

sesuai dengan penelitian Nguyen & Gheewala (2008) yang menyebutkan bahwa pembakaran limbah pascapanen secara terbuka menghasilkan beberapa polutan udara seperti CO dan VOC (*Volatile Organics Carbons*) yang berkontribusi terhadap dampak *photochemical oxidation*.

Selain tahap pembakaran pascapanen, tahapan pada budidaya tebu yang memberikan kontribusi terhadap *photochemical oxidation* adalah tahap panen-angkut (13,49%) dan tahap pengolahan tanah (1,57%). Kedua tahap ini merupakan tahapan dalam budidaya tebu yang input terbesarnya adalah bahan bakar fosil (solar). Konsumsi bahan bakar fosil merupakan salah satu sumber yang berkontribusi terhadap dampak *photochemical oxidation*, sebagaimana hasil penelitian Aparecido, et. al. (2014) yang menyatakan bahwa selain pembakaran limbah pascapanen, dampak *photochemical oxidation* disumbang juga dari konsumsi bahan bakar fosil.

Interpretasi

Interpretasi merupakan langkah terakhir dalam tahapan LCA. Rencana tindakan yang akan dibuat didasarkan pada hasil interpretasi. Metode analisis yang dilakukan untuk menentukan isu-isu lingkungan adalah dengan metode pendekatan analisis kontribusi yang dilanjutkan dengan analisis perbaikan.

Analisis Kontribusi

Tujuan dari analisis kontribusi adalah untuk mengetahui tahapan dalam budidaya tebu yang memiliki kontribusi paling dominan sehingga pengambilan keputusan dalam menentukan langkah perbaikan menjadi tepat dan efektif. Tabel 4 menjadi dasar pertimbangan untuk menentukan alternatif perbaikan lingkungan. Berdasarkan Tabel 4 terlihat bahwa terdapat 2 proses dalam budidaya tebu yang memberikan kontribusi tertinggi, yaitu proses pemeliharaan tebu, dan proses pembakaran terbuka limbah pascapanen.

Analisis Perbaikan

Analisis perbaikan dilakukan berdasarkan hasil analisis kontribusi. Permasalahan utama yang direkomendasikan untuk dilakukan prioritas perbaikan lingkungan adalah 2 (dua) kontributor tertinggi hasil dari analisis kontributor.

Prioritas pertama adalah proses pemeliharaan tebu. Emisi yang dihasilkan dalam proses ini berasal dari proses penggunaan pupuk anorganik. Analisis perbaikan yang dilakukan adalah dengan mengganti pupuk anorganik dengan pupuk organik, pada dosis yang tepat dan teknik yang sesuai.

Prioritas kedua adalah proses pembakaran terbuka limbah pascapanen, proses ini menjadi kontributor terbesar terhadap dampak *human toxicity* dan *photochemical oxidation*. Analisis perbaikan yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan limbah pascapanen (daun kering, serasah tebu, pucuk tebu) menjadi bahan bakar *boiler*. Hal tersebut didasarkan pada teori yang menyatakan bahwa limbah pascapanen (*cane trash*) merupakan salah satu jenis limbah biomassa yang memiliki potensi tinggi sebagai penghasil energi (bahan bakar). Potensi biomassa pada limbah pascapanen dapat dilihat dari besarnya nilai kalor yang dihasilkan, yaitu 3000 kkal/kg dengan *moisture* sekitar 30% (Tajalli, 2015). Menurut Nguyen & Gheewala (2008), *cane trash* memiliki nilai *Higher Heating Value* (HHV) sebesar 15,5 MJ/kg. Teori ini diperkuat dengan Hassuani (2005) yang mengelompokkan *cane trash* ke dalam 3 kelompok yaitu *dry leaves*, *green leaves* dan *tops*. *Dry leaves* dan *green leaves* mempunyai nilai kalor (*Higher Heating Value*/HHV) sebesar 17,4 MJ/kg, sedangkan *tops* memiliki HHV sebesar 18,1 MJ/kg.

Pemanfaatan limbah pascapanen (*cane trash*) sebagai bahan bakar *boiler* mampu menghemat pemakaian *bagasse* dalam hal sebagai penyedia energi untuk proses produksi pabrik gula, sebesar 42,97%. Oleh karenanya, pemanfaatan limbah pascapanen ini akan mereduksi emisi hasil pembakaran terbuka, yang pada akhirnya akan mampu mengurangi kontribusi negatifnya terhadap lingkungan.

KESIMPULAN

Sumber daya alam yang digunakan pada satu siklus hidup di PT. PG. Trangkil Pati dengan unit fungsional 1 ton gula per tahun dengan ruang lingkup proses budidaya tebu adalah tanah (0,233 ha) dan air (2.223,117 m³) yang menghasilkan tebu sebesar 16,097 ton. Energi yang dikonsumsi berasal dari solar dengan total energi sebesar 19.234,254 MJ.

Hasil analisis dampak (*Life Cycle Impact Assessment*) menggunakan *software OpenLCA 1.6* menunjukkan bahwa: a) lima kategori dampak lingkungan terbesar adalah *climate change*, *eutrophication*, *acidification*, *human toxicity*, dan *photochemical oxidation*; b) tahapan dalam budidaya tebu yang memberikan kontribusi tertinggi adalah pemeliharaan tebu untuk dampak lingkungan *climate change* (98,82%), *eutrophication* (99,95%), panen-angkut untuk dampak lingkungan *acidification* (72,05%), pembakaran terbuka limbah pascapanen untuk dampak lingkungan *human toxicity* (73,54%), dan *photochemical oxidation* (84,93%); c) terdapat 2 proses dalam budidaya tebu yang memberikan kontribusi tertinggi, yaitu proses pemeliharaan tebu, dan proses pembakaran terbuka limbah pascapanen.

Alternatif perbaikan yang direkomendasikan, diantaranya: a) pada proses pemeliharaan tebu yaitu dengan mengganti atau mengurangi pemakaian pupuk anorganik dengan menggunakan pupuk kompos (pupuk organik), dengan dosis pemberian yang tepat dan teknik yang sesuai; b) pada proses pembakaran terbuka limbah pascapanen yaitu dengan memanfaatkan limbah pascapanen menjadi bahan bakar *boiler* untuk proses produksi pabrik gula.

DAFTAR PUSTAKA

- Aparecido, D., Silva, L., Delai, I., Laura, M., Montes, D., Roberto, A. (2014). Life Cycle Assessment of The Sugarcane Bagasse Electricity Generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 532–547.
- Asrol, M. (2015). *Pengukuran dan Peningkatan Kinerja Rantai Pasok Agroindustri Gula Tebu (Studi Kasus di PT. A)*. Skripsi. Bogor: Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor
- Astuti, A. D. (2014). Kualitas Air Irigasi Ditinjau Dari Parameter DHL, TDS, pH pada Lahan Sawah Desa Bulumanis Kidul Kecamatan Margoyoso. *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan dan IPTEK*, X (1), 35–42.
- Aziz, R., Chevakiadagarn, P., Danteravanich, S. (2016). Environmental Impact Evaluation of Community Composting by Using Life Cycle Assessment: A Case Study Based on Types of Compost Product Operations. *Walailak Journal*, 13 (3), 221–233.
- Balaji, A., Karthikeyan, B., Sundar Raj, C. (2008). Life Cycle Assessment of Electricity Generation from Bagasse in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, 16 (1), 1727–1734.
- Basit, A., Nurhidayati. (2016). Manajemen Residu Untuk Meningkatkan Serapan Hara N dan S, Hasil Tebu dan Gula dalam Budidaya Tebu (*Scaaharum officinarum* L.) Lahan Kering. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat LPPM*. Malang: Universitas Islam Malang, 121–126.
- Bayer C., Gamble, M., Gentry, R., & Joshi, S. (2010). *AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice*. Georgia Institute of Technology. Retrieved from <http://www.aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab082942.pdf>. Diakses tanggal 11 Januari 2019.
- Bloemhof-Ruwaard, J. (1996). *Integration of Operational Research and Environmental Management*. Wageninge: Landbouwwuniversiteit.
- Chandra, V. V., Hemstock, S. L., Mwabonje, O. N., N'Yeurt, A. D. R., Woods, J. (2018). Life Cycle Assessment of Sugarcane Growing Process in Fiji. *Sugar Tech*, 20 (6), 692–699.
- Chauhan, M. K., Varun, Chaudhary, S., Kumar, S., Samar. (2011). Life Cycle Assessment of Sugar Industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (7), 3445–3453.
- Finkbeiner, M. (2013). From the 40s to the 70s - The future of LCA in the ISO 14000 Family. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (1), 1–4.

- Gala, A. B. (2015). *Methodological Advancements in LCA of Waste Management Systems*. Dissertation. Barcelona: Institute of Environmental Science and Technology Universitat Autònoma de Barcelona.
- Gmbh, G. (2016). *Basic Modelling Software OpenLCA Version 1.5*. Berlin: GreenDelta.
- Hassuani, S. J. (2005). *Biomass Power Generation - Sugar Cane Bagasse and Trash*. Brazil: Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.
- Indrawanto, C., Purwono, Siswanto, Syakir, M., Rumini, W. (2010). *Budidaya dan Pascapanen Tebu. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan*. Jakarta: ESKA Media.
- IPCC. (2016). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Vol.2: Energy: Chapter 2: Stationary Combustion*. USA (US): Washington DC.
- ISO 14040 (1997) International Standard ISO 14040 - Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- ISO 14041 (1998) International Standard ISO 14041 - Environmental Management - Life Cycle Assessment - Goal and Scope Definition and Inventory Analysis.
- ISO 14042 (1999) International Standard ISO 14042 - Environmental management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Impact Assessment.
- ISO 14043 (2002) International Standard ISO 14043 - Environmental Management - Life Cycle Assessment - Life Cycle Interpretation.
- ISO 14044 (2006) International Standard ISO 14044 - Environmental Management - Life Cycle Assessment- Requirements and Guidelines.
- Kautzar, G. Z., Sumantri, Y., Yuniarti, R. (2014). Analisis Dampak Lingkungan Pada Aktivitas Supply Chain Produk Kulit Menggunakan Metode LCA dan ANP. *Rekayasa: Jurnal Manajemen dan Sistem Industri*, 3 (1), 200-211.
- Kurnia, U., Sutrisno, N. (2008). Strategi Pengelolaan Lingkungan Pertanian. *Jurnal Sumber Daya Lahan*, 2 (1), 59–74.
- Mashoko, L., Mbohwa, C., Thomas, V. M. (2010). LCA of the South African Sugar Industry. *Journal of Environmental Planning and Management*, 53 (6), 793–807.
- Mungcharoen, T. (2016). Sustainability Assessment of Bio-Product/Biofuel in Thailand. *Proceeding In Thai-German Bioeconomy Conference*. Thailand: National Science and Technology Development Agency (NSTDA) 28 Januari 2016.
- Nainggolan, G. D., Suwardi, Darmawan. (2009). Pola Pelepasan Nitrogen Dari Pupuk Tersedia Lambat (Slow Release Fertilizer) Urea - Zeolit - Asam Humat. *Journal Zeolit Indonesia*, 8 (2), 89–96.
- Nguyen, T. L. T., Gheewala, S. H. (2008). Life Cycle Assessment of Fuel Ethanol from Cane Molasses in Thailand. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13 (4), 301–311.
- Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional (Buku II) Vol 3 (2012): Metodologi Penghitungan Tingkat Emisi dan Penyerapan Gas Rumah Kaca Pertanian, Kehutanan, dan Penggunaan Lahan Lainnya. Kementerian Lingkungan Hidup. Jakarta.
- Purwaningsih, I. W. (2016). *Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment) Gula Tebu di PG. Subang, Jawa Barat*. Tesis. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Ramjeawon, T. (2004). Life Cycle Assessment of Cane-Sugar on The Island of Mauritius. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9 (4), 254–260.
- Renouf, M. A., Wegener, M. (2007). Environmental Life Cycle Assessment (LCA) of Sugarcane Production and Processing in Australia. *29th Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 29, 385–400. Montreal: The University of Queensland.

- Seabra, J. E. A., Macedo, I. C., Chum, H. L., Faroni, C. E., Sartono, C. A. (2011). Life Cycle Assessment of Brazilian Sugarcane Products: GHG Emissions and Energy Use. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 5, 519–532.
- Silalertruksa, T., Pongpat, P., Gheewala, S. H. (2016). Life Cycle Assessment for Enhancing Environmental Sustainability of Sugarcane Biore Fi Nery in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 30, 1-8.
- Sugandi, W., Setiawan, R. P, Hermawan, W. (2013). Uji Kinerja Unit Pemotong Serasah Tebu Tipe Reel. *Jurnal Bionatura Ilmu-Ilmu Hayati dan Fisik*, 15 (3), 149–155.
- Syafruddin. (2015). Manajemen Pemupukan Nitrogen pada Tanaman Jagung. *Jurnal Litbang Pertanian*, 34 (3), 105–116.
- Tajalli, A. (2015). *Panduan Penilaian Potensi Biomassa Sebagai Sumber Energi Alternatif di Indonesia*. Sleman: Penabulu
- Witayapairot, W., Yossapol, C. (2009). Life Cycle Assessment of Sugar Production in Northeastern Thailand. *International Conference on Green and Sustainable Innovation.*, Thailand: Chiang Rai 2-4 December 2009.

BIODATA PENULIS

Arieyanti Dwi Astuti, lahir 24 Agustus 1984 di Pati Jawa Tengah. Pendidikan Magister Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro tahun 2018. Saat ini bekerja sebagai peneliti di Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Pati.