

Artikel Penelitian

## Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dalam Penilaian Dampak Lingkungan Industri Kelapa Sawit untuk Kelapa Sawit Berkelanjutan

Maisarah<sup>1</sup>, Rahmad Dian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fakultas Sains dan Teknologi, Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Medan, Indonesia

<sup>2</sup> Fakultas Sains dan Teknologi, Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Medan, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 18 Januari 2024  
Revisi Akhir: 19 Januari 2024  
Diterbitkan Online: 20 Januari 2024

### KATA KUNCI

Dampak Lingkungan; Industri; Kelapa Sawit; *Life Cycle Assessment* (LCA); Perkebunan.

### KORESPONDENSI

Phone: +62 812 1811 1397  
E-mail: [maisarah@itsi.ac.id](mailto:maisarah@itsi.ac.id)

### A B S T R A K

Konsumsi energi dan penghasilan emisi gas rumah kaca telah menghasilkan peningkatan polutan ke lingkungan dari limbah kegiatan industri, salah satunya industri kelapa sawit yang sangat masif di Indonesia. *Life Cycle Assessment* (LCA) atau Penilaian Siklus Hidup merupakan metode yang dapat digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan dari proses produksi pada industri kelapa sawit. Industri kelapa sawit dapat memberikan dampak terhadap lingkungan, seperti pencemaran udara akibat mesin, pencemaran air dan tanah akibat penggunaan pupuk dan pestisida, serta konsumsi air yang berlebihan. Tetapi hal ini dapat diatasi dengan menilai dan mendeteksi pada tahapan mana di industri kelapa sawit yang menjadi kontributor utama. Artikel ini memaparkan penerapan LCA pada sektor perkebunan kelapa sawit sebagai pendukung pengambilan keputusan. Pendekatan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis Item* (PRISMA) digunakan untuk mengidentifikasi, menyaring, dan memasukkan artikel yang relevan. Mengidentifikasi artikel terkait penilaian siklus hidup di sektor perkebunan kelapa sawit yang memenuhi syarat untuk analisis menjadi salah satu metode penulisan. Temuan menunjukkan bahwa tren penelitian tentang LCA di sektor perkebunan kelapa sawit terbagi atas subsistem perkebunan kelapa sawit dan industri pabrik kelapa sawit. Dampak lingkungan yang ditemukan dalam artikel tersebut adalah parameter global warming potential (GWP dan asidifikasi. Didapatkan hasil bahwa penilaian LCA dapat menjadi salah satu pendukung pengambilan keputusan dengan berorientasi pada dampak lingkungan negatif terkecil yang dihasilkan dari suatu proses. Didapatkan bahwa pada industri kelapa sawit tahapan yang menghasilkan GWP terbesar ialah proses pemupukan dan pengelolaan limbah POME, sehingga pengambilan keputusan kedepannya dapat mempertimbangkan proses tersebut.

### PENDAHULUAN

Indonesia adalah produsen minyak sawit terbesar di dunia, yang telah menyumbang setengah dari produksi minyak sawit mentah dunia (Paminto et al., 2022). Hal ini didukung dengan fakta bahwa terdapat perubahan dari 0,3 juta hektar pada tahun 1980 menjadi 14,8 juta hektara pada tahun 2020 untuk luas lahan kelapa sawit di Indonesia (Zhao et al., 2023). Di Indonesia, potensi minyak sawit sebagai sumber pangan dan bahan baku utama biodiesel juga cukup besar. Di sisi lain, berdasarkan komitmen internasional untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, mendorong pemerintah Indonesia untuk mengambil peran sumber energi baru dan terbarukan dalam menjamin ketahanan dan kemandirian energi negara. *Life Cycle Assessment* (LCA) atau Penilaian siklus hidup telah menjadi metode yang dapat digunakan untuk mengetahui dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh tahapan siklus hidup produk. LCA menjadi metode yang umum untuk menilai konsumsi energi dan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada sebuah industri. LCA mencakup skema untuk mengukur input dan output sistem produk serta potensi dampak lingkungan terhadap siklus hidupnya. Berbagai industri telah menggunakan skema standar ISO 14040 dan 14044 untuk menilai dampak lingkungan yang dihasilkan ketika menghasilkan suatu produk dari sebuah industri, khususnya industri kelapa sawit. Sehingga LCA dapat digunakan sebagai

dasar dalam pengambilan keputusan mengenai desain dan pengembangan produk, salah satunya dalam rencana pengolahan limbah (DEAT, 2004). LCA dapat membantu memilih proses dan teknologi yang memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah, sehingga LCA dapat digunakan sebagai salah satu pertimbangan sebagai pengambilan keputusan yang tepat. Salah satunya penggunaan bahan-bahan berbasis alam dan metode yang menghasilkan emisi gas terendah yang dapat mengurangi tingkat pemanasan global / GWP menjadi salah satu pertimbangan pengambilan keputusan yang dapat diambil (Maisarah et al., 2021).

Meskipun kajian LCA telah diterapkan di banyak sektor, namun berdasarkan pengetahuan penulis melalui penelusuran literatur, penerapan LCA di sektor perkebunan kelapa sawit di Indonesia masih terbatas. Kajian ini berbentuk *scoping review* yang bertujuan untuk mengidentifikasi penerapan LCA pada sektor perkebunan kelapa sawit. Pertanyaan utama dalam *scoping review* ini adalah: bagaimana penerapan LCA menilai dampak lingkungan pada sektor perkebunan kelapa sawit? Sehingga untuk menjawab pertanyaan tersebut, penulis mengikuti melakukan *scoping review* melalui i). Identifikasi pertanyaan penelitian, ii). Memilih artikel yang relevan, iii). Memetakan data, dan iv). Meringkas dan melaporkan temuan.

## METODOLOGI

### *Identifikasi dan penyaringan literatur*

Proses *scoping review* dimulai dengan identifikasi literatur, penyaringan, penetapan kriteria *exclusion*, kemudian pada tahap akhir analisis lebih lanjut terhadap literatur terpilih. Penulis menggunakan database Scopus, Web of Science (WoS), dan artikel tentang industri perkebunan kelapa sawit di Indonesia dalam identifikasi literatur. Artikel-artikel yang dipublikasikan di database Scopus dan WoS diakui kualitasnya dalam peer review. Sedangkan artikel tentang industri perkebunan kelapa sawit di Indonesia dapat menjadi dasar yang lebih tepat untuk menjelaskan industri perkebunan kelapa sawit di Indonesia. Proses dari identifikasi hingga penggunaan artikel menggunakan pendekatan *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analysis* (PRISMA). Pada awalnya, metode Pendekatan PRISMA digunakan dalam ilmu kedokteran untuk menjawab pertanyaan spesifik pada proses review (Moher et al., 2009, 2010). Selanjutnya pendekatan PRISMA diterapkan dalam penelitian kehutanan, seperti tinjauan sistematis dan meta-analisis terhadap inventarisasi hutan (Lee & Koo, 2022). Pada penelitian ini digunakan penelitian untuk melihat perkembangan LCA pada industri perkebunan kelapa sawit secara umum dan khusus yang terbagi atas subsistem perkebunan kelapa sawit dan industri pabrik kelapa sawit. Pada database Scopus, penulis menggunakan TITLE-ABSKEY (*life cycle assessment*) OR (LCA) AND (oil palm\*). Selain itu, penulis menggunakan topik (TS) TS: *life cycle assessment* DAN oil palm\* dari database WoS. Selain itu digunakan pula artikel yang berasal dari Indonesia untuk melengkapi kriteria pada penelitian yang berbasis di Indonesia. Penulis menggunakan kata pencarian “life cycle assessment” dan “industri kelapa sawit” untuk mencari artikel dengan bahasa Indonesia. Selanjutnya penulis memeriksa secara teliti artikel-artikel (judul, penulis, jurnal, dan tahun terbit). Kemudian penulis membaca dengan seksama judul dan abstrak dari artikel yang diunduh. Kemudian sebagai tahap akhir melakukan analisis terhadap artikel yang dipilih.

### *Meringkas dan Melaporkan Temuan*

Kriteria *exclusion* yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis artikel yang merupakan makalah review, kemudian artikel yang tidak ada kaitannya dengan LCA pada sektor industri perkebunan kelapa sawit. Selanjutnya, artikel yang disertakan pada bagian tinjauan pustaka dengan cermat dipilih untuk menjawab pertanyaan penelitian. Ruang lingkup artikel mencakup artikel untuk mendapatkan informasi mengenai tahapan kegiatan, unit fungsional, batas sistem, dan kategori dampak yang digunakan. Unit fungsional yang umumnya digunakan pada industri perkebunan kelapa sawit ialah memproduksi 1 ton Tandan Buah Segar (TBS) atau 1 ton produksi CPO di industri kelapa sawit. Batasan sistem, dan kategori dampak mengikuti ISO 14040 dan ISO 14044 tentang pengelolaan lingkungan, persyaratan penilaian siklus hidup, dan pedoman. Setelah artikel dipilih penulis melakukan analisis terhadap hasil penilaian siklus daur hidup atau LCA yang dihasilkan pada industri perkebunan kelapa sawit dan melakukan elaborasi terhadap hasilnya sebagai pendukung pengambilan keputusan melalui dampak lingkungan pada industri kelapa sawit.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Life Cycle Assessment (LCA)*

Penilaian siklus hidup atau LCA didefinisikan sebagai alat atau metode analisis yang mempelajari aspek lingkungan dan potensi dampak lingkungan selama keseluruhan siklus hidup suatu produk yang komprehensif berdasarkan ketentuan dan standar yang spesifik (Itskos et al., 2016). Secara umum LCA digunakan untuk mengukur dampak lingkungan yang diakibatkan oleh suatu produk atau aktivitas yang dimulai dari bagian hulu yaitu akuisisi bahan baku, diikuti proses produksi dan penggunaan, serta diakhiri sampai ke hilir dengan pembuangan atau pengelolaan limbah yang dihasilkan. LCA dapat digunakan untuk membandingkan suatu barang dan jasa dalam mengidentifikasi peluang dampak yang terkait dengan limbah, emisi, maupun konsumsi sumber daya.

Sebuah analisis LCA dapat memiliki tujuan yang berbeda, hal ini bergantung pada batas sistem yang dipilih untuk penilaian (Li et al., 2014). Tujuan umum dari LCA adalah untuk membandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu produk agar dapat dipilih produk yang paling memberikan dampak lingkungan negatif terkecil. LCA dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan mengenai desain dan pengembangan produk, salah satunya dalam rencana pengolahan limbah (DEAT, 2004). Beberapa tujuan LCA antara lain untuk komparasi terhadap produk yang memiliki fungsi yang sama, identifikasi *hot spot*, komparasi dari pilihan teknis proses, komparasi dari pilihan manajemen limbah, evaluasi produk baru, serta perencanaan strategis dan evaluasi (DEAT, 2004). Sehingga LCA juga dapat digunakan untuk membantu strategi bisnis perusahaan dalam membuat keputusan, peningkatan kualitas produk dan proses dan untuk mempelajari aspek lingkungan dari produk.

Pada suatu penilaian dengan sistem proses berbasis LCA, dalam hal ini yang disebut dengan *input* yaitu rincian jumlah bahan dan sumber daya energi, sedangkan *output* yaitu rincian jumlah emisi, limbah, dan dampak lingkungan dari suatu produk. Menurut Bayer et al., (2010) ada empat proses utama dalam LCA yaitu:

1. *Cradle-to-Grave*, yaitu penilaian terhadap siklus hidup penuh dimulai dari tahap manufaktur, penggunaan, hingga tahap pembuangan bahan sisanya.
2. *Cradle-to-Gate*, yaitu penilaian terhadap siklus hidup produk secara parsial dari tahap manufaktur hingga penyimpanan di pabrik/ gudang atau lokasi bangunan sebelum didistribusikan.
3. *Cradle-to-Cradle*, yaitu penilaian terhadap siklus hidup suatu produk, hampir sama dengan Proses *Cradle-to-Grave* namun bukan pembuangan yang menjadi akhir dari hidup produk tersebut melainkan proses daur ulang.
4. *Gate-to-Gate*, yaitu pembagian proses LCA dengan melakukan penilaian hanya pada satu proses keseluruhan rantai produksi bahan atau produk.

### *Perangkat Lunak LCA*

Berdasarkan ISO 14040 yang merupakan standar dari metode LCA, tahapan analisis siklus hidup yang khas terdiri dari tahapan berikut (Itskos et al., 2016):

1. Definisi tujuan dan ruang lingkup  
Langkah ini meliputi tujuan studi, unit fungsional, batasan sistem, data yang dibutuhkan, asumsi, dan batasan yang harus ditetapkan. Secara khusus, unit fungsional adalah unit referensi yang digunakan untuk menormalkan semua input dan output untuk membandingkannya satu sama lain.
2. Inventori Siklus Hidup atau *Life Cycle Inventory (LCI)*  
Langkah ini mengacu pada analisis aliran material dan energi serta mempelajari sistem kerja. Di sisi lain, pengumpulan data untuk seluruh siklus hidup menyiratkan pemodelan sistem yang dianalisis. Selain itu, salah satu aspek terpenting dari fase ini adalah kualitas input, yang harus diverifikasi dan divalidasi untuk menjamin keandalan data dan penggunaan yang benar. Selama tahap ini, terjadi konversi data yang tersedia menjadi indikator yang sesuai. Indikator diberikan per unit fungsional yang digunakan.
3. Penilaian dampak Siklus Hidup atau *Life cycle impact assessment (LCIA)*  
Langkah ini mencakup penilaian potensi dampak yang terkait dengan bentuk penggunaan sumber daya dan emisi lingkungan yang teridentifikasi. Perhitungan dampak dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan aplikasi atau software yang sudah tersistem. Salah satu aplikasi yang sering digunakan ialah OpenLCA, simapro, GaBi, Umberto, dll dengan bantuan database Ecoinvent. Untuk memudahkan perhitungan dan mengurangi kesalahan perhitungan maka penggunaan aplikasi harus digunakan. *Software* OpenLCA, simapro, GaBi, Umberto, dll menggunakan metode berbasis matriks yang memiliki metode perhitungan yang dijalankan secara matematis.

Langkah ini mencakup penilaian potensi dampak yang terkait dengan bentuk penggunaan sumber daya dan emisi lingkungan yang teridentifikasi. Kategori dampak ada dua macam yaitu *endpoint* dan *midpoint*. *Endpoint* akan menjelaskan kerusakan akhir pada lingkungan maupun pada kesehatan manusia yang disebabkan oleh beban dan dampak lingkungan dalam *damage-oriented method*. *Endpoint* memberikan tiga macam kategori yang dapat dibagi menjadi *damage* pada *human health*, *ecosystem diversity*, dan *resource availability*. Kesehatan manusia biasanya ditunjukkan pada satuan DALY. Konsep yang menunjukkan angka hidup yang hilang akibat dari berbagai macam penyakit seperti kanker dan penyakit tidak menular. Penilaian ini bertujuan agar mengetahui kerusakan kesehatan manusia di masa depan akibat terpapar oleh bahan kimia. *Ecosystem diversity* merupakan kategori yang menyatakan adanya kepunahan spesies selama waktu tertentu dengan satuan yang digunakan adalah *species.yr*. Sedangkan kategori *resource availability* adalah kategori yang menghitung seberapa besar biaya yang diperlukan untuk mengelola sumber daya alam. Sedangkan kategori *midpoint*, didalamnya akan mencakup masalah lingkungan yaitu tentang bagaimana beban lingkungan akan berkontribusi pada dampak lingkungan yang dapat ditimbulkan, sebelum nantinya memberi efek pada keberlangsungan hidup ekosistem. Kategori dampak *midpoint* tersebut dihitung melalui penggunaan beberapa indikator secara umum seperti  $GWP_{100}$ , ODP, *Acidification Potential* (AP), POCP, Eutrofikasi, Toksisitas, dll. Menurut definisi, dampak selalu berkaitan dan dapat ditetapkan secara jelas ke suatu penyebab. Dampak lingkungan dari suatu sistem produk dalam siklus hidupnya memiliki penyebab dalam input dan output yang ditentukan dalam tahapan inventori. Kategori dampak didefinisikan sebagai kelas yang mewakili masalah lingkungan yang menjadi perhatian di mana hasil analisis inventaris siklus hidup dapat ditetapkan. Dalam penilaian dampak dibutuhkan faktor karakterisasi, yaitu faktor yang berasal dari model karakterisasi yang diterapkan untuk mengubah hasil analisis inventaris yang ditetapkan ke unit umum dari indikator kategori (Klopper & Grahl., 2014). Pemilihan kategori dampak harus sesuai dengan tujuan dan ruang lingkup studi. Hal ini penting karena data yang akan diperoleh dalam inventarisasi harus sesuai dengan analisis dampak. Sehingga proses LCA dapat dikatakan sebagai proses yang berulang.

Untuk menentukan kategori dampak yang dijelaskan tersebut, maka dibutuhkan pula suatu metode untuk LCIA dalam LCA. Terdapat beberapa jenis metode yang dapat digunakan dalam LCA, diantaranya ReCiPE, CML-IA, USEtox, Eco-indicator 99, IPCC 2007, EPD, Impact 2002+, CML-IA, Traci 2, BEES, Ecological Footprint EDIP 2003, Ecological scarcity 2006, EPS 2000, Greenhouse Gas Protocol dan lainnya (Rakhmawati et al., 2020). Pada metode penilaian dampak berupa CML-IA yang memiliki 11 kategori dampak berupa *midpoint impact category* sebagai berikut *abiotic depletion* dan *abiotic depletion (fossil fuel)*, *global warming (GWP<sub>100</sub>)*, *ozone layer depletion*, *human toxicity*, *fresh water* dan *marine aquatic ecotoxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, *photochemical oxidation*, *acidification*, dan *eutrophication* (Adiansyah et al., 2019). Pemilihan metode ini sangat bergantung pada tujuan LCA yaitu jenis keputusan apa yang akan diambil berdasarkan LCA di dalam tujuan dan ruang lingkungannya. CML-IA merupakan metode yang dibuat oleh Institute of Environmental Sciences, Leiden University, The Netherlands, pada tahun 2001, yang memiliki faktor karakterisasi untuk lebih dari 1700 alur yang berbeda yang dapat diunduh dari situs web CML pada [www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors](http://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors). CML 2001 merupakan metode penilaian dampak yang membatasi pemodelan kuantitatif ke tahap awal dalam rantai sebab-akibat untuk membatasi ketidakpastian, dimana hasil dikelompokkan dalam kategori *midpoint* menurut mekanisme umum (HyTechyling, 2020). Dalam banyak penelitian LCA, metode LCIA berupa CML 2001 banyak digunakan untuk mewakili pendekatan pada *midpoint* (HyTechyling, 2020). Contoh lainnya, metode USEtox digunakan untuk menilai dampak toksisitas. USEtox merupakan metode yang dikembangkan oleh Tim USEtox sebuah tim yang terdiri dari peneliti internasional dari *Task Force* untuk dampak toksik di bawah naungan UNEP/SETAC *Life Cycle Initiative*. Model USEtox didasarkan pada konsensus ilmiah untuk mengkarakterisasi dampak berupa toksisitas manusia yang dibagi atas *carcinogenic* dan *non-carcinogenic* serta dampak ekotoksitas dari bahan kimia (Roos et al., 2018). Keluaran utama mencakup database faktor karakterisasi yang direkomendasikan termasuk *environmental fate*, paparan, dan parameter efek untuk toksisitas manusia dan ekotoksitas. Penggunaan metode USEtox pada penilaian dampak toksisitas telah direkomendasikan oleh buku pegangan *International Reference Life Cycle Data (ILCD) Handbook* oleh *European Commission*, *Product Environmental Footprint (PEF)* dan *United States Environmental Protection Agency* (Roos et al., 2018). Basis data pada USEtox menyediakan karakterisasi faktor yang telah dihitung sebelumnya untuk lebih dari 3000 zat kimia yang ada pada <https://usetox.org>.

Pemilihan metode ini sangat bergantung pada tujuan LCA yaitu jenis keputusan apa yang akan diambil berdasarkan LCA di dalam tujuan dan ruang lingkungannya. Berikut merupakan contoh kategori dampak yang umumnya digunakan pada penilaian industri perkebunan kelapa sawit:

### *Global Warming Potential (GWP)*

GWP merupakan meningkatnya jumlah CO<sub>2</sub> dan gas rumah kaca lainnya di atmosfer bumi yang menyebabkan peningkatan penyerapan radiasi yang dipancarkan bumi sehingga menyebabkan pemanasan global (Klopffer & Grahl., 2014). Pemanasan global sebagai kategori dampak merupakan efek lingkungan negatif dari pemanasan atmosfer bumi yang disebabkan oleh aktivitas antropogenik. Senyawa CO<sub>2</sub> merupakan kontribusi paling penting untuk keseluruhan GWP di sebagian besar studi LCA (Klopffer & Grahl., 2014). Untuk penghitungan GWP dari inventarisasi hanya CO<sub>2</sub> yang berasal dari fosil (pembakaran batu bara, minyak, dll.) dan mineral (kalsinasi kapur, produksi semen) yang dipertimbangkan. Tabel penilaian GWP dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Global Warming Potential* pada beberapa senyawa (Klopffer & Grahl., 2014)

<b>Gas Rumah Kaca</b>	<b>(GWP)<sub>i100</sub> (CO<sub>2</sub>equivalents)</b>
Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> )	1
Metana (CH <sub>4</sub> )	25,75
Metana (CH <sub>4</sub> ), Regeneratif	23
Dinitrogenmonoksida (N <sub>2</sub> O)	296
Tetraklorometana	1800
Tetraflorometana	5700
Heksafloroetana	11900

### *Acidification Potential (AP) atau Asidifikasi / Pengasaman*

*Acidification Potential* merupakan terjadinya deposisi asam akibat pelepasan senyawa seperti N dan sulfur oksida ke atmosfer di tanah dan air yang menyebabkan perubahan keasaman tanah dan air sehingga menyebabkan serangkaian dampak seperti kerusakan kulit, kematian ikan, remobilisasi logam berat, dll (Klopffer & Grahl., 2014). Kuantifikasi pada kategori dampak ini dilakukan dengan konversi stoikiometri menjadi massa proton dibebaskan (H<sup>+</sup>) atau massa setara sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>). Perlu dicatat bahwa asam karbonat lemah yang dibentuk oleh pelarutan CO<sub>2</sub> di permukaan air, terutama di lautan, tidak pernah masuk dalam daftar zat pengasaman. Ini sebenarnya adalah asam yang paling relevan secara global, tetapi hanya satu konsekuensi negatif dari gas ini yang termasuk dalam kategori dampak perubahan iklim dan potensi pengasaman tidak dipertimbangkan. Pengasaman karena zat pembentuk asam dapat terjadi baik di sistem terestrial maupun akuatik. Gas yang dihasilkan juga dapat dikonversi menjadi bentuk kg SO<sub>2</sub>equivalents (Klopffer & Grahl., 2014).

### *Interpretasi*

Dalam fase ini bertujuan untuk meneliti hasil dan mendiskusikannya, memberikan informasi yang tepat sebanyak mungkin kepada subjek yang dituju. Interpretasi pada LCA merupakan teknik sistematis untuk mengidentifikasi, mengukur, memeriksa, dan mengevaluasi informasi dari hasil LCI dan LCIA, dan mengkomunikasikannya secara efektif. Interpretasi merupakan fase terakhir dari proses LCA. Interpretasi ditujukan untuk perbaikan dan inovasi sistem; itu termasuk Identifikasi beban dan dampak utama, Identifikasi *hot spot* dalam siklus hidup serta analisis sensitivitas (Klopffer & Grahl., 2014).

### *Dampak Lingkungan Global Warming Potential (GWP) Pada Industri Kelapa Sawit*

Umumnya pada industri kelapa sawit, penilaian LCA dibagi menjadi dua subsistem yaitu perkebunan kelapa sawit dan pabrik kelapa sawit. Pada subsistem tersebut terdapat input, proses, dan output yang terjadi. Unit proses pada tahapan-tahapan tersebut dapat diidentifikasi sebagai suatu hotspot penghasil dampak lingkungan. Pada subsistem perkebunan kelapa sawit, tahapan yang umumnya terjadi untuk dinilai dampak lingkungannya ialah pembibitan kelapa Sawit yang dibagi menjadi dua yaitu *pre nursery* dan *main nursery*, pemeliharaan bibit, pemeliharaan tanaman menghasilkan (TM) yang terdiri atas proses pemupukan yang menggunakan pupuk jenis tertentu, penyiraman yang membutuhkan bahan baku air bersih, pengendalian hama dan penyakit, kemudian kegiatan panen dan pada tahap terakhir transportasi ke pabrik kelapa sawit. Pada subsistem perkebunan kelapa sawit juga dapat dinilai mulai dari pembukaan lahan, hal ini bergantung pada metode dan tujuan dari LCA yang ingin dicapai.

Berdasarkan penelitian Paminto et al., 2022, pada tahapan pemeliharaan emisi pupuk nitrogen dan perubahan penggunaan lahan memberikan kontribusi yang paling signifikan (Paminto et al., 2022). Penelitian Paminto et al., 2022 menunjukkan potensial total GWP ialah 2,762 kg CO<sub>2</sub>eq, dimana 90% berasal dari tahap yang terjadi di perkebunan yaitu proses penanaman. Didapatkan bahwa emisi pupuk nitrogen dan perubahan penggunaan lahan memberikan kontribusi yang

signifikan yaitu masing-masing sebesar 29,8% dan 23,2%. Pada tahapan yang terjadi di subsistem perkebunan kelapa sawit kontribusi terhadap pupuk yang digunakan menjadi dasar penilaian dampak lingkungan yang tinggi. Pupuk  $K_2O$  dan  $P_2O_5$  relatif menghasilkan dampak yang lebih kecil dibandingkan pupuk yang menggunakan bahan baku Nitrogen. Penggunaan pupuk kimiawi ini sangat mempengaruhi dampak lingkungan pada dampak GWP. Selain penggunaan pupuk, tanaman juga membutuhkan pestisida dan herbisida. Penelitian Paminto et al., 2022, Penggunaan pestisida pada perkebunan kelapa sawit dinilai memberikan kontribusi sebesar 0,15%, sedangkan kontribusi herbisida hampir tidak berarti karena hanya dihasilkan kontribusi sebesar kurang dari 0,1%. Sedangkan pada subsistem industri/pabrik kelapa sawit, limbah POME dari kelapa sawit dinilai akan menghasilkan emisi metana yang berkontribusi terhadap emisi GRK. Sehingga hal ini juga akan mempengaruhi tingkat GWP. Transportasi mempunyai kontribusi kedua setelah POME karena TBS harus diangkut mulai dari lokasi perkebunan hingga ke pabrik. Jarak tempuh kendaraan yang relatif jauh antara titik pengumpulan produk masing-masing divisi ke PKS (Pabrik Kelapa Sawit) dan PKS ke pelabuhan menyebabkan tingginya konsumsi minyak solar (Paminto et al., 2022). Pencemaran lingkungan hidup merupakan akibat dari proses produksi yang menghasilkan limbah (Maisarah et al., 2020). Pada industri kelapa sawit, limbah cair yang sangat besar jumlahnya berasal dari limbah cair pabrik kelapa sawit (POME).

Pada penelitian Siregar 2015, penilaian dampak lingkungan dilakukan untuk melihat tahapan mana yang menjadi kontributor utama penghasil GWP. Pada subsistem perkebunan kelapa sawit didapatkan dampak lingkungan dari pembukaan lahan yaitu sebesar 0,67%, pembibitan sebesar 1,27%, proses penanaman sebesar 0,51%, proses pemupukan sebesar 61,21%, proses proteksi tanaman sebesar 6,93%, dan proses pemanenan didapatkan persentase sebesar 0,08% (Siregar et al., 2015). Penelitian ini menghitung secara total potensial dampak yang dihasilkan dari seluruh proses industri kelapa sawit untuk dampak lingkungan GWP sebesar 1378,36 kg  $CO_2eq$  (Siregar et al., 2015). Penelitian Musthafa Al Hakim et al., 2014 menunjukkan bahwa pada tahapan pada perkebunan kelapa sawit merupakan sumber emisi Gas Rumah Kaca terbesar dibandingkan pada subsistem lainnya, hal ini berasal dari penggunaan bahan bakar solar, pupuk NPK, pestisida, dan fungisida. Total emisi Gas Rumah Kaca yang dihasilkan yaitu sebesar 0,50685 kg  $CO_2 eq$  / bibit (Musthafa Al Hakim et al., 2014). Didapatkan bahwa emisi dari penggunaan pupuk NPK sebesar 0,1703 kg  $CO_2 eq$  / bibit atau 33,6% dari total emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada pembibitan kelapa sawit (Musthafa Al Hakim et al., 2014). Selanjutnya pada penelitian Stichnothe & Schuchardt, 2011, unit fungsional yang digunakan yaitu produksi dan pengolahan 1 ton tandan buah segar kelapa sawit (TBS) (Stichnothe & Schuchardt, 2011). Pada penelitiannya digunakan dua skenario untuk melihat hasil dampak lingkungan yang dihasilkan. Produksi dan pengolahan satu ton TBS menghasilkan lebih dari 460 kg  $CO_2eq$  dalam skenario terburuk dan 110 kg  $CO_2eq$  dalam skenario terbaik. Pada penilaian dampak lingkungan didapatkan bahwa emisi karbon dioksida dan dinitrogen oksida merupakan kontributor utama pada penghasilan dampak GWP. Karbon dioksida ( $CO_2$ ) menyumbang 55% dan dinitrogen oksida ( $N_2O$ ) menyumbang sebesar 45% pada dampak lingkungan GWP. Pada skenario terbaik, digunakan pemanfaatan hasil sisa-sisa pabrik kelapa sawit yang dilakukan melalui pengomposan. Pengurangan emisi gas rumah kaca yang signifikan didapat dicapai melalui pengomposan bersama dari sisa-sisa pabrik kelapa sawit. Ketika kompos dikembalikan ke perkebunan atau digunakan kembali, maka sejumlah besar karbon dikembalikan ke tanah akibat penggunaan kompos. Sehingga pemanfaatan residu atau limbah yang berasal dari pabrik kelapa sawit dinilai menjadi langkah yang sangat tepat dan sangat penting untuk mengurangi dampak lingkungan khususnya pada potensi GWP dan eutrofikasi. Selanjutnya penelitian mengenai penyerapan karbon dalam tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kondisi iklim perlu dilakukan kajian dampak yang lebih spesifik pada lokasi atau regional tertentu untuk mendapatkan hasil dampak lingkungannya. Pada penelitian yang dilakukan ini meskipun diasumsikan jarak transportasi yang cukup jauh, kontribusinya terhadap GWP hampir dapat diabaikan karena jika dibandingkan proses yang terjadi pada perkebunan kelapa sawit, kontribusinya hanya sebesar <1%.

Berdasarkan penelitian Siregar et al., 2020 (Siregar et al., 2020), hasil perhitungan LCA dengan unit fungsional 1 ton produksi *Crude Palm Oil* (CPO) menunjukkan bahwa proses pembibitan dan pemeliharaan bibit di subsistem perkebunan kelapa sawit merupakan tahapan yang paling besar menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK). Dampak Lingkungan pada tahapan proses pembibitan untuk potensial penghasil gas rumah kaca atau dikenal dengan *Global Warming Potential* (GWP) diidentifikasi dihasilkan sebesar 90,7 kg  $CO_2 eq$ . Tahapan pemeliharaan tanaman menghasilkan (TM) juga menghasilkan emisi yang berasal dari kegiatan pemupukan dan pengendalian gulma. Dampak Lingkungan pada tahapan proses pemeliharaan untuk GWP dihasilkan sebesar 7,7 kg  $CO_2 eq$ . Sedangkan dampak Lingkungan pada tahapan proses transportasi untuk GWP didapatkan nilai sebesar 8,5 kg  $CO_2 eq$  (Siregar et al., 2020). Tahapan proses perkebunan kelapa sawit dinilai menghasilkan emisi yang paling besar, hal ini dikarenakan pada proses ini emisi dihasilkan dari proses yang berasal dari kegiatan pemupukan dengan menggunakan pupuk kimiawi. Pupuk NPK dapat melepaskan emisi gas rumah kaca karena pupuk NPK terdapat kandungan N yang akan bereaksi dan menghasilkan gas rumah kaca  $N_2O$ . Berdasarkan penilaian pada tabel angka GWP oleh Klopffer & Grahl., 2014, Global Warming potential yang dihasilkan

dari senyawa kimia  $N_2O$  lebih besar sampai 296 kali lipat dibandingkan dengan senyawa kimia  $CO_2$ . Sehingga sedikit saja penggunaan pupuk NPK yang digunakan oleh perkebunan kelapa sawit dapat menimbulkan emisi GRK karena nilai radiasi pemanasan global  $N_2O$  yang lebih besar. Sehingga didapatkan bahwa persentase nilai GWP muncul dari penggunaan *agro-chemical* pada tahap pemupukan dan tahapan pemeliharaan tanaman yaitu sebesar 68,14% untuk perkebunan kelapa sawit.

Pada Penelitian Sari et al., 2023, subsistem pabrik kelapa sawit yang dampaknya paling besar adalah penggunaan boiler yaitu sebesar  $2.16 \times 10^7$  kg  $CO_2eq/kg$  cpo/tahun pada GWP, sebesar  $1.77 \times 10^5$  kg  $SO_2eq/kg$  cpo/tahun pada Asidifikasi dan sebesar  $1,88 \times 10^4$  kg  $PO_4eq/kg$  cpo/tahun terhadap Eutrofikasi (Sari et al., 2023). Penelitian Sari et al., 2023 menggunakan metode *cradle-to-gate* yang terdiri atas Pembibitan, Pembukaan Lahan, Penanaman, Pemeliharaan, Pemanenan menunjukkan bahwa penggunaan *glyphosate herbicide* menghasilkan  $7.95 \times 10^3$  kg  $CO_2 eq / kg$  cpo / tahun pada GWP (Sari et al., 2023). Herbisida jenis glifosat pada perkebunan kelapa sawit digunakan untuk membasmi gulma. Penelitian Sari et al., 2023, menunjukkan penelitian dengan membandingkan industri perkebunan kelapa sawit yang menggunakan sistem sertifikasi MSPO dan yang tidak menggunakan sertifikasi MSPO. Didapatkan bahwa hasil siklus hidup menunjukkan penurunan dampak lingkungan secara keseluruhan dari kategori Kesehatan Manusia sebesar 99,913%, Kualitas Ekosistem sebesar 99,958%, dan Sumber Daya sebesar 90,223% pada perkebunan kelapa sawit bersertifikasi MSPO (Sari et al., 2023). Didapatkan bahwa penerapan sertifikasi MSPO di akan membawa perbaikan dalam aspek lingkungan dan ekonomi, dan harus direkomendasikan kepada petani swadaya untuk memungkinkan peningkatan keberlanjutan produksi minyak sawit. Didapatkan bahwa substitusi pupuk mineral dengan pupuk organik dapat semakin mengurangi dampak lingkungan dari budidaya kelapa sawit, yaitu masing-masing sebesar 99,998%, 99,987%, dan 99,844% pada kategori kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan sumber daya (Sari et al., 2023).

#### **Dampak Lingkungan Asidifikasi Pada Industri Kelapa Sawit**

Pada Penelitian Sari et al., 2023, penilaian dampak lingkungan padaa dampak asidifikasi dinilai sebesar to 52.9 kg  $SO_2eq/kg$  cpo / tahun. Berdasarkan penelitian Rinaldo et al., 2023, hasil perhitungan LCA dengan unit fungsional 1 ton produksi *Crude Palm Oil* (CPO) menunjukkan bahwa proses pembibitan dan pemeliharaan bibit di subsistem perkebunan kelapa sawit merupakan tahapan yang paling besar menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK). Dampak Lingkungan pada tahapan proses perkebunan menghasilkan dampak asidifikasi yang dihasilkan sebesar 0,442 kg  $SO_2 eq$  (Rinaldo et al., 2023). Tahapan pemeliharaan tanaman menghasilkan (TM) juga menghasilkan emisi yang berasal dari kegiatan pemupukan dan pengendalian gulma. Dampak Lingkungan pada tahapan proses pemeliharaan untuk asidifikasi dihasilkan sebesar 0,041 kg  $SO_2 eq$ . Sedangkan dampak Lingkungan pada tahapan proses transportasi untuk asidifikasi dihasilkan sebesar 0,050 kg  $SO_2 eq$  (Rinaldo et al., 2023).

Berdasarkan penelitian (Siregar et al., 2020), hasil perhitungan LCA dengan unit fungsional 1 ton produksi *Crude Palm Oil* (CPO) menunjukkan bahwa proses pembibitan dan pemeliharaan bibit di subsistem perkebunan kelapa sawit merupakan tahapan yang paling besar menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) dengan potensial dampak asidifikasi dihasilkan sebesar 0,442 kg  $SO_2 eq$  dan eutrofikasi sebesar dan 0,083 kg  $PO_4^{3-} eq$  (Siregar et al., 2020). Tahapan pemeliharaan tanaman menghasilkan (TM) juga menghasilkan emisi yang berasal dari kegiatan pemupukan dan pengendalian gulma. Dampak Lingkungan pada tahapan proses pemeliharaan untuk asidifikasi dihasilkan sebesar 0,041 kg  $SO_2 eq$ . Sedangkan dampak Lingkungan pada tahapan proses transportasi untuk asidifikasi dihasilkan sebesar 0,050 kg  $SO_2 eq$  (Siregar et al., 2020). Penelitian Paminto et al., 2022 menunjukkan potensi dampak asidifikasi secara total didapatkan sebesar 24,8 kg  $SO_2 eq$ , dengan kontributor utama berasal dari tahapan budidaya yang menyumbang sekitar 98% (Paminto et al., 2022).

#### **Manfaat Studi LCA bagi Pendukung Pengambilan Keputusan**

Beberapa subsistem pada industri kelapa sawit dengan produksi CPO dari kelapa sawit mempunyai dampak yang signifikan terhadap lingkungan. Dari beberapa studi LCA diatas, fase perkebunan akibat penggunaan pupuk dianggap sebagai hotspot atau kontributor utama dalam produksi CPO(Wahyono et al., 2020). Efisiensi penggunaan pupuk merupakan pilihan terbaik untuk mengurangi emisi GRK dan potensi dampak lingkungan GWP. Sedangkan pada subsistem pabrik kelapa sawit, emisi metana dari POME juga memberikan kontribusi yang signifikan terhadap emisi GRK. Penangkapan metana seharusnya mempunyai manfaat dalam mengurangi emisi metana dari produksi CPO. Penggunaan energi yang diperoleh dari biogas dalam pengolahan air limbah di pabrik kelapa sawit (POME) dapat menjadi salah satu cara mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan. Rekomendasi ini dapat dilakukan dengan melakukan perbaikan berkelanjutan pada minyak sawit mentah produksi untuk mengurangi dampak lingkungan. Hasil LCA dapat

digunakan sebagai alat deklarasi produk ramah lingkungan untuk mematahkan kampanye negatif dan menjamin produk kelapa sawit asal Indonesia dapat diterima dengan baik di pasar global.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Penerapan LCA untuk menilai dampak lingkungan di sektor perkebunan kelapa sawit telah banyak diaplikasikan dengan menggunakan berbagai macam tools berupa *software* yang dapat membantu penilaian LCA. *Scoping review* terhadap total dampak lingkungan untuk produksi industri kelapa sawit pada subsistem perkebunan kelapa sawit dan pabrik kelapa sawit telah dilakukan. Potensi dampak lingkungan pemanasan global (GWP), asidifikasi, dan eutrofikasi lebih banyak digunakan pada penilaian LCA. Tahapan yang menjadi kontributor utama dianalisis ialah penggunaan pupuk pada perkebunan kelapa sawit serta pengelolaan limbah POME yang terjadi di pabrik kelapa sawit. Pada pengambilan keputusan yang bisa dilakukan, dengan melihat nilai potensi dampak GWP dan asidifikasi yang tinggi maka dapat disimpulkan pemanfaatan *agro-chemical* berupa pupuk, insektisida, pestisida dan fungisida harus ditindak lebih lanjut jika menginginkan kinerja lingkungan yang baik. Selain itu pemanfaatan limbah POME juga dapat mengurangi potensi dampak lingkungan. Penilaian LCA dapat menjadi salah satu pendukung pengambilan keputusan dengan berorientasi pada dampak lingkungan negatif terkecil yang dihasilkan dari suatu proses. Sehingga konsep *sustainability* dan *green economy* dapat tercapai dengan adanya penilaian LCA pada industri kelapa sawit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiansyah, J. S., Ningrum, N. P., Pratiwi, D., & Hadiyanto, H. (2019). Kajian Daur Hidup (Life Cycle Assessment) dalam Produksi Pupuk Urea: Studi Kasus PT Pupuk Kujang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3), 522. <https://doi.org/10.14710/jil.17.3.522-527>
- Bayer, C., Gamble, M., Gentry, R., & Joshi, S. (2010). Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice. In *American Institute of Architects*.
- DEAT. (2004). Life cycle assessment, , Integrated Environmental Management, Information Series 9. In *Department of Environmental Affairs and Tourism (DEAT), Pretoria*. (ISBN 0-958). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00027-3>
- HyTechycling. (2020). *Assessment of critical materials and components in FCH technologies - LCA approach in end of life cycle of FCH technologies* (Issue 700190).
- Itskos, G., Nikolopoulos, N., Kourkoumpas, D. S., Koutsianos, A., Violidakis, I., Drosatos, P., & Grammelis, P. (2016). Environment and Development : Chapter 6 Energy and the environment. In *Environment and Development: Basic Principles, Human Activities, and Environmental Implications* (pp. 363–452). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62733-9.00006-X>
- Kloppfer, W., & Grahl, B. (2014). Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice, First Edition : Chapter 4 Life Cycle Impact Assessment. In *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*. <https://doi.org/10.1017/9781108333726.016>
- Lee, S. W., & Koo, M. J. (2022). PRISMA 2020 statement and guidelines for systematic review and meta-analysis articles, and their underlying mathematics: Life Cycle Committee Recommendations. *Life Cycle*, 2, 1–10. <https://doi.org/10.54724/lc.2022.e9>
- Li, T., Zhang, H., Liu, Z., Ke, Q., & Altung, L. (2014). A system boundary identification method for life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 646–660. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0654-5>
- Maisarah, Adityosulindro, S., & Wulandari, D. (2021). Utilization of wild algae biomass as biosorbent for removal of heavy metal Zinc (Zn<sup>2+</sup>) from aqueous solution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 824(1), 2–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/824/1/012017>
- Maisarah, Saefumillah, A., & Ambarsari, H. (2020). Study of microalgae (*Scenedesmus* Sp.) utilization as phosphate bioremediator (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) in domestic wastewater medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 763(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/763/1/012055>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2010). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, 8(5), 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2010.02.007>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P. C., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Musthafa Al Hakim, H., Supartono, W., & Suryandono, A. (2014). Life Cycle Assesment Pada Pembibitan Kelapa Sawit Untuk Menghitung Emisi Gas Rumah Kaca (Life Cycle Assessment Of Palm Oil Seedlings For Calculating The Greenhouse Gas Emissions). *Ziraa'Ah*, 39(2), 72–80.
- Paminto, A. K., Karuniasa, M., & Frimawaty, E. (2022). Potential environmental impact of biodiesel production from

- palm oil using LCA (Life Cycle Assessment) in Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 12(1), 64–71. <https://doi.org/10.29244/jpsl.12.1.64-71>
- Rakhmawati, A. N., Devia, Y. P., & Wijatmiko, I. (2020). Life Cycle Assessment (LCA) Analysis of Concrete Slab Construction For Estimating The Environmental Impact. *Rekayasa Sipil*, 14(3), 232–237. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasisipil.2020.014.03.10>
- Rinaldo, R., Suprihatin, S., & Yani, M. (2023). Life cycle assessment produksi crude palm oil (CPO) (studi kasus: PT X Provinsi Bengkulu). *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 17(3), 651–659. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v17i3.17131>
- Roos, S., Holmquist, H., Jönsson, C., & Arvidsson, R. (2018). USEtox characterisation factors for textile chemicals based on a transparent data source selection strategy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(4), 890–903. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1330-y>
- Sari, D. A. P., Nikmah, M., & Sasongko, N. A. (2023). Life Cycle Assessment in the Production Process of Crude Palm Oil (Cpo) on Palm Oil Plantation and Mills. *International Journal of GEOMATE*, 25(111), 177–184. <https://doi.org/10.21660/2023.111.s8616>
- Siregar, K., Ichwana, Nasution, I. S., Sholihati, Sofiah, I., & Miharza, T. (2020). Implementation of Life Cycle Assessment (LCA) for oil palm industry in Aceh Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 542(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/542/1/012046>
- Siregar, K., Tambunan, A. H., Irwanto, A. K., Wirawan, S. S., & Araki, T. (2015). A Comparison of Life Cycle Assessment on Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) and Physic Nut (*Jatropha curcas* Linn.) as Feedstock for Biodiesel Production in Indonesia. *Energy Procedia*, 65, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.054>
- Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2011). Life cycle assessment of two palm oil production systems. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3976–3984. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.001>
- Wahyono, Y., Hadiyanto, H., Budihardjo, M. A., & Adiansyah, J. S. (2020). Assessing the environmental performance of palm oil biodiesel production in indonesia: A life cycle assessment approach. *Energies*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/en13123248>
- Zhao, J., Elmore, A. J., Lee, J. S. H., Numata, I., Zhang, X., & Cochrane, M. A. (2023). Replanting and yield increase strategies for alleviating the potential decline in palm oil production in Indonesia. *Agricultural Systems*, 210(July), 103714. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103714>

## BIODATA PENULIS (Opsional)



**Maisarah, S.Si., M.T.**

Beliau bekerja sebagai dosen dan peneliti di Program Sarjana Teknik Kimia Fakultas Sains dan Teknologi di Institut Teknologi Sawit Indonesia.



**Rahmad Dian, S.Kom., M.Kom.**

Beliau bekerja sebagai dosen dan peneliti di Program Sarjana Sistem dan Teknologi Informasi (STI) Fakultas Sains dan Teknologi di Institut Teknologi Sawit Indonesia.