

Journal Review: Perbandingan Pemodelan Perangkat Lunak *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk Teknologi Energi

Yasfina Arba, Suyono Thamrin

Ketahanan Energi, Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia;

Email : yasfina07@gmail.com (Y.A), suyono.thamrin@idu.ac.id (S.T);

Abstrak : Perubahan bentuk energi menjadi bentuk yang lain memberikan pengaruh terhadap lingkungan yang dapat menyebabkan permasalahan kerusakan lingkungan. Permasalahan lingkungan yang ditimbulkan ialah seperti timbulnya polusi udara yang dapat menyebabkan hujan asam, asap, perubahan iklim, pemanasan global, dan sebagainya. Adanya hal tersebut diperlukannya teknologi serta sistem yang dapat meminimalisir timbulnya berbagai masalah. Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) adalah metode yang sering digunakan oleh industri untuk mengukur dampak lingkungan berdasarkan bahan mentah yang digunakan hingga proses produksi. Dalam menggunakan metode LCA diperlukan perangkat lunak yang mendukung. Keberadaan perangkat lunak pemodelan LCA sangat beragam serta memiliki karakteristiknya masing – masing sehingga setiap industri disarankan untuk tepat dalam memilih dan menggunakan jenis perangkat lunak sesuai dengan produksinya. Jenis perangkat lunak yang sering digunakan ialah SimaPro, GaBi, dan OpenLCA. Ketiga perangkat tersebut akan penulis lakukan perbandingan melalui studi literatur. Adanya metode LCA dapat membantu dalam mempercepat tujuan Indonesia menuju *Net Zero Emission* (NZE) dan mewujudkan transisi energi menuju energi hijau yang lebih ramah lingkungan. Dalam hal ini, teknologi energi perlu dilakukan analisis dampak lingkungan terlebih dahulu menggunakan metode LCA yang mudah dan memberikan hasil secara sistematis dan transparan. Selain itu, metode LCA telah terindeks dalam ISO 14040 dan ISO 14044 sehingga tidak perlu dikhawatirkan karena tentunya hasil penilaian dampak lingkungan dapat diakui secara global.

Kata Kunci : *Life Cycle Assessment*, Teknologi Energi, *Net Zero Emission*

Abstract : Changes in the form of energy into other forms have an influence on the environment which can cause environmental damage problems.. Environmental problems caused are such as the emergence of air pollution which can cause acid rain, smoke, climate change, global warming, and so on. The existence of this requires technology and systems that can minimize the emergence of various problems. The Life Cycle Assessment (LCA) method is a method that is often used by industry to measure environmental impacts based on the raw materials used in the production process. In using the LCA method, supporting software is needed. The existence of LCA modelling software is very diverse and has its own characteristics so each industry is advised to be precise in choosing and using the type of software according to its production. The types of software that are often used are SimaPro, GaBi, and OpenLCA. The authors will compare the three devices through a literature study. The existence of the LCA method can help in accelerating Indonesia's goals toward Net Zero Emission

(NZE) and realizing the energy transition to green energy that is more environmentally friendly. In this case, energy technology needs to be analyzed first using the LCA method which is easy and provides results in a systematic and transparent manner. In addition, the LCA method has been indexed in ISO 14040 and ISO 14044 so there is no need to worry because of course the results of the environmental impact assessment can be recognized globally.

Keywords : Life Cycle Assessment, Energy Technology, Net Zero Emission

1. Pendahuluan

Ketahanan energi (*energy security*) adalah suatu kondisi terjaminnya ketersediaan energi, akses masyarakat terhadap energi pada harga terjangkau dalam jangka panjang dengan tetap memperhatikan perlindungan terhadap lingkungan hidup. Diuraikan kemudian pada prinsip-prinsip *availability, accessibility, affordability, acceptability* dan *sustainability* (Musri, 2021). Menjaga ketahanan energi berarti kita juga harus memberikan perlindungan terhadap lingkungan hidup khususnya yang menjadi sumber energi untuk negara. Indonesia merupakan negara yang memiliki sumber daya alam melimpah sehingga hal tersebut berpotensi besar bagi Indonesia dalam memiliki sumber energi yang berlimpah pula. Namun dengan adanya pengakuan tersebut membuat masyarakat berpikir bahwa sumber daya alam yang dimiliki Indonesia tidak akan habis. Dalam menjaga sumber daya alam serta lingkungan hidup juga diperlukan upaya – upaya pengelolaan dengan baik dan benar agar tetap terjaga. Sumber daya alam terbagi menjadi tiga yaitu sumber daya alam dapat diperbarui, sumber daya alam tidak dapat diperbarui, dan sumber daya alam tidak pernah habis (Faradiba, 2021). Sama seperti sumber energi yang terbagi menjadi energi fosil dan energi baru terbarukan. Hingga saat ini masyarakat Indonesia masih didominasi mengonsumsi energi fosil dibandingkan energi baru terbarukan atau yang biasa dikenal dengan energi hijau. *Institute for Essential Services Reform* (IESR) menyampaikan bahwa komposisi bauran energi kita berasal dari minyak bumi (42,1 %), batubara (30,3%), dan gas bumi (21,3%). Itu artinya, sekitar 93,7 % energi yang dikonsumsi di negeri ini tidak dapat diperbarui (Agus & Julius, 2019).

Meskipun dalam perbandingan harga saat ini energi fosil dirasa lebih terjangkau, energi fosil memiliki dampak negatif yang cukup banyak khususnya pada lingkungan. Selain memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, keberadaan energi fosil akan terus menipis dan diprediksi akan habis sehingga hanya mampu bertahan beberapa tahun kedepan. Oleh karena itu, Indonesia sedang melakukan transisi dari energi fosil menuju energi baru terbarukan yang lebih ramah lingkungan serta keberadaannya yang tidak akan habis dengan didukung pengolahan yang baik agar dapat terus berkelanjutan. Selain itu, berkaitan dengan lingkungan hidup, maka dalam proses pelaksanaan produksi energi baru terbarukan menggunakan teknologi yang dipilih diharuskan melakukan penilaian atau evaluasi untuk mengetahui seberapa besar potensi atau dampak yang dihasilkan pada suatu sistem produksi tersebut selama proses produksi berlangsung khususnya dampak terhadap lingkungan.

Pada setiap pembangunan yang melibatkan sumber daya alam seperti infrastruktur untuk pemenuhan energi (pembangkit tenaga listrik) tentunya akan memberikan dampak terhadap kondisi lingkungan (Jayanto et al., 2018). Oleh karena itu, setiap industri secara progresif harus meningkatkan proses produksi dengan menggunakan manajemen siklus daur hidup pada industri mereka.

Pemerintah serta perusahaan industri membutuhkan perangkat lunak yang digunakan untuk menghitung inventaris penilaian dampak untuk menentukan keseimbangan energi dan massa pada suatu sistem dan mengalokasikan emisi, penggunaan energi, dan sebagainya. Model perangkat lunak pada masing – masing program memiliki karakteristik atau fitur yang berbeda meskipun fungsi yang dimilikinya sama yaitu untuk mengukur dampak lingkungan. Adanya perbedaan pada masing – masing program dapat mempengaruhi hasil dan kesesuaian antara *software* satu dengan lainnya. Oleh karena itu, setiap perusahaan harus memilih perangkat yang sesuai dengan industrinya. Dalam hal ini penulis bertujuan untuk menganalisis perbedaan beberapa pemodelan perangkat lunak LCA yaitu SIMAPRO, Gabi, dan OpenLCA.

Proses pengukuran dampak tersebut dapat dilakukan suatu perusahaan atau industri melalui pemodelan perangkat lunak salah satunya yaitu *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA sesuai dengan ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017 (KLHK, 2021) diartikan sebagai metodologi yang sistematis dan kuantitatif untuk menilai atau mengevaluasi untuk mengukur potensi dampak lingkungan dari suatu proses produksi yang dilakukan oleh suatu industri selama proses produksi tersebut berlangsung. Dengan dukungan setiap proses transisi energi dalam mendukung energi hijau untuk tetap menjaga kelestarian lingkungan menggunakan teknologi energi dapat dilakukan dengan efektif dan efisien karena dilakukan pengukuran dampak terhadap lingkungan melalui perangkat lunak LCA sehingga diketahui apakah sistem produksi tersebut layak atau tidak untuk digunakan. Metode LCA merupakan metode baru yang digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan dari suatu kegiatan. LCA tidak hanya merepresentasikan hasil secara kualitatif namun juga secara kuantitatif yang digambarkan melalui grafik atau diagram sehingga dengan mudah dapat terbaca oleh pengguna dalam menentukan rekomendasi secara efektif terkait pengurangan dampak lingkungan dari kegiatan tersebut. Proses analisis menggunakan LCA terbagi menjadi beberapa tahap yaitu (1) Tujuan dan Ruang lingkup, (2) Analisis Inventaris, (3) Penilaian Dampak, dan (4) Interpretasi hasil untuk perbaikan. Saat ini masalah lingkungan telah menjadi perhatian internasional.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan ialah bersifat deskriptif analisis dengan menggunakan metode penelitian studi literatur (*literature review*) dimana penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan perbedaan pemodelan dampak daur hidup melalui analisa terhadap beberapa perangkat lunak LCA. Dalam jurnal ini peneliti juga menggunakan teknik pengumpulan data dalam bentuk studi pustaka dengan metode deskriptif dari sumber penelitian terdahulu maupun pustaka lainnya seperti Jurnal, Buku, Kajian yang dilakukan instansi pemerintah dan non-pemerintah, berita online, maupun dokumen online yang relevan dengan topik penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Transisi energi dilakukan selain karena energi fosil yang semakin menipis tetapi karena begitu banyak dampak negatif terhadap lingkungan yang disebabkan oleh energi fosil seperti polusi, pemanasan global, efek gas rumah kaca, emisi, hujan asam, dan sebagainya. Energi fosil juga memberikan dampak negatif kepada kesehatan manusia. Terkait dengan adanya tetap menjaga kelestarian lingkungan hidup dalam mewujudkan kemandirian dan ketahanan energi nasional sesuai dengan (Permen Republik Indonesia, 2014). Berbagai upaya *climate action* agar dapat menyelamatkan bumi dilakukan, salah satunya melalui penggunaan energi baru terbarukan sebagai alternatif

pengganti energi berbahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas. Tentunya dalam merealisasikan hal tersebut dibutuhkan teknologi energi yang mendukung. Teknologi berkembang mengikuti jaman yang semakin maju. Termasuk teknologi yang digunakan pada energi. Hingga saat ini beberapa teknologi energi mulai dijalankan terutama dalam mewujudkan transisi energi menuju energi baru terbarukan. Berdasarkan data milik Kementerian ESDM, dengan adanya dukungan teknologi yang ada saat ini, potensi listrik yang diperoleh dari energi terbarukan mencapai 432 GW atau 7 – 8 kali lipat lebih besar dari total kapasitas pembangkit yang terpasang saat ini (Agus & Julius, 2019; Mansur et al., 2014).

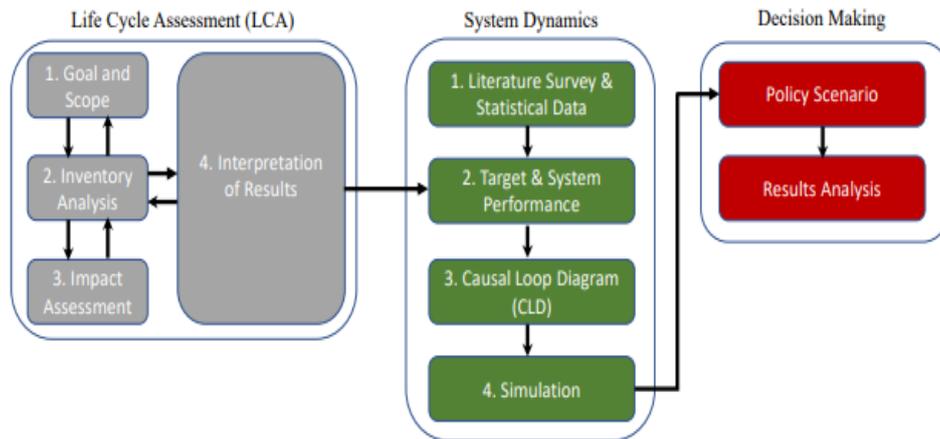
Pada saat ini yang tengah menjadi trend transisi energi secara global ialah menuju pengembangan energi bersih atau yang biasa dikenal dengan istilah *Net Zero Emission* (NZE). *Net zero emission* merupakan keadaan dimana kita masih diperbolehkan untuk mengeluarkan emisi dengan syarat mengkompensasi emisi tersebut. Berbeda halnya dengan *Zero Carbon* yang mana kita tidak boleh sama sekali menggunakan fosil. Saat ini fokus tujuan secara global ialah menuju *Net Zero Emission* yang berarti kita masih diberi kesempatan untuk menghasilkan emisi namun emisi tersebut tidak boleh sampai ke lapisan atmosfer dengan cara di injeksikan melalui hutan atau rekaya teknologi (Dirjen Migas, 2021). Teknologi energi mengacu pada kombinasi perangkat keras, teknik, keterampilan, metode, dan proses yang digunakan dalam produksi energi dan penyediaan layanan energi, yaitu cara kita memproduksi, mengubah, menyimpan, mengangkut, dan menggunakan energi. Oleh karena itu, perubahan teknologi di sektor energi mengacu pada perubahan dari waktu ke waktu dalam jenis teknologi yang digunakan pada berbagai tahap rantai pasokan energi. Kemajuan teknologi dihasilkan dari investasi dalam penelitian dasar dan terapan, dan dari pengembangan, demonstrasi dan komersialisasi teknologi baru. Teknologi energi bersih terdiri dari teknologi yang menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dan polutan yang minimal atau nol. Teknologi energi bersih mengacu pada teknologi rendah karbon yang tidak melibatkan produksi atau transformasi bahan bakar fosil – batubara, minyak dan gas alam – kecuali jika disertai dengan penangkapan, pemanfaatan dan penyimpanan karbon dan anti- langkah-langkah polusi.

Menurut Energy Agency (2020), mendefinisikan teknologi energi rendah karbon sebagai: sumber energi terbarukan (*renewables*), daya nuklir; penangkapan, pemanfaatan dan penyimpanan karbon (CCUS); hidrogen yang berasal dari sumber energi rendah karbon; teknologi yang meningkatkan efisiensi transformasi energi (misalnya, beralih dari lampu pijar ke lampu [LED] pemancar cahaya); pilihan daya dan penyimpanan non-fosil lainnya; dan teknologi lintas sektor yang menghasilkan emisi minimal CO₂ dan polusi. Sumber energi bersih semakin penting, tetapi mereka masih menyumbang hanya sekitar seperlima dari pasokan energi di seluruh dunia. Dengan kata lain, sistem energi dalam kondisi saat ini tidak berkelanjutan.

3.1. *Life Cycle Assesstment*

Life cycle Assesstment (LCA) merupakan suatu metode tentang dampak lingkungan yang diidentifikasi, diukur, dan dievaluasi agar dapat memeberikan informasi untuk memberikan rekomendasi alternatif pengambilan keputusan terhadap suatu produk, proses, maupun layanan. Informasi yang dihasilkan dari analisis LCA dapat dipergunakan dalam berbagai hal baik perbandingan opsi desain, peningkatan produk, pemantauan lingkungan terhadap peraturan, dan memberikan dasar untuk klaim produk lingkungan. Analisis yang dihasilkan LCA tidak akan memberikan informasi terkait parameter biaya produksi, produk peringkat kinerja, pemasaran, dan

penerimaan konsumen karena LCA adalah salah satu sumber informasi yang didalamnya membantu memahami konsekuensi lingkungan yang berkaitan dengan suatu keputusan.



Gambar 1. Kerangka tahapan *Life cycle Assesstment*, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Terdapat berbagai macam jenis perangkat lunak yang dapat digunakan dengan metode LCA seperti berikut (Ormazabal et al., 2014):

Tabel 1.
 Perangkat Lunak Untuk Metode LCA

Perangkat Lunak	Pengembang	Web
AIST-LCA 4	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan	http://www.aist-riss.jp/main/
Athena	Athena Sustainable Materials Institute, Canada	http://www.athenasmi.org/
BEES 4.0	National Institute of Standards and Technology, USA	http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm
CMLCA 4.2	Leiden University, Institute of Environmental Sciences (CML), Holland	http://www.cml.leiden.edu/
E ³ DATABASE	Ludwig-BölkowSystemtechnik GmbH, Germany	http://www.e3database.com/
EARTHSTER 2 TURBO	GreenDelta GmbH	http://www.greendelta.com/
ECO-BAT 4.0	Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Switzerland	http://www.eco-bat.ch/
GaBi	Pe-International	http://www.gabi-software.com/
GEMIS	Oeko Institut, Germany	http://www.gemis.de/
LEGEP	LEGEP Software GmbH, Germany	http://www.legep.de/?lang=en
OpenLCA	GreenDelta GmbH	http://www.openlca.org/
REGIS	Sinum AG-EcoPerformance Systems	http://www.sinum.com/
SABENTO	ifu Hamburg GmbH, Germany	http://www.sabento.com/
SIMAPRO	PRé-Consultants	http://www.pre-sustainability/

Tabel 1.
(Lanjutan)

Perangkat Lunak	Pengembang	Web
SULCA 4.2	VTT Technical Research Centre of Finland	http://www.vtt.fi/index.jsp
TEAM	Ecobilan Pricewaterhouse Coopers	http://www.ecobilan.pwc.fr/en/
TESPI	ENEA, Italy	http://www.elca.enea.it/
UMBERTO	ifu Hamburg GMBH	http://www.umberto.de/en/
USES-LCA 2.0	Netherlands Center For Environmental Modeling	http://www.cem-nl.eu/useslca

Setiap perangkat memiliki database berbeda yang memungkinkan hasil dari analisis antar perangkat satu dengan yang lainnya. Dalam hal ini penulis akan memberikan perbandingan perangkat lunak LCA yaitu SIMAPRO, GaBi, dan OpenLCA.

3.2. SIMAPRO

Simapro adalah perangkat lunak yang diakui dan dikembangkan oleh konsultan PRE yang memiliki fokus terhadap LCA dan telah ada dipasar selama lebih dari 20 tahun. Simapro digunakan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan memantau dampak lingkungan pada suatu produk maupun layanan. Pengguna dapat mengoperasikan simapro dengan mudah dengan membuat model dan menganalisis LCA yang kompleks secara sistematis dan transparan sesuai dengan seri ISO 14040. Selain itu, pengguna harus membuat siklus LCA secara detail disetiap siklus seperti bahan, proses, transportasi, daur ulang, penggunaan kembali, dan pembuangan, lalu hasil jarungan siklus hidup serta dampak ekologis yang ada. Pengguna dapat menambahkan materi atau proses baru ke dalam database dan menggunakannya dalam aplikasinya. Persamaan fungsi juga didukung oleh SimaPro ketika pengguna menambahkan parameter atau elemen baru. Fungsi-fungsi ini membuat perangkat lunak menjadi efisien dan fleksibel dalam aplikasi LCIA tertentu. Simapro juga memiliki penyajian hasil yang jelas dan presisi.

3.3. GaBi

GaBi adalah alat perangkat lunak yang dikenal baik untuk menilai produk dan sistem dari perspektif siklus hidup. Sebelum proses LCIA, pengguna harus membangun siklus hidup. Berdasarkan siklus hidup, pengguna menentukan *input* dan *output* material dan energi untuk setiap tahap; dan kemudian laporan keberlanjutan termasuk sumber daya dan emisi dihasilkan. Konstruksi grafis dari siklus hidup suatu produk adalah fitur unik bagi orang lain. Pemodelan siklus hidup di Gabi dengan cara yang sangat jelas untuk menggambarkan dan mewakili seluruh siklus hidup produk. Ini memiliki fungsi yang mirip dengan kerangka siklus hidup dan jaringan pembangkit yang digunakan di SimaPro.

Database Gabi telah banyak diterapkan di berbagai wilayah di Eropa. Ini dibuat oleh PE International dan mencakup lebih dari 4.500 profil inventaris siklus hidup. Ini berisi semua metodologi penilaian dampak utama, seperti: CML 2011, Eco-Indicator 99, EDIP 2003, Impact 2002+, ReCiPe, TRACI 2.0, USEtox. Sementara itu, pengguna dapat memodifikasi dan menambahkan elemen ke dalam database dan menerapkannya ketika siklus hidup baru akan dimodelkan. Hasilnya memberikan grafik data detail dan inventaris yang serupa dengan yang ada di SimaPro.

3.4. Open LCA

Open LCA adalah paket *freeware (open source)* dan perangkat lunak yang dikenal luas yang mudah ditangani dan memungkinkan pengguna untuk menghitung semua tahapan yang terkait dengan LCA. Keuntungan lain dari alat ini adalah menawarkan kemungkinan kepada pengguna untuk bekerja dengan database yang berbeda, seperti yang digunakan oleh GaBi, dan lainnya. Awalnya Open LCA dirancang untuk menghitung dampak lingkungan dari produk dan proses, tetapi sekarang dapat menambahkan aspek ekonomi.

Selain itu, ia memiliki pengenalan perangkat lunak yang kaya fitur dan mutakhir secara teknis. Ini juga memiliki pilihan terluas dari database LCI dan keberlanjutan yang relevan dan konsisten yang tersedia di seluruh dunia. OpenLCA telah dikembangkan oleh GreenDelta sejak tahun 2006 dengan dukungan PE International (pembuat GaBi), PRé Consultants (pembuat SimaPro) dan UNEP (Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa). OpenLCA tersedia pada tingkat yang berbeda, seperti proses, sistem produk, proyek, dan database metode dampak. Paket metode untuk penilaian dampak tersedia secara gratis, tetapi tidak disertakan secara default di openLCA. salah satu keunggulan OpenLCA adalah proses jaringan dan pemodelan grafis dapat dibuat secara otomatis dan manual.

Penulis mendapatkan hasil perbandingan pemodelan perangkat lunak LCA dengan menggunakan metode literatur. Perbandingan perangkat lunak dapat diperoleh dari Jurnal berjudul *Comparison of Different Life cycle Impact Assesstment Software Tools* (Ren & Su, 2014) meninjau perbedaan perangkat LCA berdasarkan pada enam aspek berikut:

- Definisi produk dan siklus terkait kemudahan dan akurasi perangkat dalam menentukan produk atau jasa yang akan dinilai.
- Metode LCA yang digunakan serta kemampuan pengguna dalam memilih metode sesuai dengan produk yang akan dinilai.
- Jangkauan serta juantitas database pada perangkat lunak.
- Ketersediaan dan modifikasi database untuk digunakan oleh pengguna.
- Bentuk atau layout tata letak grafis, dampak ekologis, hasil penilaian.
- Informasi detail hasil LCIA.

Tabel 2.

Hasil perbandingan perangkat lunak

Kriteria	GaBi	SIMAPRO
Definisi Produk (LCA)	☺☺☺☺	☺☺☺
Metode LCA	☺☺☺	☺☺☺☺
Database	☺☺☺	☺☺☺☺
Modifikasi dan ketersediaan database	☺☺☺	☺☺☺☺
Presentasi/Layout	☺☺	☺☺☺☺
Hasil detail	☺☺☺☺	☺☺☺☺

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Zhongmin dan Daizhong yang berjudul *Comparison of Different Life cycle Impact Assesstement Software Tools* menunjukkan bahwa Gabi dan Simapro memiliki keunggulan yang hampir sama disetiap aspek karena keduanya adalah perangat LCA yang paling detail dan banyak dikenal juga digunakan oleh pengguna. Berdasarkan *database*, GaBi dan Simapro

memiliki hasil yang lebih detail apabila dibandingkan perangkat lainnya. Meskipun memiliki nilai yang sama – sama bagus, terlihat Simapro memang lebih unggul, hal tersebut terlihat pada aspek presentasi yang mana Simapro menggunakan grafik dan inventory secara bersamaan dan lebih baik dibandingkan GaBi yang menggunakan fungsi *inventory* dan penyajian grafik secara terbatas.

Perbandingan perangkat lunak LCA juga dilakukan oleh Iswara et al (2020), yang berjudul *A comparison Study of Life Cycle Impact Assesstment using Different Software Programs* dengan menggunakan metode penilaian dampak titik tengah CML pada perangkat Simapro dan OpenLCA untuk menganalisa penilaian dampak karena metode tersebut disediakan secara global. Berikut merupakan hasil dari perbandingan kedua perangkat LCA (Iswara et al., 2020):

- Tampilan penilaian dampak: OpenLCA menyajikan hasil penilaian dampak dengan nilai numerik tertentu berdasarkan metode yang digunakan, sedangkan SimaPro tidak hanya memberikan nilai numerik tetapi juga hasil tambahan dengan grafik berwarna yang menunjukkan proses produksi dan nilai dampak. Grafik dampak berwarna di SimaPro memiliki satuan persentase sementara data mentah menyajikan konsentrasi dampak spesifik yang dapat menyesatkan pembaca untuk membuat kesimpulan yang salah tentang hasilnya. Persentase dalam grafik SimaPro dihitung berdasarkan total dampak dibandingkan dengan kategori dampak yang sama di setiap proses. Kedua program perangkat lunak tidak hanya memberikan hasil penilaian dampak tetapi juga menunjukkan kontributor dampak dan proses apa yang menghasilkan hasil.
- Karakterisasi dan normalisasi : Hasil penilaian dampak berbeda antara OpenLCA dan SimaPro meskipun kami menggunakan input variabel, *database*, dan metode yang sama. Ada banyak kemungkinan yang mungkin menyebabkan penyimpangan yang luas. Peneliti menjelaskan bahwa versi *database* yang digunakan berbeda antara OpenLCA dan SimaPro. Selain itu, meskipun metode analisisnya sama, ada kemungkinan bahwa faktor konversi dan karakterisasi berbeda yang belum dapat kami tentukan karena perhitungan program perangkat lunak dijalankan dalam sistem tertutup (*blackbox*).
- Kontribusi proses pada dampak: pada aspek ini dijelaskan bahwa terdapat hasil yang berbeda jauh antara Simapro dengan OpenLCA.

Penelitian (Iswara et al., 2020) dengan hasil diatas beberapa aspek menunjukkan perbedaan hasil yang cukup jauh. Mereka mengatakan bahwa perbedaan tersebut mungkin adanya terjadi dikarenakan pada saat proses penilaian menghilangkan beberapa faktor yang mungkin berpengaruh. Adanya perbedaan tersebut mereka berpendapat bahwa penilaian LCA pada perangkat lunak perlu untuk divalidasi lebih lanjut.

Selanjutnya, analisis perbandingan perangkat lunak LCA dilakukan oleh Ormazabal et al (2014), berjudul *Analysis and Comparison of Life Cycle Assesstment and Carbon Footprint Software* dengan menggunakan kriteria sebagai berikut:

Tabel 3.
 Perbandingan Pemodelan LCA

Aspek	GaBi	SimaPro	OpenLCA
Grafis	<i>Intuitive flowpath</i>	<i>Sankey diagram</i>	<i>Flowpath and Sankey diagram</i>
Analisis Ketidakpastian Perbandingan Hasil	Monte Carlo	Monte Carlo, others	Monte Carlo
Database	GaBi-4500, datasets, ecoin-vent, U.S. LCA (NREL)	EcoInvent, U.S. Input/output, U.S. LCI, Dutch Input/output, Swiss Input/output, LCA food, industry data v2, Japanese Input Output, IVAM	X
Pertukaran Informasi	Ya, antar <i>database</i> pengguna atau pengguna GaBi	Ya, antara SimaPro dan Pengguna EcoSpold	Ya, antara Ecospol atau ILCD
Laporan	Editor pribadi untuk pelaporan atau ekspor ke excel	Pelaporan grafis dari hasil atau ekspor ke excel	pelaporan grafis, tabel atau ekspor ke excel

Berdasarkan pada tabel hasil analisis Ormazabal et al (2014), pada aspek Grafis, GaBi merupakan perangkat yang memiliki grafis paling intuitif dan jelas untuk pemodelan. Aspek perbandingan hasil, OpenLCA memiliki perbandingan yang lebih mudah dan menawarkan lebih banyak hasil visual serta menunjukkan semua dampak. Terkait hasil yang dihasilkan akan berbeda sesuai dengan data yang digunakan dan juga definisi proses yang diinput dalam perangkat. Aspek laporan pada GaBi melangkah lebih jauh dan menawarkan editor teks dasar yang dibangun ke dalam alat itu sendiri, yang memungkinkan pengeditan dan penambahan tabel atau grafik, yang secara otomatis dimodifikasi jika inventaris berubah. Penelitian dengan judul *LCA Software Review Comparison of Currently Available European LCA Software* oleh Gareth, dkk (Rice et al., 1997) melakukan perbandingan software LCA dengan 12 spesifikasi diantaranya volume data, kesesuaian data, basis windows yang digunakan, kemampuan jaringan, penilaian dampak, dampak grafis, analisis grafik inventaris, analisis sensitive otomatis, bantuan secara online, *flowchart*, *input/output*, dan versi deo yang digunakan. Secara umum, fungsi dasar pada system LCA memiliki kesamaan.

Penelitian ini menyebutkan dimana letak perbedaan yang dapat kita temukan pada beberapa perangkat lunak LCA adalah metode, kecepatan, fleksibilitas, dan informasi yang digunakan di setiap perangkat atau *system*. Hal yang wajar apabila pada tahap pengembangan saat ini LCA digunakan sebagai alat manajemen lingkungan, sesuai dengan hasil penelitian Rice et al (1997), menyebutkan ada empat perangkat lunak yang paling utama dari beberapa perangkat lainnya, yaitu Model Boustead, TIM TM Ecobalance UK, SimaPro, dan PEMS.

3.5. Teknologi Energi

Pada penelitian yang dilakukan oleh Ghannadzadeh & Tarighaleslami (2020), dengan judul *Environmental life cycle assessment of glycerine production: Energy transition from natural gas to biomass* membahas Pentingnya permintaan energi dalam produksi gliserin telah membuat perlu untuk menemukan jalur produksi hemat energi di mana pasokan dan permintaan energi dipertimbangkan dengan cermat. Beberapa tahun terakhir telah disebut sebagai periode transisi energi, yang menunjukkan transisi berkelanjutan dari sumber energi berbasis fosil (misalnya gas alam) menuju sumber energi terbarukan (misalnya biomassa). Dalam hal ini, pembakaran biomassa terutama biomassa generasi kedua sebagai teknologi yang telah terbukti tampaknya merupakan alternatif yang paling mudah diakses, yang juga dapat diterapkan untuk meningkatkan nilai residu (misalnya residu lignoselulosa) dari teknologi baru dan yang sedang dikembangkan. Dalam konteks ini, salah satu tujuan dari penelitian ini adalah untuk fokus pada skenario transisi listrik (dari gas alam ke biomassa) untuk mengetahui seberapa besar beban lingkungan yang terkait dengan proses gliserin berbasis petro, dapat dikurangi tanpa perubahan di jantung teknologi proses (yaitu reaktor).

Sedangkan penelitian Khan et al (2021), menunjukkan bahwa dalam CLCA, cara pemodelan dampak lingkungan yang benar adalah dengan menggunakan data teknologi produksi marjinal untuk produk substitusi. Teknologi produksi marginal adalah teknologi yang diubah oleh perubahan kecil dalam permintaan. Ditemukan dari studi ini bahwa sejumlah besar substitusi panas dan listrik berdampak ketika limbah kayu dan plastik tidak dibakar tetapi digunakan untuk produksi palet WPC. Dalam hal ini, panas marginal dan listrik digunakan dalam pemodelan CLCA. Biomassa akan menjadi sumber produksi panas utama di Finlandia pada tahun 2030, dan tenaga angin dan surya akan menyediakan bagian listrik maksimum pada tahun 2030. Oleh karena itu, sumber panas berbasis biomassa dipilih sebagai sumber panas marginal dan angin, dan listrik yang bersumber dari tenaga surya dipilih sebagai sumber listrik marginal dalam pemodelan CLCA.

Berdasarkan kedua penelitian tersebut, perkembangan teknologi terkini telah fokus dalam memperhatikan penggunaan teknologi pada dampak lingkungan yang akan dihasilkan. Fokus tersebut juga membantu dan memberi dukungan dalam mewujudkan energi hijau yang dibuktikan dengan tujuannya pada transisi energi menuju energi hijau seperti produksi biomassa sebagai bentuk alternatif bahan bakar.

3.6. Perbandingan Teknologi Saat Ini dan Masa Depan

Berkaitan dengan lingkungan hidup, maka dalam proses pelaksanaan produksi energi baru terbarukan menggunakan teknologi yang dipilih diharuskan melakukan penilaian atau evaluasi untuk mengetahui seberapa besar potensi atau dampak yang dihasilkan pada suatu sistem produksi tersebut selama proses produksi berlangsung khususnya dampak terhadap lingkungan. Proses pengukuran dampak tersebut dapat dilakukan suatu perusahaan atau industri melalui pemodelan perangkat lunak salah satunya yaitu *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA sesuai dengan ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017 (KLHK, 2021) diartikan sebagai metodologi yang sistematis dan kuantitatif untuk menilai atau mengevaluasi untuk mengukur potensi dampak lingkungan dari suatu proses produksi yang dilakukan oleh suatu industri selama proses produksi tersebut berlangsung. Dengan dukungan setiap proses transisi energi dalam mendukung energi hijau untuk tetap menjaga kelestarian lingkungan menggunakan teknologi energi dapat dilakukan dengan efektif dan efisien

karena dilakukan pengukuran dampak terhadap lingkungan melalui perangkat lunak LCA sehingga diketahui apakah sistem produksi tersebut layak atau tidak untuk digunakan.

Pada kedua penelitian yang dilakukan oleh (Ghannadzadeh & Tarighaleslami, 2020; Khan et al., 2021) perbandingan teknologi yang ada saat ini dan dimasa yang akan datang ialah ada pada fokus penggunaan teknologi tersebut selama produksi pada analisis hasil yang diperoleh terkait dengan dampak terhadap lingkungan. Hal tersebut dikarenakan adanya kebijakan dan perjanjian bersama antar negara yang berkomitmen terhadap penurunan emisi yang dikenal dengan *Net Zero Emission*. Saat ini masih dalam tahap perkembangan transisi yang mana berarti secara bertahap. Untuk kedepannya dalam perkembangan teknologi diharapkan terealisasi secara total sehingga tujuan penurunan emisi juga akan tercapai sehingga pelestarian alam juga akan semakin lebih terjaga (Rice et al., 1997).

4. Kesimpulan

Analisis dampak lingkungan saat ini dapat dilakukan dengan lebih mudah menggunakan metode LCA. Berbagai jenis perangkat lunak pemodelan LCA yang dapat digunakan oleh tiap industri. Tentunya masing – masing perangkat memiliki kelebihan dan kekurangannya. Metode LCA memberikan hasil analisis dampak lingkungan secara kuantitatif sehingga memudahkan dalam membaca hasil yang didapat. Perbedaan berbagai faktor seperti jenis metode, proses, bahan mentah, lingkungan, dan sebagainya dapat mempengaruhi hasil analisis. Oleh sebab itu setiap industri diharuskan mengenali produksinya dan memilih metode LCA yang sesuai dengan produksinya agar tidak ada perbedaan atau ketimpangan pada hasil yang diperoleh. Rekomendasi jenis perangkat lunak yang sering digunakan banyak kalangan ialah SimaPro, GaBi, dan OpenLCA.

Daftar Pustaka

- Agus, P. T., & Julius, C. A. (2019). Laporan Status Energi Bersih Indonesia. www.iesr.or.id
- Dirjen Migas, E. (2021, November 3). COP ke-26, Menteri ESDM Sampaikan Komitmen Indonesia Capai Net Zero Emission | Situs Ditjen Migas. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. <https://migas.esdm.go.id/post/read/cop-ke-26-menteri-esdm-sampaikan-komitmen-indonesia-capai-net-zero-emission>
- Energy Agency, I. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. www.iea.org/t&c/
- Faradiba, N. (2021, August 29). Sumber Daya Alam: Pengertian, Jenis, Manfaat, dan Contohnya. Kompas.Com. <https://www.kompas.com/sains/read/2021/08/29/110100523/sumber-daya-alam--pengertian-jenis-manfaat-dan-contohnya>
- Ghannadzadeh, A., & Tarighaleslami, A. H. (2020). *Environmental life cycle assessment of glycerine production: Energy transition from natural gas to biomass*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100775. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2020.100775>
- Iswara, A. P., Farahdiba, A. U., Nadhifatin, E. N., Pirade, F., Andhikaputra, G., Muflihah, I., & Boedisantoso, R. (2020). *A Comparative Study of Life Cycle Impact Assessment using Different Software Programs*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 506(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012002>
- Jayanto, S., Zid, M., & Dewi, Y. S. (2018). HUBUNGAN ANTARA TANGGUNG JAWAB DAN KOMITMEN DENGAN KEPEMIMPINAN LINGKUNGAN DALAM PENERAPAN

PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN. *Jurnal Green Growth Dan Manajemen Lingkungan*, 7(2), 133–147. <https://doi.org/10.21009/jgg.072.04>

Khan, M. M. H., Deviatkin, I., Havukainen, J., & Horttanainen, M. (2021). *Environmental impacts of wooden, plastic, and wood-polymer composite pallet: a life cycle assessment approach*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1607–1622. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01953-7>

KLHK. (2021). PEDOMAN PENYUSUNAN LAPORAN PENILAIAN DAUR HIDUP (LCA).

Mansur, D., Tago, T., Masuda, T., & Abimanyu, H. (2014). *Conversion of cacao pod husks by pyrolysis and catalytic reaction to produce useful chemicals*. *Biomass and Bioenergy*, 66, 275–285. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2014.03.065>

Musri. (2021). MEMPERKUAT PERAN DEWAN ENERGI NASIONAL BAGIKETAHANAN, KEMANDIRIAN, DAN KEDAULATAN ENERGI NASIONAL. www.den.go.id

Ormazabal, M., Jaca, C., & Puga-Leal, R. (2014). *Analysis and comparison of life cycle assessment and carbon footprint software*. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 281, 1521–1530. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55122-2_131

Permen Republik Indonesia. (2014). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. <https://jdih.esdm.go.id/peraturan/PP%20No.%2079%20Thn%202014.pdf>

Ren, Z., & Su, D. (2014). *Comparison of different life cycle impact assessment software tools*. *Key Engineering Materials*, 572(1), 44–49. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.572.44>

Rice, G. , Clift, R. , & Burns, R. (1997). *LCA Software European LCA Software LCA Software LCA Software Review LCA Software*. <https://doi.org/10.1007/BF02978725>