

DESAIN DAN APLIKASI MODEL PENDUGAAN BEBAN LINGKUNGAN INDUSTRI GULA KRISTAL PUTIH MENGUNAKAN METODA LIFE CYCLE ASSESSMENT

Hermawan ^{(1)*}, Yulian Syahputri ⁽²⁾, Adriana Sari Aryani⁽¹⁾, Sawarni Hasibuan ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Program Studi Ilmu Komputer, Universitas Pakuan Bogor
Jl. Pakuan Ciheuleut Bogor

⁽²⁾ Program Studi Kimia, Universitas Pakuan Bogor
Jl. Pakuan Ciheuleut Bogor

⁽³⁾ Magister Teknik Industri, Universitas Mercubuana Jakarta,
Jl. Meruya Ilir Jakarta Barat

e-mail: Hermawan.taher@unpak.ac.id

Abstrak

Life Cycle Assessment (LCA) dipergunakan untuk menilai dampak lingkungan yang secara potensial ditimbulkan dari aktifitas industri, dengan konsep dari muasal hingga musnah. Penilaian LCA sesuai dengan prinsip ISO 14040 terdiri dari penetapan ruang lingkup, pengumpulan data, penyusunan Life Cycle Inventory (LCI), perumusan Life Cycle Impact Assessment (LCIA), Interpretasi dan penyajian. Model LCA yang dirancang untuk prototype aplikasi komputer, merupakan kombinasi besaran Environmental Burden (EB) suatu substansi dengan LCIA Convert Matrix. Prototype Aplikasi LCA telah diuji coba pada salah satu industri gula kristal putih dengan menggunakan data tahun 2017, 2018, dan 2019. Output prototype aplikasi LCA menghasilkan karakterisasi dampak lingkungan yakni Energy Depletion Potential (EDP), pemanasan global (GWP), ecotoxicity aquatic (ETA), ecotoxicity terrestrial (ETT), Abiotic Depletion Potential (ADP), Photochemical Oxydant Formation (POF), Acidification Potential (ACP), Human Toxicity Potential (HTP), Nutrification Potential (NTP), Ozone Depletion Potential (ODP). Kontribusi empat terbesar terhadap beban lingkungan dari pabrik gula responden berdasarkan data tahun 2019 adalah GWP 375.966,95 Ton setara CO₂, disusul ACP 89.183,03 Ton setara NO_x, EDP senilai 33.086,91 Ton setara bahan bakar minyak, dan NTP 14.598,66 Ton setara COD. Selain itu, perlu juga mendapat perhatian adalah HTP 11.621,83 Ton setara fenol, ETA 11,163.18 Ton setara BOD₅, serta ETT 9,748.49 Ton setara abu.

Kata kunci: Life Cycle Assessment (LCA), Aplikasi komputer LCA, Pabrik Gula Kristal Putih, Standar ISO 14040.

1. PENDAHULUAN

Produksi gula nasional dinilai belum mampu memenuhi kebutuhan dalam negeri. Produksi nasional hanya mencapai 2,1 juta ton per tahun, sementara kebutuhan akan gula konsumsi dan rafinasi mencapai 6,8 juta ton (PBS, 2019). Menurunnya produksi gula nasional disebabkan rendahnya produktivitas 48 pabrik gula milik pemerintah dan 17 milik swasta serta semakin menurunnya jumlah lahan perkebunan tebu nasional. Oleh karena itu, pemerintah dan swasta diharapkan melakukan revitalisasi pabrik gula, menambah jumlah lahan tebu serta meningkatkan program kemitraan dengan petani tebu rakyat.

Saat ini sekitar 78,7 persen pabrik gula berada di Pulau Jawa, sehingga mulai terasa perebutan lahan pabrik dengan pemukiman penduduk. Permasalahan terkait dengan pencemaran lingkungan mulai dikeluhkan oleh sejumlah masyarakat. Beban lingkungan yang tinggi, telah dikontribusi oleh industri gula tersebut.

Produksi gula di suatu pabrik pada saat musim giling dapat mencapai angka 550 ton dengan produksi sekitar 80 ton setiap harinya. Hasil proses produksi Pabrik Gula akan menghasilkan limbah padat, limbah cair dan limbah gas atau asap. Limbah padat dihasilkan dari ampas tebu, pasir atau lumpur, abu ketel uap, debu ketel uap dan blothong. Limbah cair yang dihasilkan sebanyak 1-2 m/ton tebu yang berasal dari proses mencuci dan memasak yang menghasilkan keasaman dengan kandungan garam yang tinggi, bocoran minyak pelumas dan limbah soda. Sedangkan limbah gas atau asap dihasilkan dari proses produksi gula yang menimbulkan bau menyengat dan belerang. Analisis kerugian lingkungan tersebut dapat dilakukan menggunakan

pendekatan Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment-LCA).

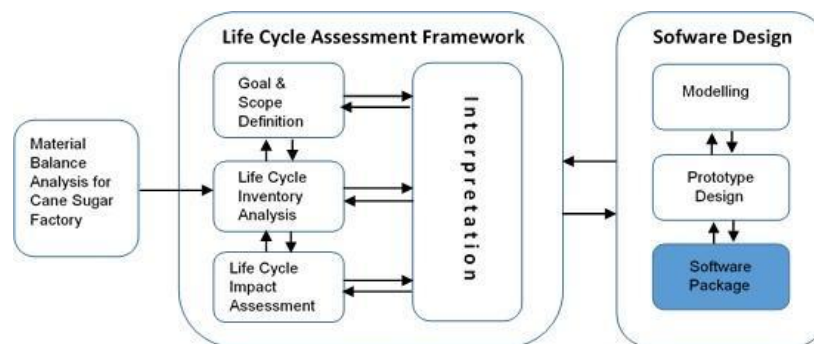
Pada LCA umumnya sangat banyak data yang diolah dan dikonversi untuk penilaian dampak lingkungannya sehingga memerlukan waktu apabila dihitung secara manual. Menurut Chaerul dan Alia (2020) setidaknya 58,80% menggunakan perangkat lunak komersial, 35,20% menggunakan perangkat lunak non komersial, dan baru 5,80% yang menggunakan perangkat lunak hasil pengembangan sendiri. Penelitian pengembangan perangkat lunak LCA yang berhubungan dengan industri gula masih sangat sedikit. Astuti (2019) menggunakan software OpenLCA yang dikembangkan Gmbh perusahaan software Jerman, untuk analisis hanya pada budidaya perkebunan tebu. Rosmeika et al (2010) mengembangkan perangkat lunak menggunakan Visual Basic 6, tetapi hanya khusus untuk LCA pada pembangkit energi Boiler pabrik gula berbahan bakar bagas.

Penelitian pengembangan model LCA untuk berbagai aspek lingkungan di pabrik gula masih terbuka untuk dilanjutkan. Penelitian ini sendiri mencoba memperhitungkan aspek energi, emisi ke udara, limbah cair, dan limbah padat dari pabrik gula di Indoensia.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Kerangka Pemikiran

Desain penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif, dengan memasukkan model-model perhitungan dampak lingkungan dari sejumlah bahan kimia yang teridentifikasi pada aktifitas suatu industry. Teknik untuk memeriksa aspek lingkungan dan dampak potensial dari produk melalui LCA, dari muasal hingga musnah. Telah dikembangkan oleh ISO melalui standar ISO 14040. Untuk penerapan LCA langsung pada produk, menggunakan panduan ISO 14045:2012 (Hasibuan dan Hermawan, 2017). Rancangan penelitian menggunakan metoda LCA disajikan pada Gambar 1.

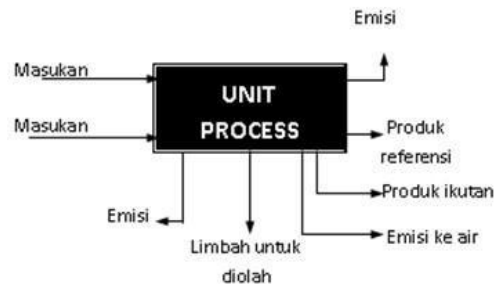


Gambar 1. Kerangka kerja pengembangan perangkat lunak Life Cycle Assessment ISO 14040 industri gula

2.2 Teknik Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data Primer diperoleh melalui hasil pengujian langsung emisi industri, terdiri dari emisi ke udara, emisi ke tanah, dan ke badan air. Data produksi industri diperlukan untuk menduga besaran beban lingkungan yang dikeluarkan oleh aktifitas pabrik. Sedapat mungkin diperoleh data pengukuran mutakhir sehingga menggambarkan kondisi industri terbaru.

Langkah selanjutnya adalah analisis masing-masing unit proses dengan menggunakan pendekatan Dokumen normatif N16 yang dirumuskan Sub Comitte 5 TC 207 menggambarkan contoh deskripsi unit proses sebagaimana Gambar 2.



Gambar 2. Contoh uraian satuan proses (ISO/TC 207/SC 5/WG 3:1997) (Hasibuan dan Hermawan, 2017)

2.3 Teknik Analisis Data

Beberapa metoda analisis data dipergunakan untuk memperoleh informasi mengenai beban lingkungan. Informasi tersebut merupakan bahan keputusan yang dapat diinterpretasikan untuk menggambarkan kondisi beban lingkungan yang ditimbulkan oleh suatu pabrik gula. Beberapa metoda analisa data yang dipergunakan diperlihatkan pada Tabel 1.

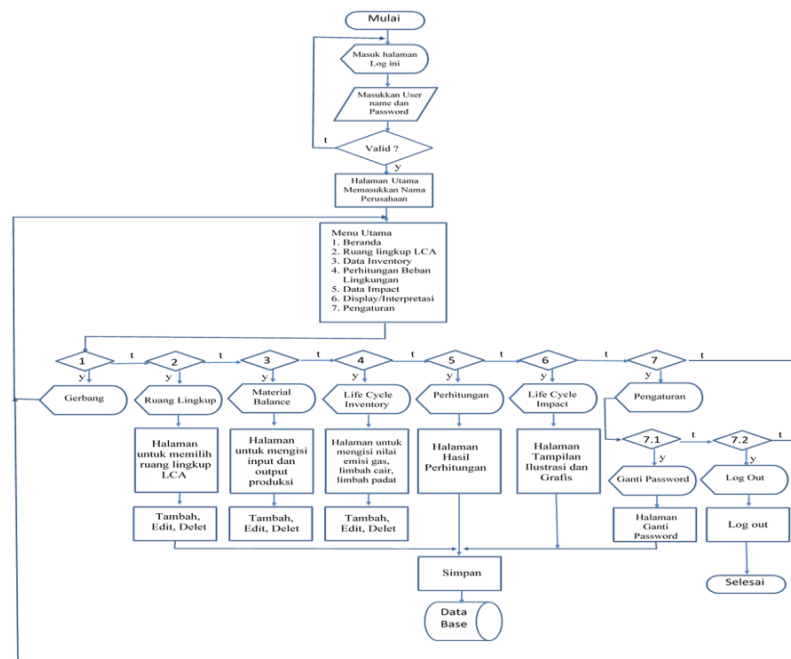
Tabel 1. Beberapa tahapan analisa dan pengumpulan data penelitian

Tujuan	Metoda dan analisis	Sumber data	Output/ Keluaran
Mengidentifikasi beban lingkungan dari aktifitas produksi	<ul style="list-style-type: none"> • Studi Pustaka • Analisis produksi • Material-balance Analysis (ISO/TC 207/SC 5/WG 3, 1997) 	<ul style="list-style-type: none"> • Data primer dan sekunder • Data industri • Data Asosiasi • Data Rujukan (benchmark) tertentu 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Production Rates</i> • Material balance sheet • Inventory Environmental Data
Menghitung beban lingkungan	<ul style="list-style-type: none"> • Pendekatan Stochiometri • Konversi kimia lingkungan 	<ul style="list-style-type: none"> • Data bahan kimia limbah 	<ul style="list-style-type: none"> • Besaran beban lingkungan
Interpretasi LCA	<ul style="list-style-type: none"> • Valuasi UNEP (1996); EDIP (2003) 	<ul style="list-style-type: none"> • Besaran Beban Lingkungan 	<ul style="list-style-type: none"> • Informasi kondisi lingkungan Industri
Software Design	<ul style="list-style-type: none"> • Mathematical Modelling • Prototype Design 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemical substances • LCA Analysis 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemical substances conversion • Prototype

2.4 Tahap Disain *Prototype* Sistem

Perancangan aplikasi sistem dalam penelitian disiapkan untuk berbasis web adalah menggunakan Software Project Development Life Cycle. Pembangunan aplikasi dilakukan melalui 2 tahap yaitu implementasi basis data menggunakan Mysql dan implementasi sistem menggunakan Sublime Text 3. Rancangan prototype system ini sendiri mengikuti diagram alir

pada Gambar 3.

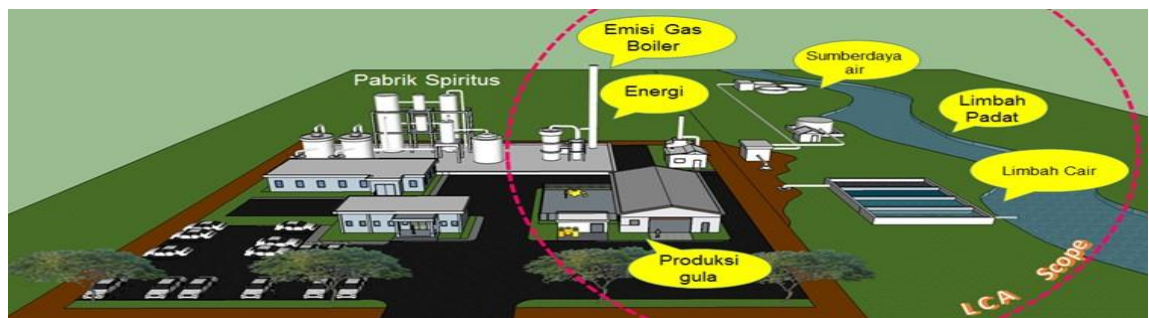


Gambar 3. Rancangan diagram alir prototype aplikasi LCA

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penetapan Ruang Lingkup

Sekalipun konsep LCA adalah dari muasal hingga musnah (from cradle to grave), namun dapat dilakukan sesuai dengan ruang lingkup tertentu dalam suatu sistem manufaktur. Dalam kasus di pabrik gula, ruang lingkup kajian LCA dibatasi pada pabrik gula saja, walaupun ada aktifitas perkebunan tebu dan kemungkinan pabrik Ethanol. Secara diagramatik ruang lingkup kajian disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ruang lingkup kajian LCA di pabrik gula

3.2 Neraca Massa Pabrik Gula

Neraca massa diperlukan untuk mengidentifikasi konversi tebu menjadi produk gula kristal putih di pabrik gula. Bahan yang tidak terkonversi menjadi gula kristal putih, lebih lanjut diinventarisasi proporsinya yang menjadi limbah dan terbuang ke lingkungan. Secara keseluruhan sejak panen tebu, setidaknya ada 69% merupakan limbah.

Stasiun giling adalah istilah yang dipergunakan untuk menggambarkan unit proses penggilingan

tebu menjadi Nira. Dari proses tersebut akan dihasilkan nira sebagai produk, selanjutnya nira dikristalkan menjadi kristal kasar gula. Limbahnya adalah bagass, air sisa imbibisi, blotong dan mungkin kotoran yang menyertai tebu saat masuk.

Air yang dipergunakan dalam penggilingan antara 25-30% dari tebu, dengan efisiensi penggilingan diperhitungkan 95% sukrosa terekstrak menjadi juice. Bagas akhir dari stasiun terakhir mengandung sukrosa tak terekstrak, serat kayu dan mengandung setidaknya 55% air. Stasiun Pemurnian adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan proses pemurnian kristal gula yang dikeringkan menjadi gula kristal putih. Selanjutnya dikemas sebagai produk.

Limbah utama yang dihasilkan dari proses ini atau kadang disebut juga sebagai produk samping adalah tetes. Pada beberapa pabrik gula yang memiliki pabrik etanol, tetes dijadikan sebagai bahan baku produksi alkohol/spiritus.

Kehilangan gula selama pasca panen hingga sebelum giling sekitar 5-25%, dan bila sudah sangat rusak maka tebu tidak dapat lagi dibuat gula. Indikator kerusakan yang dapat diperhatikan adalah gula pereduksi, normalnya 3-5%.

Apabila tebu banyak seratnya maka kehilangan dalam ampas akan lebih besar lagi, dengan demikian menyebabkan penurunan ekstraksi gilingan. Kehilangan dalam ampas cukup besar dapat mencapai 28-35%.

Kehilangan mekanis adalah hilangnya gula bersama blotong. Pada proses vacuum filter sulfitasi kehilangan sebaiknya <1%, sementara untuk proses karbonatasi kehilangan antara 2-3%. Reaksi yang tidak optimal dan kotoran tebu yang ikut tergiling terutama tanah mengakibatkan blotong bertambah dan kehilangan dalam blotong meningkat. Kehilangan mekanis selanjutnya adalah kehilangan akibat kebocoran peralatan atau muncrat ke kondensor atau cara-cara lain melalui bocoran pompa-pompa. Kehilangan mekanis juga acapkali terjadi pada mesin-mesin yang telah menua (Subiyanto, 2014).

Secara ringkas, data keseimbangan bahan pada produksi suatu pabrik gula skala menengah berdasarkan data Tahun 2019 disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Neraca bahan pada produksi gula salah satu pabrik gula di Indonesia

Data	Input	Output
Tebu	338,291.2	
Air imbibisi	96,370.4	
Air non imbibisi	4,722,149.6	
Kapur Tohor	457.1	
Flokulan	1,787.5	
Bagasse		98,928.9
Blotong		10,990.8
Air diuapkan		232,935.7
Molasses		16,624.0
Gula		31.400.0
Air limbah		105,183.0
Losses		11,551.7
Air tersirkulasi		4,651,441.7
Jumlah	5,159,055.8	5,159,055.8

Data Perusahaan Tahun 2019, diolah dalam Ton

3.3 Life Cycle Inventory

Nilai rata-rata produksi energi per tahun diperoleh dari rata-rata energi uap panas (steam) yang dihasilkan dari stasiun ketel/Boiler. Minyak diesel digunakan sebagai bahan bakar ketel pada

saat: *proof stoom* (percobaan/ pemanasan ketel) sebelum dilakukan penggilingan, penggilingan awal dimana ampas belum dihasilkan, tekanan ketel uap turun sebagai pemancing agar tekanan kembali ke tekanan yang diinginkan, dan *afwerken* (penyelesaian). Kayu bakar digunakan sebagai bahan bakar ketel pada saat *proof stoom* (percobaan/pemanasan ketel), *afwerken* (penyelesaian), dan produksi ampas tidak memenuhi kapasitas bahan bakar ketel uap (terjadi suplesi).

Menurut Skone (2013), secara keseluruhan proses, ampas tebu merupakan bahan bakar utama ketel uap. Rata-rata produksi uap yang dihasilkan ketel per tahun pada pabrik gula skalamenengah adalah sebesar 381.885,98 GJ aau setara dengan daya listrik per tahun 47.482.606,06 kWh (Rosmeika et al., 2010).

Rhofita dan Russo (2019) jumlah rata-rata limbah cair yang dihasilkan per ton produksi gula oleh industri gula sebesar 0,15 m³. Pada tahun 2019 limbah cair pabrik yang diteliti diperhitungkan sebesar 31,400 m³ atau 31,400,000 liter. Hampannavar dan Shivayogimath (2010) menjelaskan bahwa secara umum karakteristik limbah cair yang dihasilkan oleh industri gula memiliki nilai pH antara 5,2-6,5, COD antara 1.000-4.340 mg/L, BOD antara 350-2.750 mg/L dan TSS antara 760-800 mg/L, (15). Limbah tersebut selanjutnya diolah terlebih dahulu menggunakan Instalasi Pengolah Air Limbah (IPAL) untuk menurunkan beberapa tolok ukur agar memenuhi baku mutu lingkungan (Ummah dan Hidayah, 2018).

Blotong atau disebut filter cake atau filter press mud adalah limbah industri yang dihasilkan oleh pabrik gula dari proses klarifikasi nira tebu. Penumpukan bahan tersebut dalam jumlah besar akan menjadi salah satu sumber pencemaran lingkungan. Menurut Muchsin (2011), blotong mengandung bahan koloid organik yang terdispersi dalam nira tebu dan bercampur dengan anion-anion organik maupun anorganik.

Persoalan lingkungan yang timbul dari sistem tenaga yang menggunakan bahan bakar biomassa padat adalah limbah abu, bahkan emisinya acapkali menyebabkan pencemaran udara lingkungan sekitarnya. Secara teoritik, kadar abu rata-rata dari Bagas adalah 3.82% dan kayu 5.35%, maka potensi limbah padat debu dari kegiatan suatu pabrik gula dapat diperkirakan.

Life cycle inventory (LCI) adalah tahapan mendaftar semua kemungkinan aspek lingkungan yang dapat menimbulkan dampak lingkungan. Aspek tersebut dapat berupa produk, aktifitas, ataupun layanan yang dilakukan oleh pabrik gula Sesuai dengan ruang lingkup LCA yang telah dirumuskan sebelumnya, maka dilakukan inventarisasi pada aspek penggunaan energi, emisi gas pembangkit tenaga, effluen limbah cair dan limbah padat. Analisis dilakukan untuk data tahun 2019 sebagaimana diringkas pada Tabel 3.

Tabel 3. Life Cycle Inventory pabrik gula skala menengah

Aspek Lingkungan	Satuan	Nilai Per Tahun	Keterangan
SUMBER ENERSI			
Listrik PLN	KWatt	960.000	Masa maintenance
Turbin Generator	KWatt	47.482.606,06	
EMISI KE UDARA			
CO ₂	Ton	131,453.25	
Partikel	Ton	70	
NO ₂	Ton	567.93	
SO ₂	Ton	132.72	
Freon R22	kg	5.6	AC Kantor
Asetilin	ton	0.08	Masa maintenance
EMISI KE AIR			
BOD ₅	ton	735.07	
COD	ton	3,012.20	
Total Suspended Solid	ton	592.88	
Fosfat	ton	376.8	

Sulfida	ton	15.7	
Biosida	kg	340	
Minyak Mineral	ton	46.47	
Klorin Bebas	ton	37,523	
LIMBAH PADAT			
Bagass Sisa	Ton	122,345.66	
Kertas/Karton	Ton	1.75	Kantor
Plastik	Ton	0.09	
Karet	Ton	0.16	Masa maintenance
Tekstil	Ton	0.11	Masa maintenance
Abu dan Kerak	Ton	3823.41	
Logam	Ton	1.5	Masa maintenance
Blotong	Ton	10,990.8	

Pada pabrik gula, selama masa tanam sekitar lima-enam bulan, umumnya dimanfaatkan untuk perawatan mesin produksi. Periode tersebut disebut sebagai masa maintenance. Sejumlah barang kebutuhan pabrik pada, termasuk kebutuhan masa maintenance, didaftar pada penelitian Rahmawati et al (2017) Khusus untuk suku cadang yang dipergunakan, ditemukan pada penelitian Trisnawati et al (2016). Pada masa maintenance, listrik yang dipergunakan umumnya adalah sumber PLN atau generator berbahan bakar minyak diesel.

3.4 Life Cycle Inventory

Life Cycle Impact Assesment (LCIA) adalah tahap penilaian dampak lingkungan yang disebabkan oleh LCI. Pada tahap ini, diperlukan banyak informasi terkait karakteristik pengaruh lingkungan dari substansi yang dilepaskan pabrik. Penelitian karakteristik beban lingkungan suatu substansi terus dilakukan sering dengan aktifitas peradaban manusia, sehingga kajian LCIA sebenarnya sangat dinamis.

Asiditas

Gas-gas bersifat asam akan menyebabkan penumpukan kelompok asam pada permukaan bumi, acap kali dirujukkan kepada hujan asam. Beban Lingkungan gas asam (BLgas asam) dari suatu substansi dihitung melalui pengalihan beban bahan yang dibuang ton/tahun dengan Faktor gas asam SO₂ (Hischier and Bo Weidema, 2010).Pembuangan substansi asam ke air dapat mengarah kepada penurunan pH yang membahayakan kehidupan flora dan fauna. Pengaruh setempat dari pembuangan asam ke air dapat dibandingkan berdasarkan keasamannya, misalnya melalui ion H⁺ yang dilepaskan. BLasidity adalah jumlah ion H⁺ yang dilepaskan dalam satuan ton per tahun. Fosfat dan sulfida yang ditemukan pada limbah cair pabrik gula, diperhitungkan sebagai pemasok asam ke dalam perairan.

Pemanasan Global

Pemanasan global yang terjadi saat ini akan membahayakan perubahan musim dan kondisi habitat. Pemanasan global dari buangan gas dapat dikalkulasi berbasiskan massa emisi dan potensi pemanasan global relatif terhadap karbon dioksida. Salah satu rumus yang biasa dipakai adalah gabungan factor 100 year Integrated Time Horizon. Indeks BLGWP untuk suatu substansi ton/tahun yang dilepaskan ke udara dikalikan dengan GWP. Satuannya akan senilai dengan setara CO₂ per tahun (Gunawan et al., 2019).

Pengaruh Kesehatan Manusia

Faktor untuk kategori pengaruh pada kesehatan, diturunkan dari Occupational Exposure Limit (OEL). Penggunaan indeks OEL dimungkinkan sebagai dasar karena mewakili suatu batas penerimaan keterpaan. Nilai OEL dikalikan dengan factor potensi. Faktor potensi dibagi dengan factor untuk benzena yang dibandingkan dengan benzena standar penyebab karsinogenik. Nilai BLkarsinogen dari suatu bahan didefinisikan sebagai pelepasan bahan ton per tahun dikalikan dengan factor relatif terhadap benzena.

Penipisan Ozon

Penipisan ozon di lapisan teratas atmosfer dapat meningkatkan intensitas radiasi ultra violet ke permukaan bumi, sehingga akan mempengaruhi kesehatan manusia dan dampak lingkungan lainnya. Substansi penipis ozon dapat dibandingkan berdasarkan indeks Ozone Depletion Potential (ODP) yang merupakan sejumlah bahan kimia penting, secara teoritik dapat berkurang pada lapisan atas atmosfer, dihitung relatif terhadap Klorofluorokarbon-11. Indeks BLODP untuk substansi kimia adalah jumlah bahan yang dilepas ton per tahun dikalikan dengan ODP. Satuannya adalah setara CFC-11 ton per tahun. Pada kasus pabrik gula penggunaan freon pada pendingin ruangan diperhitungkan sebagai sumber penyumbang gas ODP.

Pembentuk Fotokimia Ozon

Batas bawah ozon adalah precursor dari ozon troposfer. Pembentukan ozon dipengaruhi oleh permasalahan pernafasan dan kerusakan lingkungan tanaman. Pelepasan bahan organik volatil dapat dibandingkan berdasarkan potensi pembentukan fotokimia ozon (POF) relatif terhadap etilen. Indeks BLPOF untuk substansi adalah hasil perkalian bahan yang dilepaskan ton pertahun dikalikan dengan POF. Satuannya adalah setara etilen ton per tahun. Analisa yang dilakukan di pabrik gula, emisi gas NO₂, SO₂, dan penggunaan plastik secara bersamaan dikalkulasi sebagai sumber potensial penghasil indeks POF, secara keseluruhan dikonversikan setara dengan etilen.

Akuatik Ekotoksisitas

Pembuangan substansi ke lingkungan perairan dapat mempengaruhi flora dan fauna akuatik. Manakala substansi terukur dalam lingkungan perairan, umumnya akan dihitung sebagai konsentrasi dalam media air yang diterima. Salah satu satuan yang dapat dipergunakan misalnya mikrogram per liter air ($\mu\text{g/l}$). Buangan ke perairan dari substansi ekotoksik dapat dibandingkan berdasarkan berapa banyak air yang diperlukan untuk melarutkannya sebelum mencapai konsentrasi yang dipersyaratkan standar. Beberapa bahan toksik memiliki sejumlah jenjang konsentrasi, namun banyak pula yang teridentifikasi secara khusus tetap jumlahnya dalam air. Pada analisis air limbah pabrik gula, data logam memang tidak spesifik disebutkan jenisnya. Untuk keperluan analisis LCA ini, data logam tersebut disetarakan dengan besi, mengingat besarnya potensi korosif yang terjadi pada mesin pabrik yang masuk ke dalam air limbah industri.

3.5 Permodelan

Mengkonversikan LCI menjadi LCIA memerlukan sejumlah model matematika yang sangat khusus, bergantung pada dampak lingkungan yang mungkin ditimbulkan. Suatu substansi kimia berpeluang untuk menimbulkan dampak lingkungan berganda, sehingga dalam permodelan tetapi diperhitungkan secara terpisah.

Konversi LCI menuju LCIA pada penelitian ini disusun dalam suatu matriks. Pada kolom matriks tersebut merupakan jenis karakter dampak lingkungan yang menjadi tolok ukur pengaruh beban lingkungan terdiri dari Abiotic Depletion Potential (ADP), Energy Depletion Potential (EDP), GWP, POF, Acidification Potential (ACP), Human Toxicity Potential (HTP), Ecotoxicity Aquatic (ETA), Ecotoxicity Terrestrial (ETT), Nutrifcation Potential (NTP), dan ODP. Ukuran baris dari matrik LCIA Convert, disesuaikan banyaknya dengan data LCI yang terkumpul.

Operasi selanjutnya adalah perhitungan beban lingkungan setiap substansi dalam LCI menggunakan persamaan

$$EB_{\text{substansi}} = LCI_{\text{substansi}} \times LCIA \text{ Convert} \quad (1)$$

Penetapan besaran LCIA untuk setiap dampak lingkungan menggunakan persamaan,

$$LCI_{\text{Aspesific}} = \sum EB_{\text{substansi } k} \quad (2)$$

Di mana k = adalah substansi LCI {1,2,...n}

3.6 Prototype Aplikasi

Prototype aplikasi LCA (Protype LCA) disederhanakan agar memudahkan pengguna untuk memasukkan data kondisi lapang industry dengan tampilan muka sebagaimana Gambar 5. Feature yang disiapkan sebenarnya bersifat umum untuk semua jenis industri manufaktur. Data yang diinput terdiri dari penggunaan energy (semua jenis energy), data pengukuran emisi gas buang ke udara, data substansi pada limbah cair, dan data sampah ataupun limbah padat.

Pengguna juga dapat memilih ruang lingkup area analisis yang disediakan yakni unit penyediaan bahan baku, unit produksi, unit pembangkit uap, unit pembangkit listrik, unit transportasi, dan pilihan lainnya. Pada kasus pabrik gula, pilihan lain diisi dengan kegiatan maintenance dan persiapan pabrik selama musim tanam.



Gambar 5 . Tampilan halaman pembuka Prototype LCA

Hasil pengolahan tahap awal yakni pendaftaran LCI, diolah dari input data lapang, selanjutnya disajikan sebagai LCI Environment Aspect Tables (Gambar 6). Hasil analisis yang disajikan adalah dalam besaran per satuan produk untuk memudahkan proses lanjut pada penentuan LCIA. Pengguna dapat melakukan pengecekan ulang sebelum dilakukan analisis lanjut.

LIFE CYCLE INVENTORY ENVIRONMENT ASPECTS TABLE

PERIODS: 2017 To 2019
 TYPE OF INDUSTRY: CANE SUGAR
 FACTORY: SUGAR INDUSTRY
 SCOPE OF LCA: Raw Material, Production, Steam Production, Transportation, Other

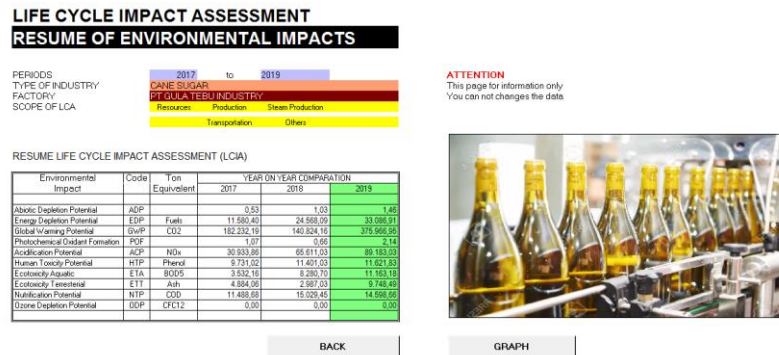
ATTENTIONS: This page for information only. You can not change the contents.

Buttons: Back, Resume LCA

Per Unit Product	kg	CANE SUGAR	Inventory	Data
Environmental Aspects	Unit	2017	2018	2019
ENERGY RESOURCES	Substansi	0,0000	0,0000	0,0000
EMISSION TO AIR				
CO2	kg	7,8242	2,4920	16,8747
CO	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Hydrocarbon	kg	0,0000	0,0000	0,0000
PM10	kg	0,0000	0,0000	0,0000
NOx	kg	0,0000	0,0000	0,0000
SOx	kg	0,0000	0,0000	0,0000
CFECL2	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Aerobik	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Aerobik	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Volatle Organic Compound	kg	0,0000	0,0000	0,0000
RELEASE TO WATER				
Biochemical Oxygen Demand (BOD5)	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Chemical Oxygen Demand (COD)	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Total Suspended Solid	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Phenol	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Amonia (as N)	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Phosphat	kg	0,0000	0,0000	0,0000
Protein	kg	0,0000	0,0000	0,0000

Gambar 6. Tampilan output LCI

Perhitungan berikutnya adalah penentuan LCIA dari hasil pengolahan LCI. Hasil pengolahan data LCIA telah dihitung sesuai dengan volume produksi pabrik, tampilannya disajikan pada Gambar 7.

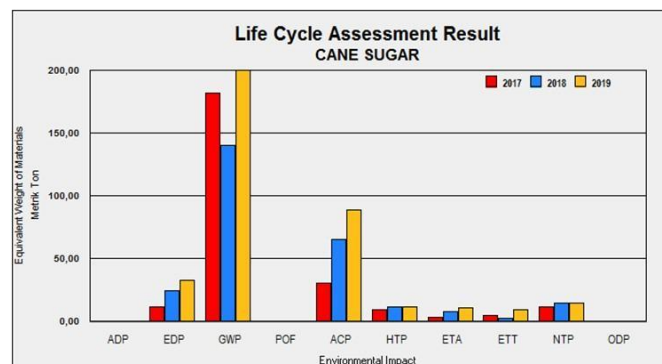


Gambar 7. Tampilan hasil LCIA

3.7 Interpretasi dan Penyajian

Interpretasi dan penyajian LCA dikembangkan oleh banyak peneliti, sehingga tidak mudah untuk digeneralisaikan. Beberapa peneliti menyajikan dalam bentuk perbandingan antara satu unit kerja dengan unit kerja lain di dalam sistem manufaktur, untuk menilai unit kerja mana yang paling besar kontribusinya pada pembebanan lingkungan. Tujuannya adalah untuk menjadi pusat penanganan bagi peningkatan kinerja lingkungan. Sebagian besar peneliti menyajikan perbandingan antar periode waktu, setidaknya dalam hitungan tahun. Penyajian dilakukan dari tahun ke-n dengan tahun ke (n-1) atau tahun ke (n+1). Pada penelitian di pabrik gula ini, dipergunakan model interpretasi yang dikembangkan SETAC (Hasibuan dan Hermawan, 2017).

Perbandingan yang dilakukan terhadap data sekunder tahun 2017 dan 2018 menunjukkan pertumbuhan yang semakin tinggi dari tahun ke tahun sekalipun sebenarnya produksi fluktuatif. Gambar 8 memperlihatkan perbandingan hasil analisis LCA dalam tiga tahun terakhir.



Gambar 8. Tampilan hasil LCA pabrik gula pada produksi periode tiga tahun 2017-2019

Dampak lingkungan terbesar pada kasus pabrik gula data Tahun 2019 adalah pemanasan global dengan beban sebesar 375.966,95 Ton setara CO₂. Dampak lingkungan selanjutnya adalah Potensi Asidifikasi sebesar 89.183,03 Ton setara NO_x dan potensi pengurasan energy sebesar 33.086,91 Ton setara bahan bakar minyak. Untuk memudahkan pemahaman bagi pengguna umum, disajikan ilustrasi sebagaimana Gambar 10.

Penelitian Gunawan et al (2019) menemukan bahwa emisi gas CO₂ di salah satu pabrik gula skala menengah di Jawa Timur sebesar 10,728.08 Ton CO₂eq per ton gula yang dihasilkan. Pada kasus di perusahaan ini, emisi gas CO₂ dihitung sebesar 11,973.47 Ton CO₂eq per ton gula. Pada skala pabrik yang lebih kecil di Jawa Barat, Yani et al (2012) hanya mencatat emisi gas CO₂ sebesar 4,606.79 Ton CO₂eq per ton gula yang dihasilkan.



Gambar 9. Tampilan ilustrasi Prototype LCA dari kasus pabrik gula

KESIMPULAN

Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment-LCA) dipergunakan untuk menilai dampak lingkungan yang dapat secara potensial ditimbulkan dari suatu aktifitas industri, dari muasal hingga musnah. Setiap substansi yang dilepaskan dari suatu industri ke lingkungan diperhitungkan akan memberikan dampak lingkungan yang berbeda-beda, bahkan beberapa substansi yang biasanya dikenali dari unsur kimianya, belum semua tuntas diketahui pengaruh dampaknya.

Proses LCA umumnya dilakukan melalui langkah penentuan ruang lingkup, penyusunan LCI, penetapan LCIA, dan diakhiri dengan interpretasi dan penyajian. Hasil interpretasi tersebut dipergunakan oleh pengambil keputusan di industri untuk memberikan perlakuan untuk mengurangi beban lingkungan. Rangkaian proses LCA tersebut telah dirancang dalam suatu prototype aplikasi komputer (Protype LCA) untuk memberikan hasil analisis lebih cepat dan akurat.

Model yang dirancang pada Prototype adalah kombinasi antara model Beban Lingkungan (Environmental Burden) dengan LCIA Convert Matrix. LCIA Convert Matrix itu sendiri disusun dari sejumlah riset internasional dan terus bersifat dinamis. Aktifitas LCIA dilakukan untuk memperoleh karakter dari setiap data LCI menuju kepada potensi dampak lingkungan yang memungkinkan. Karakterisasi dilakukan dengan pengelompokan dampak pada Pengurangan Sumberdaya Energy (Energy Depletion Potential-EDP), pemanasan global (GWP), ecotoxicity aquatic (ETA), ecotoxicity terrestrial (ETT), Abiotic Depletion Potential (ADP), Photochemical Oxydant Formation (POF), Acidification Potential (ACP), Human Toxicity Potential (HTP), Nutrification Potential (NTP), Ozone Depletion Potential (ODP).

Protype LCA telah diuji coba menggunakan data industri gula kristal putih dengan mengambil periode analisis tahun 2017, 2018, dan 2019. Kontribusi empat terbesar terhadap beban lingkungan dari pabrik gula berdasarkan data tahun 2019 adalah GWP 375.966,95 Ton setara CO₂, disusul ACP 89.183,03 Ton setara NO_x, EDP senilai 33.086,91 Ton setara bahan bakar minyak, dan NTP 14.598,66 Ton setara COD. Selain itu, perlu juga mendapat perhatian adalah HTP 11.621,83 Ton setara fenol, ETA 11,163.18 Ton setara BOD₅, serta ETT 9,748.49 Ton setara abu.

Beberapa industri gula mulai memprogramkan untuk mengurangi GWP dengan mengendalikan gas-gas GWP agar tidak dilepaskan ke udara bebas seperti pemanfaatan CH₄ dari pengolahan limbah atau menggunakan CO₂ dari Boiler untuk produksi dry ice. Asidifikasi dikendalikan dengan mengubah teknologi pemurnian sulfitasi dengan karbonatasi. Sementara upaya pemanfaatan blotong merupakan cara alternatif untuk menurunkan potensi nutrifikasi. Hasil kajian LCA sesungguhnya dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki kinerja lingkungan dengan berfokus pada aspek dan dampak terpilih.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, A.D. (2019). Potential Analysis Of Environmental Impact Of Sugarcane Plantation Using Life Cycle Assessment (LCA) Approach. *Jurnal Litbang* Vol. XV No.1 Juni 2019 Hal 51-64
- Badan Pusat Statistik. (2019). *Neraca Gula Nasional*. BPS, Jakarta.
- Chaerul,M. dan V. Allia. (2020). Tinjauan Kritis Studi Life Cycle Assessment (LCA) di Indonesia. *Serambi Engineering*, Volume V, No. 1 Januari 2020 hal 816- 823
- Chandra, V.V., O. Mwabonje, S.L. Hemstock, A.D.N 'Yeurt, and J. Woods. (2018). Life Cycle Assessment on Sugarcane Growing Process in Fiji. *Sugar Tech* (2018) 20(6):692-699 DOI 10.1007/s12355-018-0607-1. Pp. 692-699
- Gunawan, T. Bantacut, M. Romli and E. Noor. (2019). Life Cycle Assessment of Cane-sugar in Indonesian Sugar Mill: Energy Use and GHG Emissions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 536 (2019) 012059 doi:10.1088/1757-899X/536/1/012059. Pp 1-8.
- Hampannavar, U. dan Shivayogimath, C. (2010). Anaerobic treatment of sugar industry wastewater by Upflow anaerobic sludge blanket reactor at ambient temperature. *International Journal Of Environment*, 1(4), 631–639.
- Hasanudin, U. E. Suroso dan Hartono. 2013. Kajian Efektifitas Penggunaan Tanaman Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) dalam Menurunkan Beban Pencemar Air Limbah Industri Gula Tebu. *Jurnal Teknologi Industri dan Hasil Pertanian* Volume 18 No.2, September 2013. Pp 157-167.
- Hasibuan, S. dan Hermawan T. (2015). GAP Analysis Rancangan Implementasi Sistem Manajemen Mutu ISO 9001:2008 pada Industri Gula. *Prosiding Seminar Nasional Sains, Rekayasa, dan Teknologi* 2015. 6-7 Mei 2015 ISBN 978-979-1053-03-7
- Hasibuan, S dan Hermawan T. (2017). Life Cycle Impact Assessment Produksi Biodiesel Sawit Untuk Mendukung Keberlanjutan Hilirisasi Industri Sawit Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Indonesia* 2017. ISSN 2085-4218
- Hischier, R. and Bo Weidema (Ed.). (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2* (2010). Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- ISO 14045. 2012. *Environmental Management – Eco efficiency assessment of product systems-principles, requirements, and guidelines*. ISO Secretariate, Geneva.
- Kurniasari, H.D., R.A. Fatma, dan J. Aldomoro S. R. (2019). Analisis Karakteristik Limbah Pabrik Gula (Blotong) Dalam Produksi Bahan Bakar Gas (BBG) Dengan Teknologi Anaerob Biodigester Sebagai Sumber Energi Alternatif Nasional. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan* Volume 11, Nomor 2, Juni 2019 Hal. 102-113.
- Muhsin, A. (2011). Pemanfaatan Limbah Hasil Pengolahan Pabrik Tebu Blotong Menjadi Pupuk Organik. *Industrial Engineering Conference* 2011, 5 November 2011. Pp. 1-1 – 1-9
- Paramitadevi, Y.V. , R. Nofriana, dan A. Yulisa. (2017). Penerapan Produksi Bersih Dalam Upaya Penurunan Timbulan Limbah Cair Di Pabrik Gula Tebu. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, Vol. 14 No.2 September 2017. Pp 54-61.
- Rahmawati,R. E. S. Rahayu dan S. W. Ani. (2017). Analisis Penerapan Economic Order Quantity (EOQ) Di Pabrik Gula Madukismo Bantul. *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*. 32(2), 126-131
- Renouf, M.A., M. Poggio, A. Collier, N. Price, B.L.Schroeder and P.G. Allshopp. (2018). Customised life cycle assessment tool for sugarcane (CaneLCA)— a development in the

- evaluation of alternative agricultural practices. *Int J Life Cycle Assesst.*
<https://doi.org/10.1007/s11367-018-1442-z>
- Rhofita, E.I. and A. E. Russo. (2019). Efectiveness Performance of Sugar Cane Industry Waste Water Treatment (WWTP) in Kediri and Sidoarjo Regency. *Jurnal Teknologi Lingkungan* Vol. 20, No. 2, Juli 2019, 235-242.
- Rosmeika, L. Sutiarmo, B. Suratmo. (2010). Pengembangan Perangkat Lunak Life Cycle Assessment (LCA) Untuk Ampas Tebu. *AGRITECH*, Vol. 30, No. 3, Pp. 168-177.
- Skone, T.J. (2013). *Power Generation Technology Comparison from a Life Cycle Perspective.* UD Departement of Energy, Washington DC.
- Subiyanto. (2014). Analisis Efektifitas Mesin/Alat Pabrik Gula Menggunakan Metode Overall Equipments Effectiveness. *Jurnal Teknik Industri*, Vol. 16, No. 1, Juni 2014, 41-50
- Trisnawati, N. O. Novareza, dan A. Eunike. (2016). Inventory Control Of Critical Spare Part Based On Fns Analysis (Case Study: PG Kerebet Baru I, Malang). *JEMIS VOL. 4 NO. 1 TAHUN 2016*. Pp. 11-18.
- Ummah, M. dan H.A. N. Hidayah. (2018). Efektivitas Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Gula PT. X di Kabupaten Kediri Jawa Timur. *Window of Health : Jurnal Kesehatan*, Vol. 1 No. 3 (Juli, 2018). Pp 260-268.
- Yani, M., I. Purwaningsih dan M. N. Munandar. (2012). Life Cycle Assessment Of Sugar At Cane Sugar Industry. *E-Jurnal Agroindustri Indonesia* Juli 2012. Vol. 1 No. 1, p 60-67