



Analisis Potensi Dampak Pencemaran Udara Proses Produksi Gula Dengan Metode Life Cycle Assessment

Chendra Ainun Naufal*, Febri Eko Wahyudianto, Eko Prasetyo Kuncoro

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Airlangga

Email Korespondensi: chennaufal@gmail.com

Diterima: 02 Maret 2023

Disetujui: 16 April 2023

Diterbitkan: 28 April 2023

Kata Kunci:

Gula, *Life Cycle Assessment*, Potensi Dampak, Simapro.

ABSTRAK

Gula merupakan komoditas utama masyarakat Indonesia. Proses produksi gula membutuhkan energi besar yang menyebabkan peningkatan produksi GRK dan berpengaruh pada pemanasan global. Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan adalah *Life Cycle Assessment (LCA)*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui *life cycle inventory*, mengetahui potensi dampak, serta menentukan alternatif terbaik dalam mereduksi potensi dampak yang dihasilkan. Tahapan LCA terdiri dari *goal and scope*, *life cycle inventory*, *life cycle impact assessment*, dan *interpretation*. Ruang lingkup penelitian ini adalah gate to gate dan unit fungsional sebesar 50 kg gula. Software yang digunakan adalah SimaPro versi 9.3 dan metode yang digunakan adalah CML-IA (*baseline*) yang memiliki 11 kategori dampak. Pabrik gula mengeluarkan 5 emisi udara selama proses produksi gula, yaitu SO₂, NO₂, CO₂, N₂O, dan CH₄. Terdapat 5 potensi dampak yang dihasilkan dari proses produksi gula berdasarkan perhitungan dari tahapan *characterization* yakni *acidification*, *eutrophication*, *photochemical oxidation*, *human toxicity*, dan *global warming*. Alternatif perbaikan yang direkomendasikan dalam mereduksi potensi dampak yang timbul selama proses produksi adalah penggunaan filter *Water Spon Filter (WSF)* yang diletakkan pada ujung cerobong dan penggantian bahan bakar ampas tebu menjadi bioethanol pada stasiun ketel. Alternatif perbaikan yang disarankan dapat mereduksi potensi dampak *acidification*, *photochemical oxidant*, *eutrophication*, dan *human toxicity*.

Received: 02 March 2023

Accepted: 16 April 2023

Published: 28 April 2023

Keywords:

Sugar, *Life Cycle Assessment*, Potential Impact, Simapro.

ABSTRACT

Sugar is the main commodity of Indonesian society. The sugar production process requires a lot of energy which causes an increase in GHG production and has an effect on global warming. One of the methods used to analyze environmental impacts is the *Life Cycle Assessment (LCA)*. This study aims to determine the *life cycle inventory*, determine the potential impact, and determine the best alternative in reducing the resulting potential impact. LCA stages consist of objectives and scope, *life cycle inventory*, *life cycle impact assessment*, and *interpretation*. The scope of this research is gate to gate and a functional unit of 50 kg of sugar. The software used is SimaPro version 9.3 and the method used is CML-IA (*baseline*) which has 11 characteristic categories. Sugar factories emit 5 air emissions during the sugar production process, namely SO₂, NO₂, CO₂, N₂O, and CH₄. There are 5 potential impacts resulting from the sugar production process based on calculations from the *characterization* stages namely *acidification*, *eutrophication*, *photochemical oxidation*, *human toxicity*, and *global warming*. The recommended alternative improvements in the mere potentiation impact that arise during the production process are the use of a *Water Sponge Filter (WSF)* filter placed at the end of the chimney and the replacement of bagasse fuel into bioethanol at the boiler station. The suggested improvement alternatives can reduce the potential impact of *acidification*, *photochemical oxidants*, *eutrophication*, and *human toxicity*.

1. PENDAHULUAN

Gula merupakan salah satu komoditas utama masyarakat Indonesia. Kebutuhan gula bagi masyarakat tidak hanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan pokok, tetapi juga digunakan sebagai bahan pemanis yang banyak digunakan sebagai bahan baku industri makanan dan minuman. Pasar

gula di Indonesia mampu mengonsumsi sebesar 5,7 juta ton per tahun yang terdiri dari Gula Kristal Putih (GKP) sebesar 2,8 juta ton untuk konsumsi masyarakat serta Gula Kristal Rafinasi untuk kebutuhan industri sebesar 2,9 juta ton (Purwaningsih, 2016). Semua proses produksi gula mulai dari ekstraksi nira sampai proses pengkristalan gula membutuhkan energi yang besar dan menggunakan bahan bakar fosil sebagai

bahan bakar untuk menghasilkan gula kristal putih, hal tersebut menyebabkan peningkatan produksi GRK dan berpengaruh pada pemanasan global (*global warming*) (Rida, 2012).

Pemanasan global (*global warming*) yaitu peningkatan suhu bumi yang mengakibatkan adanya ketidak seimbangan ekosistem. Pemanasan global telah menjadi masalah lingkungan yang menjadi perhatian utama bagi dunia saat ini. Selama satu abad belakangan, temperatur rata-rata permukaan bumi telah meningkat 0,74 % yaitu sekitar 0,18°C (Utina, 2008). GRK merupakan gas-gas di atmosfer yang dapat menyebabkan terjadinya efek rumah kaca (Hart, 2005). Konvensi PBB mengenai Perubahan Iklim (*United Nation Framework Convention On Climate Change-UNFCCC*), ada 6 (enam) jenis gas yang digolongkan sebagai gas rumah kaca yaitu *carbon dioxide* (CO₂), *methane* (CH₄), *dinitrogen oxide* (N₂O), *sulfur hexafluoride* (SF₆), *perfluorocarbon* (PFCS) dan *hidrofluorocarbon* (HFCS). Menurut IPCC (2006) gas-gas utama yang dikategorikan sebagai gas rumah kaca adalah *carbon dioxide* (CO₂), *methane* (CH₄), dan *dinitrogen oxide* (N₂O), dimana gas tersebut mempunyai potensi cukup besar untuk menyebabkan terjadinya pemanasan global.

Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis dampak Lingkungan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). LCA adalah suatu teknik yang digunakan untuk melakukan penilaian daur hidup terhadap dampak lingkungan yang terjadi dengan suatu produk. Penelitian LCA produksi gula dapat digunakan sebagai bahan identifikasi peluang untuk memperbaiki kinerja lingkungan dari produk di berbagai titik dalam daur hidupnya dan dapat menjadi alternatif dalam upaya meminimalisasi adanya dampak lingkungan disekitar pabrik gula. Dengan menggunakan metode LCA, diharapkan dapat membantu pabrik gula dalam menerapkan industri yang berwawasan lingkungan.

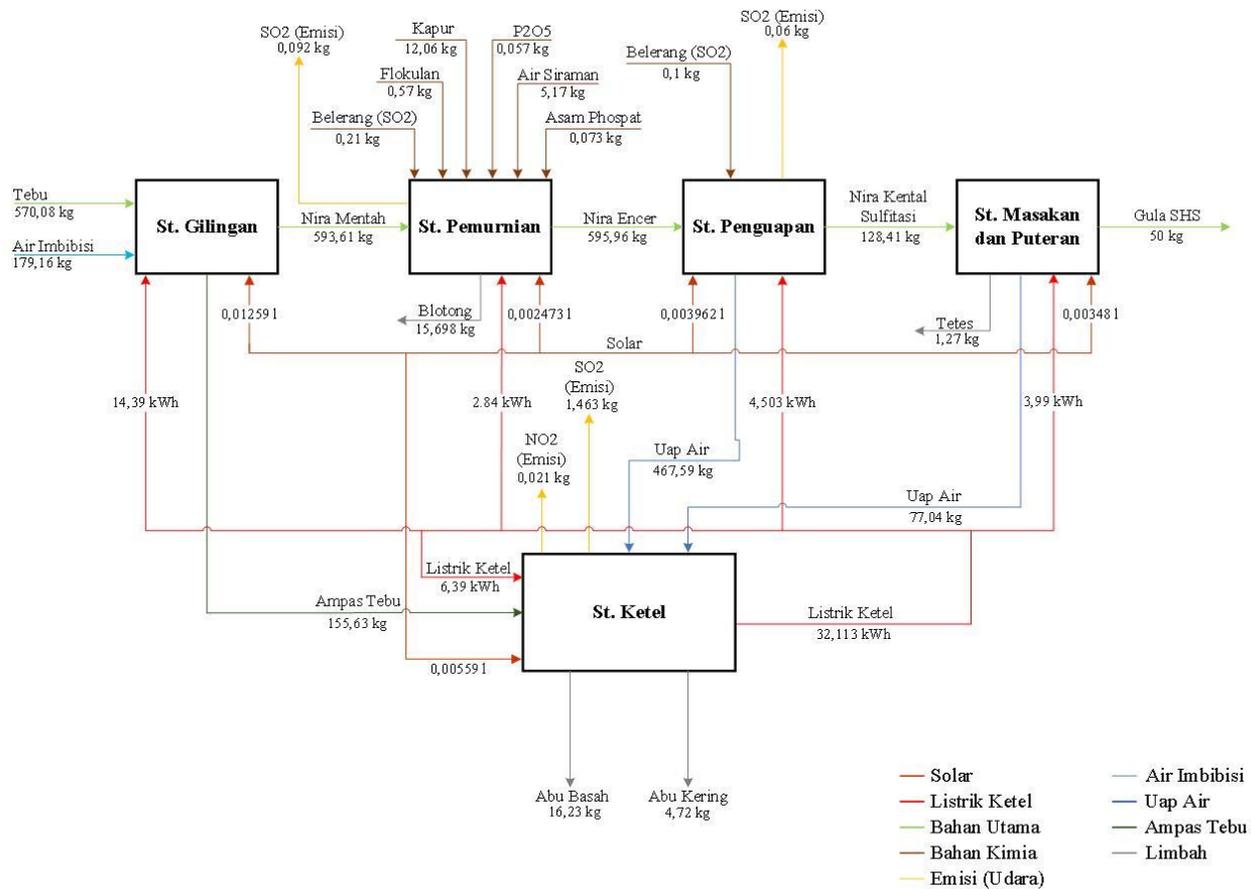
2. METODE

Penelitian dilaksanakan di pabrik gula yang terletak di Provinsi Jawa Timur. Tahap pengumpulan data menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang didapatkan langsung oleh peneliti dalam melakukan penelitian. Data sekunder merupakan data yang didapatkan oleh orang yang melakukan penelitian dari sumber yang telah ada dan penelitian terdahulu. Tahapan dalam melakukan penelitian analisis dampak lingkungan dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) terdiri dari 4 tahap yaitu yang pertama *goal and scope*, *life cycle inventory*, *life cycle impact assessment*, dan *intrepetation*. Tahap pertama yaitu

goal and scope atau penentuan tujuan dan ruang lingkup. Ruang lingkup yang digunakan pada penelitian ini yaitu *gate-to-gate* atau hanya lingkup saat produksi gula saja mulai dari stasiun gilingan, stasiun pemurnian, stasiun penguapan hingga stasiun masakan dan puteran, serta stasiun ketel yang digunakan sebagai penghasil listrik selama proses produksi gula berlangsung. Unit fungsi yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 50kg gula. Selanjutnya yaitu *life cycle inventory*, *life cycle inventory* adalah tahapan untuk inventarisasi data dengan mengumpulkan seluruh *input* dan *output* yang digunakan selama proses produksi berlangsung (*gate-to-gate*). *Life cycle impact assessment* adalah tahapan penilaian menggunakan mengenai dampak yang dihasilkan dari proses produksi gula berdasarkan data *input* dan *output* yang telah dikumpulkan pada tahap LCI. Aplikasi yang digunakan dalam tahapan LCIA yaitu SimaPro versi 9.3.3. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah CML-IA *baseline*. Tahapan terakhir dalam *Life Cycle Assessment* yaitu *interpretation*. *Interpretation* atau interpretasi memiliki tujuan untuk menentukan rekomendasi perbaikan yang bisa diterapkan secara efektif dan efisien dalam mengurangi kategori dampak (negatif) yang dikeluarkan selama proses produksi gula berlangsung. Kemudian pada tahap interpretasi dibuatlah 2 skenario alternatif, skenario pertama menggunakan data aktual pabrik gula pada tahun 2021 dan skenario kedua menggunakan data yang sama dengan skenario pertama namun terdapat perbedaan pada besaran emisi yang dikeluarkan. Hal ini dikarenakan pada skenario kedua diasumsikan bahwa pabrik gula menggunakan alternatif yang direkomendasikan. Alternatif 1 yaitu dengan menambahkan *Water Spoons Filter* (WSF) di stasiun ketel. Alternatif 2 yaitu dengan mengganti bahan bakar ampas tebu dengan bahan bakar ramah lingkungan yaitu *bioethanol* pada stasiun ketel. Kemudian 2 skenario tersebut dibandingkan melalui software SimaPro dan diharapkan bahwa nantinya terdapat penurunan nilai potensi dampak yang dihasilkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses produksi gula kristal putih dilakukan melalui 4 (empat) stasiun, yaitu stasiun gilingan, stasiun pemurnian, stasiun penguapan, dan stasiun masakan dan puteran. Proses produksi gula memiliki stasiun sebagai sumber energi yang energinya akan disalurkan kedalam setiap stasiun dalam proses produksi gula, yaitu stasiun ketel. Stasiun ketel beroperasi menghasilkan uap yang akan diubah menjadi energi listrik.



Gambar 1. Neraca Masa Proses Produksi Gula

Stasiun pertama pada proses produksi gula yaitu stasiun gilingan. Pada stasiun gilingan, tebu yang diangkut dari perkebunan masuk dan akan dicacah menggunakan mesin *cane cutter* dan mesin *unigrator* yang akan menghasilkan tebu yang tercacah. Tebu yang tercacah selanjutnya akan digiling dengan mesin penggiling melalui 4 (empat) gilingan. Pada mesin penggiling dilakukan penambahan air imbibisi yang digunakan sebagai pengoprimalan proses ekstraksi nira yang berasal dari tebu semaksimal mungkin. Hasil yang didapatkan dari stasiun gilingan yaitu nira mentah dan ampas tebu. Ampas tebu yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai bahan bakar pada stasiun ketel, sedangkan nira mentah dilanjutkan ke stasiun pemurnian.

Pada stasiun pemurnian, aliran bahan di stasiun pemurnian yaitu terjadinya proses nira mentah menjadi nira encer dengan penambahan kapur (CaO), belerang (SO₂), asam phospat, difosfor pentoksida (P₂O₅), flokulan, dan air siraman 40°C. Produk yang dihasilkan dari stasiun pemurnian adalah Nira Encer (NE) dan Blotong. Nira Encer akan diteruskan ke stasiun penguapan, sedangkan blotong akan dijual kepada pihak ke-3 untuk menjadi pupuk. Proses pemurnian pabrik gula menggunakan metode sulfitasi alkalis.

Stasiun selanjutnya adalah stasiun penguapan. Hasil produk nira encer pada stasiun pemurnian menjadi bahan utama pada stasiun penguapan. Nira encer yang masuk kedalam stasiun penguapan akan dipanaskan sehingga menghasilkan Nira Kental (NK). Penguapan pada stasiun penguapan dilakukan proses penghilangan gas-gas yang tidak dapat terembunkan. Pada proses penguapan menghasilkan air kondensat yang dipergunakan kembali sebagai air umpan *boiler* pada stasiun ketel.

Nira Kental Sulfitasi hasil dari stasiun penguapan masuk ke stasiun masakan dan puteran. Pada stasiun masakan dan puteran dilakukan proses kristalisasi nira kental sulfitasi menjadi gula kristal putih dengan suhu yang rendah. Tujuan dari proses kristalisasi tersebut adalah sebagai pengubah sukrosa dalam bentuk cair menjadi bentuk kristal. Hasil dari kedua stasiun ini adalah gula kristal putih SHS, *stroop*, tetes, dan *klare* yang akan diolah kembali menjadi gula dan bibit gula untuk masakan. Gula SHS yaitu gula yang akan dipasarkan kepada konsumen. Tetes yang dihasilkan stasiun ini akan dijual kepada pihak ke-3 untuk produksi micin. Sedangkan uap air yang dihasilkan akan menuju ke stasiun ketel.

Stasiun ketel atau *boiler* merupakan stasiun yang penting dalam pabrik gula. Stasiun ketel merupakan pembangkit listrik pribadi yang digunakan selama proses produksi gula. Fungsi dari stasiun ketel adalah untuk menyediakan uap yang digunakan untuk turbin sebagai pembangkit listrik. Uap air yang dihasilkan dari berbagai stasiun akan menjadi *input* dari stasiun ketel. Uap air ini akan diproses menjadi air kondensat dan akan dipanaskan menggunakan *boiler*. Listrik yang dihasilkan dari stasiun ketel akan dialirkan ke stasiun gilingan hingga stasiun ketel sendiri.

Berdasarkan keseluruhan unit, data material yang dibutuhkan, produk yang dikeluarkan, hingga emisi yang dibuang ke lingkungan selama proses produksi 50 kg gula di pabrik gula pada tahun 2021 dapat dilihat pada Tabel 1.

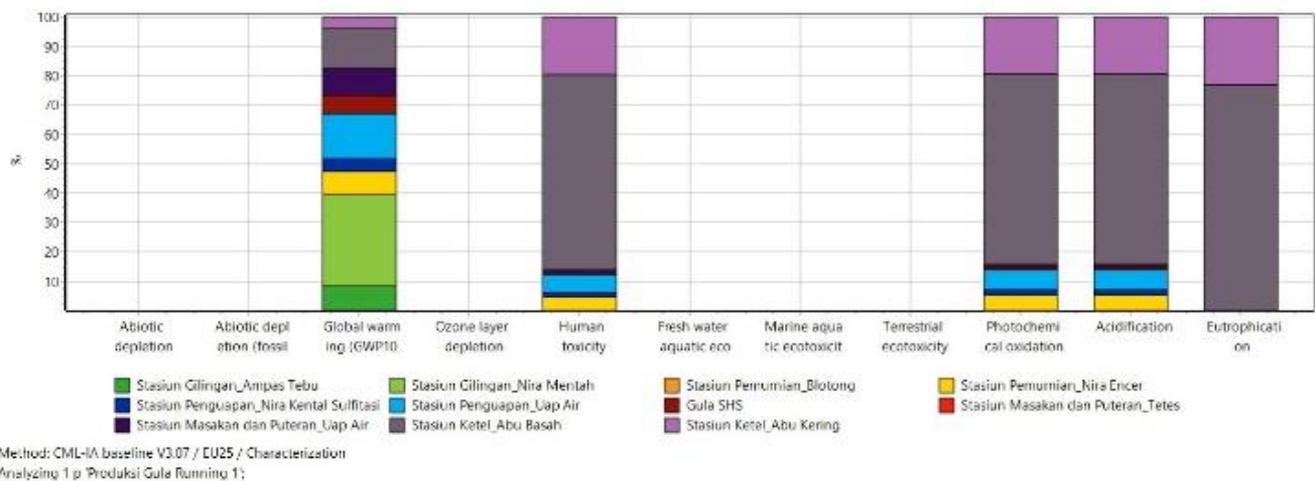
Tabel 1. Inventori Proses Produksi Gula Kristal Putih

Data	Input	Satuan
Material		
Tebu	570,08	kg
Air Imbibisi	179,16	kg
Ampas Tebu	155,63	kg
Nira Mentah	593,61	kg
Flokulan	0,57	kg
Susu Kapur	12,06	kg
Belerang (SO ₂) (St. Pemurnian)	0,21	kg
Difosfor Pentoksida (P ₂ O ₅)	0,057	kg
Air Siraman	5,17	kg
Asam Phospat	0,073	kg
Blotong	15,698	kg
Nira Encer	595,56	kg
Belerang (SO ₂) (St. Penguapan)	0,1	kg
Uap Air (St. Penguapan)	467,59	kg
Nira Kental	128,41	kg
Uap Air (St. Masakan & Puteran)	77,04	kg
Tetes	1,27	kg
Gula SHS	50	kg
Abu Basah	16,23	kg
Abu Kering	4,72	kg
Energi		
Listrik Ketel	32,113	kWh
Solar	0,0281	l
Emisi ke Udara		
SO ₂	1,655	kg
NO ₂	0,021	kg
CO ₂	7,5 x 10 ⁻²	kg
CH ₄	3,03 x 10 ⁻⁶	kg
N ₂ O	6,07 x 10 ⁻⁷	kg

Berdasarkan data yang telah diinventori, maka dapat dilakukan penganalisaan potensi dampak lingkungan menggunakan *software* SimaPro yang akan menghasilkan *output* yaitu *characterization* dan *normalization*.

3.1 Characterization

Characterization adalah tahapan untuk mengubah data *inventory* menjadi nilai dampak pada tiap kategori. Nilai dampak yang dihasilkan masih menggunakan satuan dari tiap kategori. Data yang telah dimasukkan pada tahapan *life cycle inventory* akan di kelompokkan ke dalam kategori dampak sesuai dengan metode yang digunakan. Nilai dampak yang keluar dari tahap *characterization* didapatkan dari perhitungan tiap *input* dan *output* proses yang dimasukkan pada *software* SimaPro dan dihitung berdasarkan *database* yang tersedia dengan metode perhitungan CML-IA (*baseline*). Pada tahap ini dapat diketahui besar kontribusi tiap unit pada tiap kategori dampak yang nantinya dapat memperlihatkan unit yang menjadi kontributor *hotspot*. Tahap karakterisasi memiliki satuan berbeda sesuai dengan kategori dampak masing – masing yang dihasilkan. Hasil karakterisasi yang didapatkan merupakan potensi dampak lingkungan yang dihasilkan pada produksi gula sebesar 50 kg/karung gula yang telah dikemas. Hasil dari *characterization* produksi 50 kg gula yang telah terkemas dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. *Characterization* Produksi Gula Kristal Putih

Berdasarkan Gambar 1, terdapat 5 dampak yang dihasilkan akibat proses produksi gula. Dampak yang dihasilkan adalah *Global Warming Potential* (GWP), *Human Toxicity*, *Photochemical Oxidation*, *Acidification*, dan *Eutrophication*. Hasil yang didapatkan hanya menampilkan 5 kategori dampak, sedangkan dalam metode CML-IA (*baseline*) terdapat 11 kategori dampak. Enam kategori dampak yang

tidak muncul dikarenakan kategori tersebut tidak memiliki nilai atau pada saat proses produksi gula tidak berpotensi memberikan dampak tersebut. Kategori dampak yang tidak muncul, memiliki kemungkinan terlihat jika *scope* pada penelitian ini diperlebar menjadi *cradle to grave*. Tabel hasil potensi dampak *characterization* setiap stasiun dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil dari *Characterization*

Kategori Dampak	Unit	Stasiun Gilingan	Stasiun Pemurnian	Stasiun Penguapan	Stasiun Masakan dan Puteran	Stasiun Ketel
<i>Acidification</i>	kg SO ₂ eq	0	0,11051	0,18237	0,03281	1,7661
<i>Eutrophication</i>	kg PO ₄ ³⁻ eq	2,06 x 10 ⁻⁹	4,05 x 10 ⁻¹⁰	1,04 x 10 ⁻⁹	7,96 x 10 ⁻¹⁰	0,0273
<i>Photochemical Oxidation</i>	kg C ₂ H ₄ eq	2,29 x 10 ⁻¹⁰	0,00442	0,00729	0,00157	0,07081
<i>Human Toxicity</i>	kg 1,4-DB eq	0	0,00884	0,01458	0,00314	0,16564
<i>Global Warming (GWP 100a)</i>	kg CO ₂ eq	0,00095	0,00018	0,00047	0,00036	0,00042

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai potensi dampak *eutrophication*, *photochemical oxidation*, dan *global warming potential* timbul dari semua stasiun saat produksi gula berjalan. Nilai potensi dampak *acidification* dan *human toxicity* ditimbulkan dari semua stasiun kecuali stasiun gilingan. Stasiun ketel menyumbang potensi dampak yang besar pada 4 kategori dampak, sedangkan pada potensi dampak *global warming potential*, stasiun gilingan menyumbang potensi dampak yang besar dengan angka 39,5 %.

Potensi dampak yang pertama adalah *acidification*. *Acidification* merupakan lepasnya gas nitrogen (NO_x dan NO₂) dan sulfur ke lingkungan yang akan menyebabkan bertambahnya kadar asam di lingkungan. Polusi seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x) yang tinggal dalam atmosfer dan akhirnya bereaksi dengan kelembaban dalam udara akan menyebabkan hujan asam (Cahyono, 2010). Penelitian ini sesuai dengan penelitian terdahulu tentang *Life Cycle Assessment* produksi gula yang dilakukan Alfikry (2021) di PG. Candi Baru dan penelitian yang dilakukan Sirait (2020) tentang studi kasus *Life Cycle Assessment* produksi gula di Jawa Timur.

Potensi dampak yang berikutnya adalah *eutrophication*. *Eutrophication* merupakan kondisi dimana sebagian besar nitrogen dalam sebagian polutan bahan kimia mempengaruhi ekosistem laut atau pencemaran di permukaan laut (Auvaria, 2013). Gas yang berpotensi memunculkan dampak *eutrophication* adalah amonia, nitrogen oksida, nitrat, dan fosfor. Tingginya bahan kimia tersebut yang masuk ke dalam perairan dapat mendorong pertumbuhan alga yang berlebih dan mengurangi oksigen dalam air (Alfionita, dkk., 2019). Penelitian ini sesuai dengan penelitian terdahulu tentang *Life Cycle Assessment* produksi gula yang dilakukan Alfikry (2021) di PG. Candi Baru dan rjadi karena adanya reaksi dari sulfat yang terbentuk dari pembakaran dan menciptakan bahan kimia lainnya. PO merupakan jenis polutan udara sekunder yang terbentuk di troposfer dan. Potensi dampak kategori ini muncul berdasarkan jumlah nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), dan amonium. Penelitian ini sesuai dengan penelitian terdahulu tentang *Life Cycle Assessment* produksi gula yang dilakukan Alfikry (2021) di PG. Candi Baru dan penelitian yang dilakukan Sirait (2020) tentang studi kasus LCA produksi gula di Jawa Timur.

Potensi dampak yang keempat adalah *human toxicity*. *Human toxicity* merupakan pencemaran yang bersifat meracuni kesehatan manusia. Potensi dampak *human toxicity* dihitung berdasarkan indeks potensi bahan kimia yang dapat merusak lingkungan (Putri, 2018). Potensi dampak kategori ini muncul karena adanya gas SO₂ dan NO₂. Penelitian ini sesuai dengan penelitian terdahulu tentang LCA produksi gula yang dilakukan Alfikry (2021) di PG. Candi Baru dan penelitian yang dilakukan Sirait (2020) tentang studi kasus *Life Cycle Assessment* produksi gula di Jawa Timur.

Dampak terakhir yang keluar dari proses produksi gula adalah *global warming*. Potensi dampak kategori ini muncul karena adanya gas emisi CH₄, N₂O, dan CO₂. Penelitian ini sesuai dengan penelitian terdahulu tentang *Life Cycle Assessment* produksi gula yang dilakukan Alfikry (2021) di PG. Candi Baru dan penelitian yang dilakukan Sirait (2020) tentang studi kasus *Life Cycle Assessment* produksi gula di Jawa Timur.

3.2 Normalization

Tahapan *characterization* masih belum dapat menunjukkan perbandingan nilai kategori dampak yang menjadi *hotspot*, hal tersebut dikarenakan unit satuan dari *characterization* berbeda-beda sehingga diperlukan tahapan *normalization*. Tahapan ini berfungsi untuk menyeragamkan unit satuan supaya lebih mudah dalam membandingkan antar kategori dampak dan dapat menentukan kategori dampak tertinggi akibat dari proses produksi gula.

Berbeda dengan tahap *characterization*, tahap *normalization* menyatakan kategori dampak dengan satuan yang sama, sehingga memudahkan peneliti untuk membandingkan kategori dampak yang timbul, sehingga memudahkan tahap pengusulan alternatif perbaikan. Nilai dampak yang keluar dari tahap *normalization* didapatkan dari perhitungan pembagian antara hasil karakterisasi dengan nilai normalisasi berdasarkan *database* yang tersedia dengan metode perhitungan CML-IA (*baseline*). Pada tahap *normalization* akan diketahui kategori dengan dampak tertinggi selama proses produksi gula dan stasiun yang berkontribusi atau disebut titik *hotspot*.



Gambar 3. Normalization Produksi Gula Kristal Putih

Berdasarkan Gambar 2, terlihat perbedaan nilai kategori dampak yang dihasilkan. Perbedaan nilai kategori dampak disebabkan karena pada tahap *normalization* sudah dalam satuan yang sama. Hal ini menjadikan hasil dari *normalization* dapat digunakan sebagai dasar penentuan potensi dampak

yang terbesar hingga terkecil akibat dari proses produksi gula. Hasil penilaian dampak *normalization* dapat ditampilkan juga dalam bentuk tabel. Tabel nilai *normalization* setiap kategori dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil dari Normalization

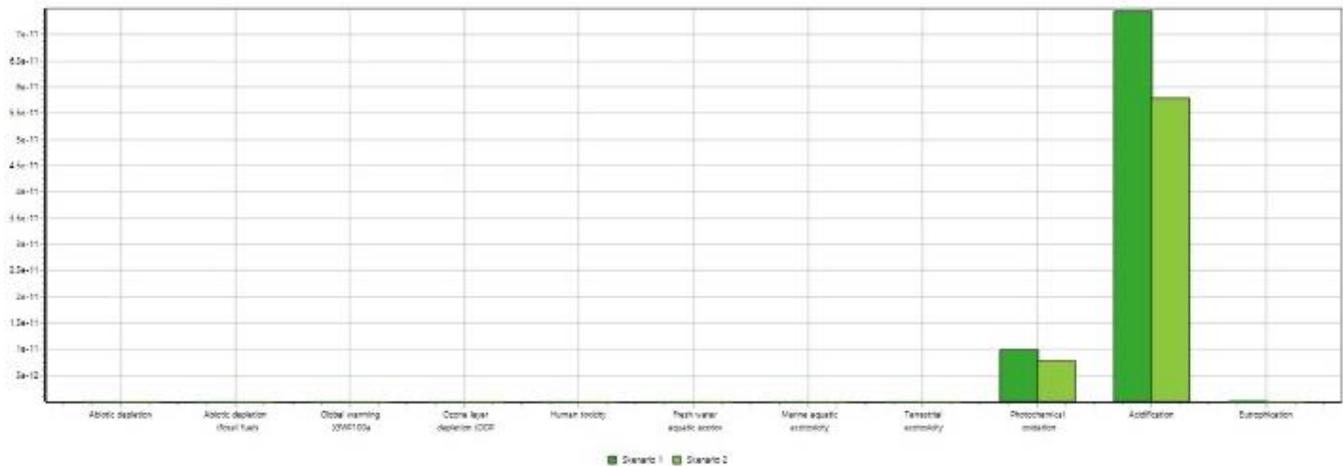
Kategori Dampak	Stasiun Gilingan	Stasiun Pemurnian	Stasiun Penguapan	Stasiun Masakan dan Puteran	Stasiun Ketel
Acidification	0	$3,92 \times 10^{-12}$	$6,47 \times 10^{-12}$	$1,39 \times 10^{-12}$	$6,27 \times 10^{-11}$
Photochemical oxidation	$2,71 \times 10^{-20}$	$1,36 \times 10^{-14}$	$8,62 \times 10^{-13}$	$1,85 \times 10^{-13}$	$8,36 \times 10^{-12}$
Eutrophication	$1,56 \times 10^{-19}$	$3,07 \times 10^{-20}$	$7,91 \times 10^{-20}$	$6,03 \times 10^{-20}$	$2,07 \times 10^{-13}$
Human toxicity	0	$1,14 \times 10^{-15}$	$1,88 \times 10^{-15}$	$4,05 \times 10^{-16}$	$2,14 \times 10^{-14}$
Global warming (GWP 100a)	$1,88 \times 10^{-16}$	$3,70 \times 10^{-17}$	$9,54 \times 10^{-17}$	$7,27 \times 10^{-17}$	$8,37 \times 10^{-17}$

Berdasarkan Tabel 3, menunjukkan potensi dampak *acidification* menghasilkan dampak sebesar $7,45 \times 10^{-11}$ dan merupakan potensi dampak terbesar dari proses produksi gula. Hasil *normalization* juga dapat diketahui stasiun dengan penyumbang kategori dampak terbesar (*hotspot*), yakni stasiun ketel. Perbedaan besarnya nilai *normalization* pada kategori dampak *acidification* dengan kategori dampak lainnya yang memiliki kontribusi emisi yang sama dapat dikarenakan adanya perbedaan nilai faktor pengali atau pembagi pada tahapan *characterization* dan *normalization* yang menjadikan nilai *normalization* kategori dampak *acidification* lebih besar dari yang lainnya.

3.3 Interpretation

Hasil dari analisis dampak potensial kemudian dilakukan upaya untuk meminimalisir dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi. Upaya tersebut dilakukan dengan membuat perbaikan alternatif dimulai dengan menentukan stasiun yang berkontribusi paling dominan terhadap potensi dampak yang terjadi, sehingga pengambilan

langkah perbaikan menjadi tepat dan efektif. Beberapa alternatif yang dapat diaplikasikan adalah alternatif pengurangan pembakaran ampas tebu stasiun ketel dengan memanfaatkan ampas tebu sebagai *bioethanol* dan pemasangan filter WSF pada cerobong asap. Pemilihan alternatif-alternatif tersebut didasarkan oleh hasil *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA). Beberapa alternatif yang dapat diterapkan adalah penggunaan filter “*Water Spoons Filter*” atau WSF dengan penambahan larutan Ca(OH)_2 yang diletakkan di ujung cerobong, penggantian sistem pembangkit boiler pada stasiun ketel yang menggerakkan turbin uap dengan pembangkit turbin gas, dan penggantian mesin agar terjadi efisiensi energi. Menurut penelitian Bestita (2015) mengenai penggunaan WSF dengan larutan Ca(OH)_2 yang diletakkan di ujung cerobong di salah satu pabrik gula dapat menurunkan kadar SO_2 sebesar 73,7%. Menurut penelitian Widodo (2017), proses gilingan yang menggunakan energi listrik berbahan bakar *bioethanol* memiliki nilai dampak total yang lebih kecil dari pada menggunakan energi listrik berbahan bakar ampas tebu. Selisih besaran dampak sebesar 41% yakni dari 524 mPt menjadi 307mPt, dengan penurunan NO_2 sebesar 24%.



Gambar 4. Perbandingan Hasil Penurunan Kategori Dampak

Berdasarkan Gambar 3, terlihat penurunan nilai potensi dampak yang timbul menggunakan skenario 2 dengan menggunakan alternatif perbaikan yang direkomendasikan. Penurunan nilai potensi dampak terjadi dikarenakan dalam alternatif tersebut terjadi penurunan emisi SO₂ dan NO₂. Penurunan nilai dari setiap kategori dampak dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Penurunan Nilai Setiap Kategori Dampak

Kategori Dampak	Skenario 1	Skenario 2	Persentase Penurunan (%)
Acidification	7,45 x 10 ⁻¹¹	5,78 x 10 ⁻¹¹	13%
Photochemical oxidation	9,92 x 10 ⁻¹²	7,69 x 10 ⁻¹²	13%
Eutrophication	2,17 x 10 ⁻¹³	4,97 x 10 ⁻¹⁴	63%
Human Toxicity	2,48 x 10 ⁻¹⁴	1,76 x 10 ⁻¹⁴	17%
Global warming (GWP100a)	4,77 x 10 ⁻¹⁶	4,77 x 10 ⁻¹⁶	0

Berdasarkan Tabel 4, terlihat penurunan pada setiap kategori dampak setelah menggunakan rekomendasi alternatif perbaikan pada pabrik gula. Potensi dampak *eutrophication* mengalami penurunan paling besar dengan angka 63%. Penurunan tersebut diakibatkan oleh penggantian bahan bakar ampas tebu menjadi *bioethanol*. Hal tersebut menyebabkan potensi dampak *eutrophication* mengalami penurunan yang sangat besar.

Potensi dampak *human toxicity* memiliki penurunan sebesar 17% setelah menggunakan rekomendasi alternatif perbaikan, sedangkan potensi dampak *acidification* dan *photochemical oxidation* memiliki penurunan sebesar 13%. Penurunan potensi dampak tersebut dikarenakan adanya penurunan emisi SO₂ dan NO₂ akibat penambahan WSF di ujung cerobong dan penggantian bahan bakar ampas tebu menjadi *bioethanol*. Perbedaan persentase penurunan nilai dampak yang terjadi ini dikarenakan terdapat perbedaan nilai faktor pada setiap kategori dampak pada *database* SimaPro yang dikalikan ke emisi yang ada. Potensi dampak *global warming* (GWP100a) tidak mengalami penurunan karena dalam kasus ini emisi yang dikeluarkan relatif sangat kecil. Emisi yang dihasilkan dikarenakan bahan bakar solar yang digunakan hanya untuk pemanasan mesin dan bahan bakar solar tidak dipakai selama

proses produksi berlangsung, sehingga emisi yang dikeluarkan sangat kecil.

Skenario atau alternatif yang direkomendasikan ini berguna untuk melindungi lingkungan serta akan menjadi bentuk pertanggung jawaban perusahaan atas emisi yang dibuang ke lingkungan akibat dari proses produksinya. Berdasarkan hasil yang didapatkan dari penelitian ini diharapkan hasil dari penggunaan metode LCA dapat menjadi tolak ukur perusahaan terhadap pengendalian dampak lingkungan sehingga proses produksi yang dilaksanakan menjadi produksi bersih dan *sustainable*.

4. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan serta pembahasan yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan dari penelitian ini yaitu:

1. Proses produksi gula mengeluarkan 5 jenis emisi udara dalam proses produksinya. Emisi yang dikeluarkan adalah emisi CO₂, N₂O, CH₄, SO₂ dan NO₂.
2. Terdapat 5 potensi dampak yang dihasilkan dari proses produksi gula berdasarkan perhitungan tahapan *characterization*, yaitu *acidification* sebesar 1,7665 kgSO_{2(eq)}, *eutrophication* sebesar 0,027 kgPO₄^{3-(eq)}, *photochemical oxidation* sebesar 0,084 kgC₂H_{4(eq)}, *human toxicity* sebesar 0,1922 kg 1,4-DB_(eq), *global warming* sebesar 0,0029 kgCO₂.
3. Alternatif yang direkomendasikan untuk menurunkan potensi dampak yang timbul adalah penggunaan filter *Water Spous Filter* atau WSF dengan penambahan larutan Ca(OH)₂ yang diletakkan di ujung cerobong dan penggantian bahan bakar ampas untuk pembangkit boiler pada stasiun ketel yang menggerakkan turbin uap dengan pembangkit turbin gas dengan menggunakan bahan bakar *bioethanol*. Alternatif-alternatif ini dapat menurunkan *acidification* sebesar 13 %, *eutrophication* sebesar 63 %, *photochemical oxidation* sebesar 13 %, dan *human toxicity* sebesar 17%, sedangkan *global warming* tidak mengalami penurunan karena tidak ada indikator emisi yang diturunkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfikry, S. C. N. 2021. *Analisis Potensi Dampak Pencemaran Udara Pada Produksi Gula Dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA)*. Universitas Airlangga. Surabaya.
- Alfionita, A. N. A., Patang, P., & Kaseng, E. S. 2019. *Pengaruh Eutrofikasi Terhadap Kualitas Air di Sungai Jeneberang*. Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian, 5(1): 9-23.
- Bestita, N. S. 2015. *Pengendalian Pencemaran Gas SO₂ pada Pabrik Gula di kabupaten Sidoarjo dengan Water Spons Filter*. Surabaya: Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Surabaya.
- Cahyono, W. E. 2010. *Pengaruh Hujan Asam pada Biotik dan Abiotik*. Pengkajian Ozon dan Polusi Udara, LAPAN.
- Hart, J. 2005. *Global Warming*. Redmond, WA: Microsoft Corporation.
- IPCC. 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.. Volume II: Energy*. Japan: IGES.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, XXX pp*. Cambridge, United Kingdom, and New York: Cambridge University Press.
- ISO 14040. 2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment- Principle and Framework, International Organisation for Standardisation ISO*. Geneva, Switzerland.
- ISO 14041. 1998. *Environmental management – Life Cycle Assessment – Goal and scope definition and inventory analysis*. Geneva, Switzerland.
- ISO 14042. 2000. *Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle impact assessment*. Geneva, Switzerland.
- ISO 14044. 2006. *Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirement and guidelines*. Geneva, Switzerland.
- Menteri Lingkungan Hidup. 2021. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 1 Tahun 2021 Tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Jakarta.
- Purwaningsih, I. W. 2016. *Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment) Gula Tebu di PG Subang, Jawa Barat*. Bogor: Tesis, Teknologi Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
- Putri, S. N., 2018, *Life Cycle Assessment (LCA) Proses Produksi Kain Pabrik Tekstil (Studi Kasus: PC. GKBI Medari Yogyakarta)*. Tugas Akhir, Teknologi Industri Pertanian, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Rida, S. A. BR S. 2012. *Potensi Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Industri Gula (Studi Kasus PT PG RAJAWALI II Unit PG SUBANG)*. Bogor: Teknologi Industri Pertanian IPB.
- Sirait, M. 2020. *Studi Life Cycle Assessment Produksi Gula Tebu: Studi Kasus di Jawa Timur*. Rekeyasa, 13(2): 197-204.
- Utina, R. 2008. *Pemanasan Global: Dampak dan Upaya Meminimalisasinya*. Jurnal Saintek Universitas Negeri Gorontalo, Vol.3, No.03, p.1-11
- UNFCCC. 2010. *The Kyoto Protocol Mechanism; International Emissions Trading, Clean Development Mechanism, Joint Implementation*. Germany: UNFCCC
- Widodo, R. A. 2017. *Analisis Dampak Lingkungan pada Proses Poduksi Gula Kistal Putih dengan Pendekatan Life Cycle Assessment (LCA)*. Malang: Skripsi, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
- Yuwono, R., Sekar, D., Londo P., dan Taufik, M. 2012. *Kumpulan Praktek Pengelolaan Lingkungan Terbaik Perusahaan Peraih Peringkat Proper Hijau Tahun 2012*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia.