

Kajian Dampak Lingkungan Produksi Batubara PT Berau Coal-Site Samarata (SMO) dengan Metode *Life Cycle Assessment*

Nana Jedy Darpawanto¹, M. Arief Budihardjo², Fuad Muhammad³ dan Dita Amalia⁴

¹Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro; e-mail: nanajedyd@students.undip.ac.id

²Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro; e-mail: ariefbudihardjo@lecturer.undip.ac.id

³Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro; e-mail: fuadmuhammad@lecturer.undip.ac.id

⁴PT Berau Coal; e-mail: dita.amalia@beraucoal.co.id

ABSTRAK

PT. Berau Coal merupakan salah satu adalah dengan salah satunya yaitu PT Berau Coal – Site Samarata (SMO). Sistem penambangan pada PT. Berau Coal-Site Samarata (SMO) menggunakan sistem tambang terbuka dengan menggunakan metode *back filling*. PT Berau Coal-Site Samarata (SMO) melakukan kajian *Life Cycle Assessment* yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja lingkungan dan mengidentifikasi potensi dampak lingkungan akibat kegiatan produksi batubara. Metode penelitian ini mengacu pada SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017, *Life Cycle Inventory*, *Life Cycle Impact Assessment* dan Interpretasi. Perhitungan penilaian dampak dilakukan pada proses produksi dengan menggunakan metode kajian dampak CML IA *Baseline* dengan bantuan *software* Microsoft Excel. Dampak Lingkungan yang dikaji dalam penelitian ini yaitu meliputi potensi pemanasan global, potensi penipisan ozon, potensi hujan asam dan potensi eutrofikasi dengan ruang lingkup kajian adalah *cradle to gate*. Ruang lingkup kajian meliputi proses produksi yang ada yaitu *land clearing*, *top soil removal*, *drilling and blasting*, *material removal*, *coal getting*, *coal hauling* dan *coal crushing*. Proses *material removal* memberikan kontribusi dampak tertinggi dengan menghasilkan potensi pemanasan global sebesar $2,91 \times 10^{-1}$ kgCO₂eq/ton batubara, potensi penipisan ozon sebesar $6,60 \times 10^{-6}$ kgCFC-11eq/ton batubara, potensi hujan asam sebesar $1,19 \times 10^{-1}$ kg SO₂eq/ton batubara dan potensi eutrofikasi sebesar $3,37 \times 10^{-2}$ PO₄eq/ton batubara. Potensi dampak lingkungan yang dihasilkan pada proses *material removal* disebabkan oleh penggunaan bahan bakar solar sebesar 38.539.302 L dengan menghasilkan emisi CO₂ sebesar 102.807,44 tonCO₂eq.

Kata kunci: Batubara, Life Cycle Assessment, Tujuan dan Ruang Lingkup, Life Cycle Inventory, Life Cycle Impact Assessment, Interpretasi

ABSTRACT

PT. Berau Coal is a coal mining located in East Kalimantan and operates three mining areas, one of which is PT Berau Coal – Site Samarata (SMO). Mining system at PT. Berau Coal – Site Samarata (SMO) is carried out using an open pit mining system using the backfilling method. PT Berau Coal-Site Samarata (SMO) conducted a Life Cycle Assessment which aims to improve environmental performance and identify potential environmental impacts due to coal production activities. This research method refers to SNI ISO 14040:2016 and SNI ISO 14044:2017, Life Cycle Inventory, Life Cycle Impact Assessment, and Interpretation. The impact assessment calculation is carried out on the production process using the CML IA Baseline impact assessment method with the help of Microsoft Excel software. The environmental impacts studied in this study include global warming potential, ozone depletion potential, acid rain potential, and eutrophication potential with the scope of the study being cradle to gate. The scope of the study covers the existing production processes, namely land clearing, topsoil removal, drilling and blasting, material removal, coal getting, coal hauling, and coal crushing. The material removal process contributes the highest impact by producing a global warming potential of $2,91 \times 10^{-1}$ kgCO₂eq/tonne of coal, ozone depletion potential of $6,60 \times 10^{-6}$ kg CFC-11eq/ton of coal, acid rain potential of $1,19 \times 10^{-1}$ kgSO₂eq/ton coal and eutrophication potential of $3,37 \times 10^{-2}$ PO₄eq/ton coal. The potential environmental impact generated in the material removal process is caused by the use of diesel fuel of 38,539,302 L with CO₂ emissions of 102,807.44 tonsCO₂eq.

Keywords: Coal, Life Cycle Assessment, Goal and Scope, Life Cycle Inventory, Life Cycle Impact Assessment, Interpretation

Citation: Darpawanto, N.J., Budihardjo, M.A., Muhammad, F., & Amalia, D. (2022). Kajian Dampak Lingkungan Produksi Batubara PT Berau Coal – Site Samarata dengan Metode *Life Cycle Assessment*. Jurnal Ilmu Lingkungan, 20(4), 704-716, doi:10.14710/jil.20.4.704-716

1. Latar Belakang

PT Berau Coal adalah perusahaan tambang batubara yang berlokasi di Tasuk, Gunung Tabur, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. PT Berau Coal saat ini memiliki dan mengoperasikan tiga area penambangan diantaranya yakni Site Lati, Site Samarata dan Site Binungan dengan total luas PKP2B sebesar 108.009 Ha. Sistem penambangan pada PT Berau Coal – Site Samarata (SMO) menggunakan sistem tambang terbuka (*open pit mine*) dengan metode penggalian dan pengisian kembali (*back filling method*) yang disesuaikan dengan desain pit maupun disposal. Penerapan sistem tambang terbuka disesuaikan dengan perhitungan cadangan batubara pada lapisan lereng menengah dengan rata-rata 5⁰ – 15⁰ pada PT Berau Coal - SMO.

Batubara diangkut dengan menggunakan truk jungkit dengan kapasitas 30-ton menuju ke *Coal Processing Plant* (CPP) yang berjarak kurang lebih 17,98 km dari area penambangan PT Berau Coal - Samarata (SMO). Perkiraan produksi batubara di PT Berau Coal – Site Samarata (SMO) untuk tahun 2015 - 2019 berdasarkan jumlah peralatan tambang yang digunakan rata-rata sebesar 49.000 MT per hari sedangkan produksi pengupasan lapisan tanah penutup (*overburden*) rata-rata sebesar 403.000 BCM per hari. Kegiatan penggalian dan penimbunan batuan penutup serta pengambilan batubara dilakukan dengan menggunakan *hydraulic shovel* dan *backhoe* berukuran 3 hingga 22 BCM untuk kemudian dimuat ke dalam truk jungkit berkapasitas 20 ton hingga 150 ton. Di *Coal Processing Plant* (CPP) PT Berau Coal - SMO, batubara mengalami proses *crushing* (peremukan) hingga ukuran yang diinginkan oleh konsumen. Setelah itu, batubara diangkut dengan menggunakan *truck loading* ataupun *belt conveyor* menuju *coal stockpile*. Kemudian, batubara didistribusikan kepada konsumen melalui jalur laut.

Life Cycle Assessment (LCA) atau Penilaian Daur Hidup merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui dampak lingkungan dari proses manufaktur suatu produk (Awuah-Offei dan Adekpedjou, 2011). Berdasarkan ISO (2006), LCA didefinisikan sebagai sintesis dan penilaian aliran material dan energi, serta potensi dampak lingkungan selama masa pakai suatu produk. LCA berkembang cukup pesat setelah secara resmi diadopsi oleh *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) pada awal 1990 (Awuah-Offei and Adekpedjou, 2011). Namun dalam industri pertambangan khususnya batubara di Indonesia, penilaian lingkungan dengan metode LCA masih cukup jarang dilakukan oleh perusahaan dan pemerintah. LCA belum menjadi alat penting untuk mengidentifikasi potensi dampak dan pertimbangan saat mengambil keputusan di industri pertambangan PT Berau Coal – Site Samarata (SMO) berkomitmen untuk selalu melakukan peningkatan kinerja lingkungan perusahaan dan melakukan upaya

identifikasi potensi dampak lingkungan yang berasal dari kegiatan perusahaan. Untuk mempertahankan komitmen tersebut, PT Berau Coal - SMO melakukan kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) yang bertujuan untuk memperkuat dasar peningkatan kinerja lingkungan perusahaan dan mengidentifikasi potensi dampak lingkungan akibat kegiatan produksi perusahaan dengan lingkup kajian *cradle to gate* sesuai dengan rencana strategis yang telah dibuat oleh perusahaan. LCA dapat memberikan hasil pengukuran potensi dampak lingkungan akibat aktivitas perusahaan yang lebih akurat, sehingga dapat mengidentifikasi potensi dampak yang paling signifikan beserta sumber aktivitasnya. Hasil dari kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk menentukan peluang perbaikan kinerja lingkungan perusahaan.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan acuan standar tertentu. Acuan standar yang digunakan adalah SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017. Perhitungan penilaian dampak dilakukan pada proses tambang batubara dengan menggunakan metode kajian dampak CML IA *Baseline* dengan bantuan *software* Microsoft Excel. Penilaian dampak dilakukan secara manual dengan perhitungan setiap inventori data dengan faktor karakterisasi. Metode CML adalah metodologi dari Centre of Environmental Science Leiden University impact Assessment (CML) di Universitas Leiden dan berfokus pada berbagai kategori dampak Lingkungan (GaBi, 2009). Metode ini dibagi menjadi *baseline* dan *non-baseline*, dengan *baseline* menjadi kategori dampak yang paling umum digunakan dalam LCA (Khairona, 2019). Berdasarkan *Introduction to LCA with SimaPro* (2016), metode CML-IA *Baseline* termasuk dalam *midpoint categories* yang merupakan kategori dampak lingkungan langsung dan merupakan kategori dampak utama di Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Dampak lingkungan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah *Global Warming Potential*, *Ozon Depletion Potential*, *Acidification Potential* dan *Eutrophication Potential*, hal ini sesuai dengan dampak utama yang tercantum dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Perhitungan dampak dilakukan setelah inventarisasi data terhadap unit fungsi. Perhitungan dampak lingkungan dilakukan dengan menggunakan metode kajian dampak CML-IA *Baseline* dengan bantuan *software* Microsoft Excel. Menurut Putri (2017), nilai masing-masing dampak didapatkan dengan mengalikan jumlah pemakaian dengan faktor karakterisasi seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

Nilai karakterisasi kategori dampak = data inventori berdasarkan unit fungsi x faktor karakterisasi

Keterangan :

Nilai Indikator Dampak = Nilai hasil karakterisasi pada setiap kategori dampak yang dikaji (GWP, ODP, AP, EP) (contoh satuan : kg CO₂ ek/Ton Batubara).

Data Inventori = Jumlah yang dikonsumsi (*input*) setiap proses atau jumlah keluaran (*output*) yang didasarkan atas unit fungsi (kg/Ton Batubara).

Faktor karakterisasi = Angka karakterisasi setiap material dari kategori.

Pada perhitungan dampak, nilai faktor karakterisasi didapatkan dari database CML-IA *Baseline* pada *software* SimaPro. Database yang tersedia sudah mencakup untuk kategori dampak yang dinilai, baik *Global Warming Potential*, *Ozon Depletion Potential*, *Acidification Potential* dan *Eutrophication Potential*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Goal and Scoping

Saat menentukan penilaian dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA, tujuan dan ruang lingkup produk dan proses harus ditentukan terlebih dahulu.

Tujuan dari penelitian ini yaitu menganalisis dampak lingkungan yang sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup yaitu meliputi potensi pemanasan global, potensi penipisan ozon dan potensi hujan asam. Alasan menganalisis dampak lingkungan dengan menggunakan LCA adalah sebagai informasi kepada perusahaan terkait dampak lingkungan yang dihasilkan dari rangkaian proses produksi batubara PT Berau Coal – Site Samarata sehingga dihasilkan keluaran berupa rekomendasi perusahaan berdasarkan *hotspot* dari hasil analisis yaitu dengan ruang lingkup *cradle to gate*. Penentuan ruang lingkup *cradle to gate* mengacu pada Surat Pengusulan Ruang Lingkup LCA oleh Asosiasi Pertambangan Batubara Indonesia (APBI) pada tanggal 16 Agustus 2019.

Ruang lingkup LCA ini meliputi sistem produk dan fungsi sistem produk, unit fungsi, aliran acuan, batasan sistem, kriteria *cut-off* dan prosedur alokasi. Secara detail yaitu sebagai berikut:

1. Sistem Produk dan Fungsi Sistem Produk
Analisis dampak lingkungan dengan metode LCA ini mengukur dan mengidentifikasi potensi

dampak dari aktivitas relevan di tambang batubara pada PT Berau Coal – Site Lati. Sistem produk yang dikaji telah mencakup 100% produk yaitu sistem pertambangan batubara yang dimulai dari proses *land clearing* hingga *coal crushing* serta utilitas yang meliputi reklamasi, WWTP, *utility mining* dan *workshop*. Fungsi sistem produk yang dikaji adalah pertambangan batubara dengan periode acuan adalah satu (1) tahun, yaitu periode Januari – Desember 2020. Produk dari PT Berau Coal – Site Lati adalah batubara yang berfungsi sebagai bahan bakar untuk industri lainnya.

2. Unit Fungsi
Produk dari kegiatan pertambangan batubara PT Berau Coal – Site Lati adalah batubara yang ditambang dimana unit fungsi didefinisikan sebagai 1 Ton Batubara
3. Aliran Acuan
Aliran acuan merupakan ukuran keluaran dari proses dalam sistem produk yang dikaji untuk memenuhi fungsi yang dinyatakan dalam unit fungsi. Aliran acuan yang digunakan dalam penelitian ini berupa 1 Ton Batubara yang ditambang selama 1 tahun pada tahun 2020 dengan total batubara yang dihasilkan sejumlah 8.243.923 Ton Batubara.
4. Batasan Sistem
Penetapan batas sistem didasarkan pada tujuan dari kajian, yaitu *cradle to gate* sesuai dengan Surat Pengusulan Ruang Lingkup LCA oleh Asosiasi Pertambangan Batubara Indonesia (APBI) pada tanggal 16 Agustus 2019. Batasan sistem yang digunakan meliputi proses produksi yang terbagi menjadi dua yaitu Proses Hulu terdiri dari *land cleari*, *top soil removal*, *drilling and blasting* dan *material removal* serta Proses Inti terdiri dari *coal getting*, *coal hauling* dan *coal crushing*. Selanjutnya mencakup juga utilitas yang meliputi reklamasi, WWTP, *utility mining* dan *workshop*. Adapun terdapat kegiatan pada proses produksi dan utilitas yang tidak termasuk dalam batasan sistem yaitu meliputi *port stockpile*, *loading coal to tanker*, *barging*, distribusi batubara ke konsumen, penggunaan batubara oleh konsumen, laboratorium dan klinik.
5. Kriteria *Cut-off*
Kriteria *cut-off* merupakan penetapan jumlah aliran bahan atau energi atau tingkat kepentingan lingkungan yang terkait dengan suatu unit proses maupun sistem produk yang dikeluarkan atau diabaikan dari lingkup penelitian. Analisis dampak lingkungan dengan metode LCA ini semua aliran *input* dan *output* yang terkait pada sistem produksi dilakukan penilaian dampak lingkungan. Data yang digunakan dalam perhitungan dampak tidak termasuk:

- a. Pengangkutan bahan bakar ke lokasi tambang
 - b. Kegiatan reklamasi dan revegetasi
 - c. Kegiatan pendukung termasuk penggunaan unit LV operasional dan perkantoran/*camp*. Maka dari itu, kriteria *cut-off* adalah 0% yang berarti bahwa semua data inventori yang masuk ke dalam batasan sistem penelitian dimasukkan ke dalam tabel inventori dan dianalisis.
6. Prosedur Alokasi
Analisis dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA terdapat prosedur alokasi yang berdasarkan ISO 14040 dan ISO 14044, dinyatakan bahwa penilaian dampak lingkungan diupayakan untuk tidak melakukan alokasi. PT Berau Coal – Site Lati hanya menghasilkan 1 (satu) produk yaitu batubara sehingga tidak terdapat prosedur alokasi.
7. Kategori Dampak Yang Dipilih
Kategori dampak yang dipilih yaitu merupakan kategori dampak utama sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan Dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup yang meliputi Potensi Pemanasan Global, Potensi Penipisan Ozon dan Potensi Hujan Asam.
8. Asumsi
Analisis dampak lingkungan dengan menggunakan metode LCA, beberapa data yang menggunakan asumsi sebagai pendekatan dan penunjang perhitungan serta penyusunan. Adapun asumsi yang digunakan, diantaranya:
- a. Emisi yang dihasilkan dari proses penambangan batubara dihitung menggunakan pendekatan penggunaan solar pada proses tersebut.
 - b. Kandungan dan segala dampak dari suatu material didasarkan atas angka-angka pada materi dasar yang digunakan.
 - c. Data input kegiatan *workshop* diasumsikan berdasarkan data outputnya

Ruang lingkup yang dikaji dijelaskan secara rinci dibawah ini.

3.1.1 Proses Hulu (*Cradle*)

a. *Land Clearing*

Land Clearing merupakan kegiatan awal dari kegiatan pertambangan. Kegiatan ini bertujuan untuk memudahkan pengupasan *overburden* serta menyingkahkan material yang berada lokasi yang akan ditambang seperti tanaman/pepohonan atau material lainnya yang berada di permukaan.

b. *Top Soil Removal*

Top Soil Removal atau pengupasan tanah lapisan atas dilakukan terlebih dahulu dan ditempatkan secara terpisah pada tanah yang terbebani. Tanah lapisan atas memiliki kandungan nutrisi yang tinggi, sehingga harus dipindahkan dan disimpan pada *dumping area* agar dapat digunakan kembali sebagai

lapisan atas di atas area lahan disposal yang telah berakhir dan memasuki tahap reklamasi.

c. *Drilling dan Blasting*

Drilling merupakan pengeboran batuan penutup, sedangkan *blasting* merupakan peledakan untuk material keras yang menutupi tanah penutup. Material yang menjadi bahan peledak digunakan pada PT Berau Coal – Site Sambarata (SMO) antara lain detonator berupa elektronik dan non elektrinik; AN/*watergel*; dinamit dan sumbu.

d. *Material Removal*

Material Removal merupakan proses pemilahan material yang akan dibuang menuju *Disposal Area*.

3.1.2 Proses Inti (*Gate*)

a. *Coal Getting*

Coal Hauling merupakan penambangan batubara yang dapat dilakukan langsung tanpa peledakan setelah penyisihan batuan penutup menggunakan alat berat berjenis *backhoe*.

b. *Coal Hauling*

Coal Hauling yaitu proses pengangkutan *raw coal* menggunakan *dumptruck* menuju *Coal Preparation Plant* atau *Wash Plant*.

c. *Coal Crushing*

Coal Crushing yaitu proses penggilingan batubara dari ukuran besar ke ukuran kecil agar dapat digunakan pada proses selanjutnya. Alat untuk pemecahan batubara tersebut adalah *crusher*.

c. *Coal Conveying to Stockpile*

Coal Conveying to Stockpile yaitu proses pemindahan batubara yang diangkut oleh *Dump Truck* menuju ke *stockpile*.

3.1.3 Utilitas

a. *Reklamasi*

Reklamasi merupakan kegiatan pasca tambang yang bertujuan untuk memperbaiki kembali fungsi lahan yang terganggu akibat aktivitas pertambangan agar dapat berfungsi dan berdaya guna sesuai peruntukannya.

b. *WWTP*

WWTP atau Instalasi Pengolahan Air Limbah merupakan rangkaian proses yang dapat digunakan untuk menghilangkan zat organik dan anorganik dalam air. WWTP dapat dilakukan untuk menghilangkan air asam tambang akibat aktivitas pertambangan batubara.

c. *Utility Mining*

Utility Mining merupakan proses penunjang produksi yang meliputi mess, kantor dan kegiatan lainnya yang dilaksanakan oleh pihak kontraktor batubara.

d. *Workshop*

Workshop merupakan proses penunjang produksi yang berfungsi untuk *maintenance* peralatan pertambangan batubara.

3.2. *Life Cycle Inventory (LCI)*

Life Cycle Inventory (LCI) merupakan inventori data pada setiap proses yang berkaitan

dengan masing-masing kategori (bahan baku alami, bahan pendukung, energi dan bahan bakar, air, infrastruktur, sumber daya, limbah dan emisi) akan dianalisis secara keseluruhan untuk mengetahui

konsumsi atau emisi terbesar dari setiap kategori tersebut. Informasi tentang inventori data input dan output dari proses produksi batubara dan utilitas akan disajikan pada table-table berikut.

Tabel 1 Inventori Daur Hidup Proses Produksi Batubara PT Berau Coal Site Samarata

Unit Proses	Nama Alat	Jenis	Input	Jumlah	Satuan	Jenis	Output	Jumlah	Satuan
PROSES HULU									
<i>Land Clearing</i>	<i>Excavator dan Dump Truck</i>	Bahan Baku	Lahan	333,06	Ha	Emisi yang dihasilkan	SOx	0,98	Ton Sox
		Bahan Bakar	Solar	218.005,77	L		NOx	14,88	Ton NOx
							CO ₂	581,55	Ton CO ₂
						Produk yang dihasilkan	Lahan yang dibuka	239	Ha
<i>Soil Removal</i>	<i>Excavator dan Grader</i>	Bahan Baku	Soil	972.822	m ³	Emisi yang dihasilkan	SOx	6,93	Ton Sox
		Bahan Bakar	Solar	1.543.535,372	L		NOx	105,35	Ton NOx
							CO ₂	4.117,53	Ton CO ₂
						Produk yang dihasilkan	Soil	972.822	m ³
<i>Drilling & Blasting</i>	<i>Drilling Machine</i>	Bahan Baku	Batuan penutup	91.590.645	BCM	Emisi yang dihasilkan	SOx	1,69	Ton Sox
		Bahan Bakar	Solar	375.602	L		NOx	25,64	Ton NOx
		Bahan Kimia	Detonator	95.274	Kg		CO ₂	1.001,96	Ton CO ₂
			Boster 400 gr	12.713	Kg	Produk yang dihasilkan	Batuan Penutup	81.332.492,76	BCM
			Emulsion	2.652.489	Kg				
			AN	3.981.424	Kg				
			Leadline 762	117.450	meter				
<i>Material Removal</i>	<i>Excavator dan Hauler</i>	Bahan Baku	Batuan Penutup	91.590.645	BCM	Emisi yang dihasilkan	SOx	172,98	Ton Sox
		Bahan Bakar	Solar	38.539.302	L		NOx	2.630,48	Ton NOx
							CO ₂	102.807,44	Ton CO ₂
						Produk yang dihasilkan	Batuan Penutup	91.590.645	m ³
PROSES INTI									
<i>Coal Getting</i>	<i>Excavator / Backhoe</i>	Bahan Baku	Coal	3.687.228	Ton	Emisi yang dihasilkan	SOx	2,92	Ton Sox
		Bahan Bakar	Solar	650.488	L		NOx	44,40	Ton NOx
							CO ₂	1.735,24	Ton CO ₂
						Produk yang dihasilkan	Coal	3.687.228	Ton
<i>Coal Hauling</i>	<i>Dozer</i>	Bahan Baku	Coal	3.687.228	Ton	Emisi yang dihasilkan	SOx	6,89	Ton Sox
		Bahan Bakar	Solar	1.534.629	L		NOx	104,75	Ton NOx
							CO ₂	4.093,78	Ton CO ₂
							Coal	3.687.228	Ton

Unit Proses	Nama Alat	Jenis	Input	Jumlah	Satuan	Jenis	Output	Jumlah	Satuan
Coal Crushing	Dump Truck, Coal Crusher, Dozer, Exavator, Metal Catcher, Metal Detector, Crane Truck, Conveyor Belt, Loading Truck	Bahan Baku	Coal	3.687.228	Ton	Emisi yang dihasilkan	SOx	17,8	Ton Sox
		Bahan Bakar	Solar	3.966.685,718	L		NOx	270,74	Ton NOx
							CO ₂	10.581,53	Ton CO ₂
						Produk yang dihasilkan	Coal	3.687.228	Ton
Coal Conveying to Stockpile	Genset Crusher	Bahan Baku	Coal	3.687.228	Ton	Emisi yang dihasilkan	NOx	1.511,41	Ton NOx
			Oli	9,3671	Ton		CO ₂	1.045,05	Ton CO ₂
			Aki	0,2099	Ton	Produk yang dihasilkan	Coal	3.687.228	Ton
		Filter	0,2225	Ton	Limbah B3		Oli Bekas	9,3205	Ton
		Hose	0,0712	Ton			Sludge	0,29333	Ton
		Majun	13,6067	Ton		Air Terkontaminasi	5,33333	Ton	
		Bahan Bakar	Solar	1.923.082		L	Accu Bekas	0,20988	Ton
			Biodiesel	240.385		L	Filter Terkontaminasi	0,22245	Ton
		Penggunaan air	Air Bersih	80.884		m ³	Hose Terkontaminasi	0,07119	Ton
						Majun Terkontaminasi	13,6067	Ton	
						Material Terkontaminasi	1,15	Ton	
						Grease Bekas	0,03404	Ton	
						Limbah Cair	Air Limbah	80.884	m ³

Tabel 2 Inventori Daur Hidup Utilitas Proses Produksi Batubara PT Berau Coal Site Samarata

Unit Proses	Jenis	Input	Jumlah	Satuan	Jenis	Output	Jumlah	Satuan	
Reklamasi	Bahan Baku	Tanah	403,77	Ha	Emisi yang dihasilkan	SOx	0,1257	Ton Sox	
		Bibit	70.381	Unit		NOx	1,9111	Ton NOx	
		Kompos	140,76	Ton		CO ₂	74,6928	Ton CO ₂	
	Bahan Bakar	Solar	28.000	L	Produk yang dihasilkan	Tanaman	70.381	Unit	
					Limbah Padat	Plastik	1,41	Ton	
WWTP	Bahan Bakar	Solar	57.200	L	Emisi yang dihasilkan	SOx	0,2567	Ton Sox	
		Bahan Kimia	Kapur	197.005		Kg	NOx	3,9042	Ton NOx
			Tawas	72.425		Kg	CO ₂	152,587	Ton CO ₂
					Limbah Cair	Air Buangan	972.822	m ³	
						TSS	241.117	mg	
						Fe	268	mg	
						Mn	12.056	mg	
				Limbah Padat	Kemasan Bekas Kapur	0,39	Ton		
					Kemasan Bekas	0,14	Ton		

Unit Proses	Jenis	Input	Jumlah	Satuan	Jenis	Output	Jumlah	Satuan
Utility Mining	Bahan Bakar	Solar	9.289.140	L	Emisi yang dihasilkan	Tawas		
	Penggunaan Air	Air Bersih	2.731,68	m ³		SOx	41,6941	Ton Sox
						NOx	634,0262	Ton NOx
Workshop	Bahan Baku	Oli Pelumas	896,52	Ton	Limbah B3	Oli Pelumas Bekas	789	Ton
		Accu	8,78	Ton		Accu Bekas	8,78	Ton
		Filter	97,72	Ton		Filter Terkontami nasi	97,72	Ton
		Hose	17,4	Ton		Hose Terkontami nasi	17,4	Ton
		Majun	18,56	Ton		Majun Terkontami nasi	18,56	Ton
		Material	48,59	Ton		Material Terkontami nasi	48,59	Ton
		Grease	5,32	Ton		Grease Bekas	5,32	Ton

3.3. Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Setelah melakukan inventarisasi data input dan output pada proses hulu dan inti produksi batubara, selanjutnya adalah melakukan analisis potensi dampak lingkungan dari setiap proses tersebut. Tahap ini disebut dengan *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*. Metode terpilih yang digunakan dalam menganalisis dampak lingkungan yaitu menggunakan metode *CML-IA Baseline*. Pada tahap *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)* ini bertujuan untuk melakukan penilaian terhadap kategori dampak yang sudah ditentukan dalam tujuan dan lingkup kajian yaitu potensi pemanasan global, potensi penipisan ozon, potensi hujan asam dan potensi eutrofikasi. Tahap ini juga memberikan informasi tambahan sebagai pendukung dalam menilai sistem produk hasil *Life Cycle Inventory (LCI)* sehingga dapat lebih memahami arti penting terhadap lingkungan (Annisa *et al*, 2021). Berikut merupakan penilaian dampak daur hidup PT. Berau Coal – Site Samarata (SMO).

a. Potensi Pemanasan Global

Potensi pemanasan global berasal dari aktivitas manusia yang menghasilkan emisi ke atmosfer sehingga terjadi perubahan iklim akibat terdapat peningkatan suhu pada bumi (Curran, 2012). Perhitungan dampak potensi pemanasan global dilakukan menggunakan rumus yang telah dijelaskan dalam metode penelitian. Berikut merupakan contoh perhitungan nilai karakterisasi/nilai dampak dari input solar pada unit proses *land clearing*.

Diketahui

Nilai Unit Fungsi Solar Unit *Land Clearing*
= 0,052 kg/ton

Nilai Faktor Karakterisasi Solar (*CML-IA Baseline*)
= $4,79 \times 10^{-1}$

Ditanya

Nilai Indikator Dampak = ?

Perhitungan

Nilai Indikator Dampak

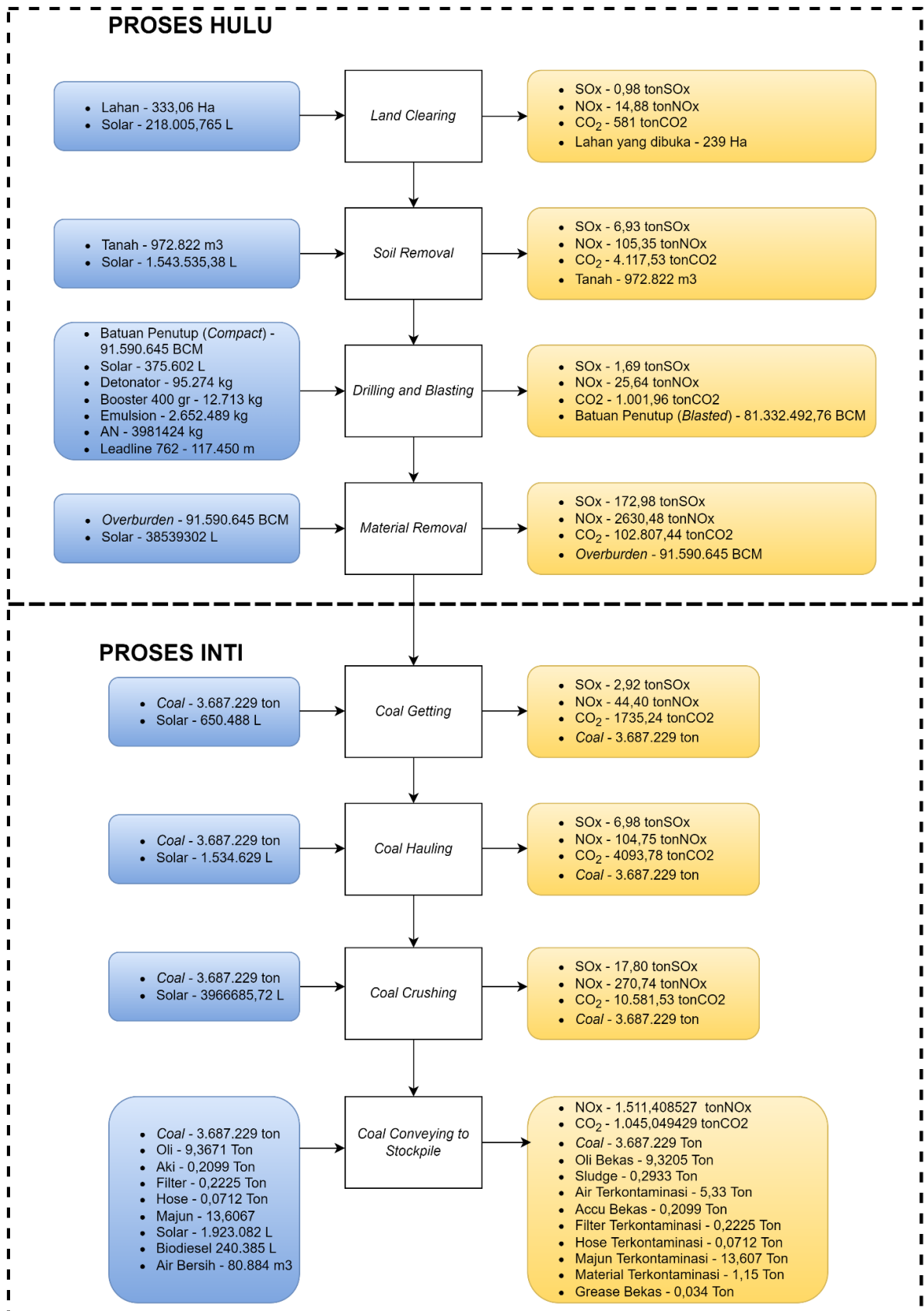
= Data Inventori (per unit fungsi) x Faktor Karakterisasi

Nilai Indikator Dampak Input Solar

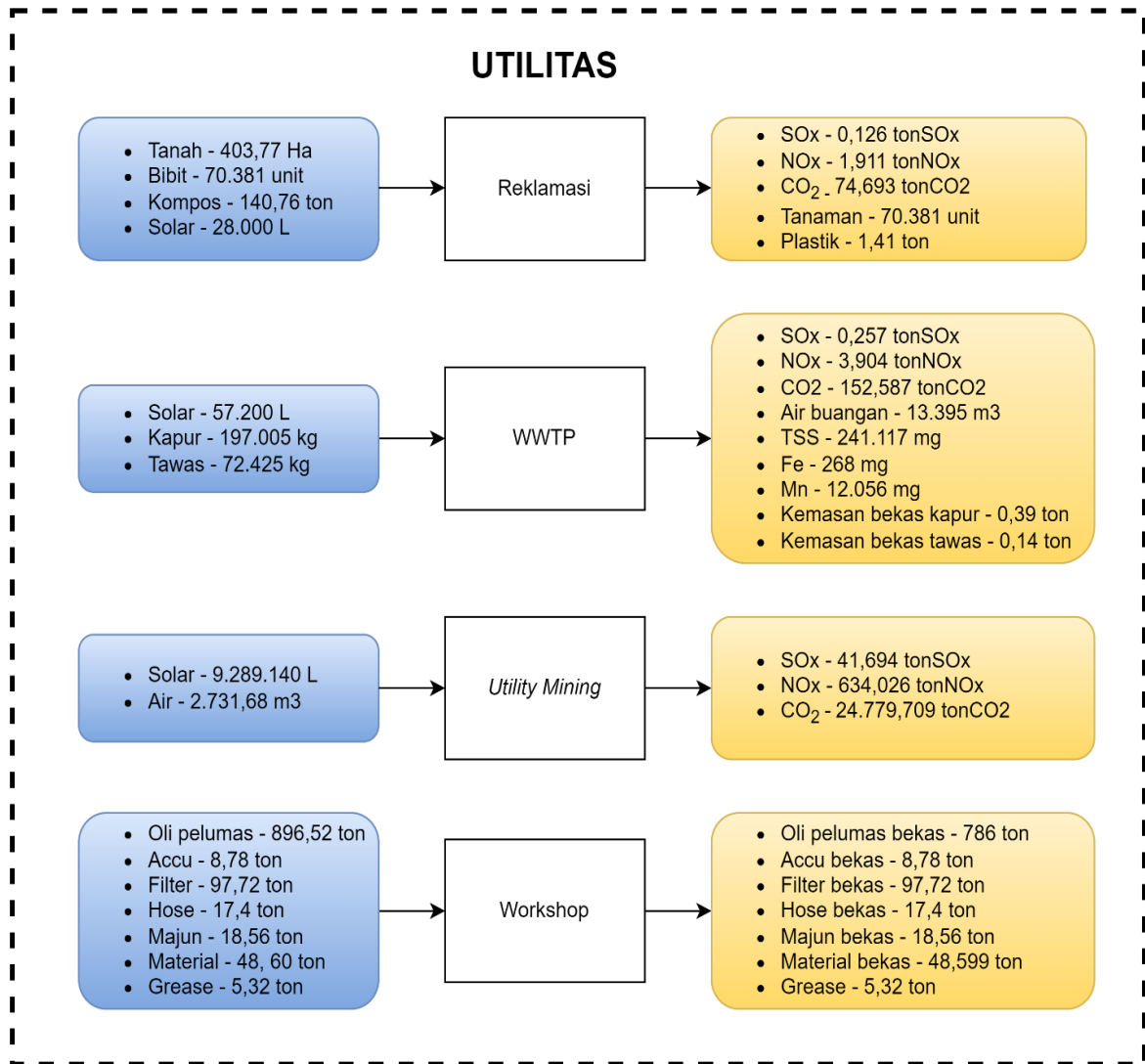
= $0,052 \text{ Kg/Ton} \times 4,79 \times 10^{-1}$

= $2,49 \times 10^{-2} \text{ Kg CO}_2\text{eq/Ton}$

Pada potensi pemanasan global di proses produksi, untuk menghasilkan batubara sejumlah 3.687.229 ton dihasilkan nilai indikator dampak sebesar 48,8 kgCO₂eq/ton batubara dari proses *land clearing* hingga proses *coal conveying to stockpile*. Sementara pada utilitas, dihasilkan nilai indikator dampak sebesar 1,10 kgCO₂eq/ton batubara yang meliputi kegiatan reklamasi, WWTP, *utility mining* dan *workshop*. Hasil perhitungan dampak masing-masing proses dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.



Gambar 1 Diagram Alir Proses Produksi Batubara PT Berau Coal – Site Samarata (SMO)



Gambar 2 Diagram Alir Utilitas Proses Produksi Batubara PT Berau Coal – Site Samarata (SMO)

b. Potensi Penipisan Ozon

Potensi penipisan ozon stratosfer atau biasa disebut SODP (*Stratospheric Ozone Depletion Potential*) merupakan penipisan lapisan ozon yang terjadi di stratosfer yang disebabkan oleh gas pencemar CFC (Chlorofluorocarbon) dan HC (Halocarbon), gas penmar ini biasa ditemukan pada refrigerator maupun alat pendingin udara (Curran, 2012). Perhitungan dampak potensi penipisan ozon dilakukan menggunakan rumus yang telah dijelaskan dalam metode penelitian. Berikut merupakan contoh perhitungan nilai karakterisasi/nilai dampak dari input solar pada unit proses *land clearing*.

Diketahui

Nilai Unit Fungsi Solar Unit *Land Clearing*
 = 0,052 kg/ton
 Nilai Faktor Karakterisasi Solar (CML-IA *Baseline*)
 = $6,45 \times 10^{-7}$

Ditanya

Nilai Indikator Dampak = ?

Perhitungan

Nilai Indikator Dampak
 = Data Inventori (per unit fungsi) x Faktor Karakterisasi
 Nilai Indikator Dampak Input Solar
 = $0,052 \text{ Kg/Ton} \times 6,45 \times 10^{-7}$
 = $3,36 \times 10^{-8} \text{ Kg CFC-11/Ton}$

Pada potensi penipisan ozon di proses produksi, untuk menghasilkan batubara sejumlah 3.687.229 ton dihasilkan nilai indikator dampak sebesar $9,12 \times 10^{-6} \text{ kgCFC-11/ton}$ batubara dari proses *land clearing* hingga proses *coal conveying to stockpile*. Pada utilitas, dihasilkan nilai indikator dampak sebesar $1,44 \times 10^{-6} \text{ kgCFC-11/ton}$ batubara yang meliputi kegiatan reklamasi, WWTP, *utility mining* dan *workshop*. Hasil perhitungan dampak masing-masing proses dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

c. Potensi Hujan Asam

Hujan asam dapat dipahami sebagai berbagai jenis hujan yang memiliki pH di bawah 5,6. Hujan asam dapat terjadi karena belerang (sulfur) yang ada dalam bahan bakar fosil dan nitrogen dimana memiliki sifat pengotor bereaksi dengan oksigen membentuk belerang dioksida dan nitrogen oksida di udara (Nasihah, 2018). Perhitungan dampak potensi hujan asam dilakukan menggunakan rumus yang telah dijelaskan dalam metode penelitian. Berikut merupakan contoh perhitungan nilai karakterisasi/nilai dampak dari input solar pada unit proses *land clearing*.

Diketahui

Nilai Unit Fungsi Solar Unit *Land Clearing*

= 0,052 kg/ton

Nilai Faktor Karakterisasi Solar (CML-IA *Baseline*)

= $5,15 \times 10^{-3}$

Ditanya

Nilai Indikator Dampak = ?

Perhitungan

diklasifikasikan menjadi oligotrofik, mesotrofik dan eutrofik (Soeprbowati, 2012). Potensi eutrofikasi disebabkan oleh adanya penyuburan akibat kelebihan nutrisi pada tanaman di perairan yang dapat meningkatkan pertumbuhan vegetasi air. Peningkatan tersebut menyebabkan gangguan terhadap keseimbangan organisme maupun kualitas air (Istvanovics, 2010). Perhitungan dampak potensi eutrofikasi dilakukan menggunakan rumus yang telah dijelaskan dalam metode penelitian. Berikut merupakan contoh perhitungan nilai karakterisasi/nilai dampak dari input solar pada unit proses *land clearing*.

Diketahui

Nilai Unit Fungsi Solar Unit *Land Clearing*

= 0,052 kg/ton

Nilai Faktor Karakterisasi Solar (CML-IA *Baseline*)

= $6,35 \times 10^{-4}$

Nilai Indikator Dampak

= Data Inventori (per unit fungsi) x Faktor Karakterisasi

Nilai Indikator Dampak Input Solar

= $0,052 \text{ Kg/Ton} \times 5,15 \times 10^{-3}$

= $2,68 \times 10^{-4} \text{ Kg CFC-11/Ton}$

Pada potensi hujan asam di proses produksi, untuk menghasilkan batubara sejumlah 3.687.229 ton dihasilkan nilai indikator dampak sebesar $2,47 \times 10^{-1} \text{ kg SO}_2\text{eq/ton}$ batubara dari proses *land clearing* hingga proses *coal conveying to stockpile*. Sementara pada utilitas, dihasilkan nilai indikator dampak sebesar $1,17 \times 10^{-2} \text{ kg SO}_2\text{eq/ton}$ batubara yang meliputi kegiatan reklamasi, WWTP, *utility mining* dan *workshop*. Hasil perhitungan dampak masing-masing proses dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8.

d. Potensi Eutrofikasi

Eutrofikasi merupakan pengayaan air dengan nutrisi, terutama nitrogen dan fosfor, yang dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman air menjadi tidak terkendali. Berdasarkan kandungan unsur haranya, maka air dapat

Ditanya

Nilai Indikator Dampak = ?

Perhitungan

Nilai Indikator Dampak

= Data Inventori (per unit fungsi) x Faktor Karakterisasi

Nilai Indikator Dampak Input Solar

= $0,052 \text{ Kg/Ton} \times 6,35 \times 10^{-4}$

= $3,30 \times 10^{-5} \text{ Kg PO}_4\text{eq/Ton}$

Pada potensi eutrofikasi di proses produksi, untuk menghasilkan batubara sejumlah 3.687.229 ton dihasilkan nilai indikator dampak sebesar $3,75 \times 10^{-1} \text{ kgPO}_4\text{eq/ton}$ batubara dari proses *land clearing* hingga proses *coal conveying to stockpile*. Sementara pada utilitas, dihasilkan nilai indikator dampak sebesar $1,51 \times 10^{-3} \text{ kgPO}_4\text{eq/ton}$ batubara yang meliputi kegiatan reklamasi, WWTP, *utility mining* dan *workshop*. Hasil perhitungan dampak masing-masing proses dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 3 Potensi Pemanasan Global Proses Produksi

Proses	Nilai Dampak	Satuan
<i>Land Clearing</i>	$1,65 \times 10^{-1}$	kgCO ₂ eq/ton batubara
<i>Soil Removal</i>	$1,18 \times 10^0$	
<i>Drilling & Blasting</i>	$2,84 \times 10^{-1}$	
<i>Material Removal</i>	$2,91 \times 10^1$	
<i>Coal Getting</i>	$6,08 \times 10^{-1}$	
<i>Coal Hauling</i>	$1,28 \times 10^0$	
<i>Coal Crushing</i>	$3,11 \times 10^0$	
<i>Coal Conveying to Stockpile</i>	$1,31 \times 10^1$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$4,88 \times 10^1$	

Tabel 4 Potensi Pemanasan Global Utilitas

Proses	Nilai Dampak	Satuan
Reklamasi	$3,22 \times 10^{-3}$	kgCO ₂ eq/ton batubara
WWTP	$2,47 \times 10^2$	
<i>Utility Mining</i>	$1,07 \times 10^{-0}$	
<i>Workshop</i>	$6,61 \times 10^4$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$1,10 \times 10^0$	

Tabel 5 Potensi Penapisan Ozon Proses Produksi

Proses	Nilai Dampak	Satuan
<i>Land Clearing</i>	$3,74 \times 10^{-8}$	kgCFC-11eq/ton batubara
<i>Soil Removal</i>	$2,67 \times 10^{-7}$	
<i>Drilling & Blasting</i>	$6,44 \times 10^{-8}$	
<i>Material Removal</i>	$6,60 \times 10^{-6}$	
<i>Coal Getting</i>	$1,11 \times 10^{-7}$	
<i>Coal Hauling</i>	$2,63 \times 10^{-7}$	
<i>Coal Crushing</i>	$6,80 \times 10^{-7}$	
<i>Coal Conveying to Stockpile</i>	$1,10 \times 10^{-6}$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$9,12 \times 10^6$	

Tabel 6 Potensi Penipisan Ozon Utilitas

Proses	Nilai Dampak	Satuan
Reklamasi	$4,31 \times 10^{-9}$	kgCFC-11eq/ton batubara
WWTP	$9,85 \times 10^{-9}$	
<i>Utility Mining</i>	$1,43 \times 10^{-6}$	
<i>Workshop</i>	$2,80 \times 10^{-12}$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$1,44 \times 10^{-6}$	

Tabel 7 Potensi Hujan Asam Proses Produksi

Proses	Nilai Dampak	Satuan
<i>Land Clearing</i>	$6,74 \times 10^{-4}$	kgSO ₂ eq/ton batubara
<i>Soil Removal</i>	$4,83 \times 10^{-3}$	
<i>Drilling & Blasting</i>	$1,16 \times 10^{-3}$	
<i>Material Removal</i>	$1,19 \times 10^{-1}$	
<i>Coal Getting</i>	$2,41 \times 10^{-3}$	
<i>Coal Hauling</i>	$5,15 \times 10^{-3}$	
<i>Coal Crushing</i>	$1,27 \times 10^{-2}$	
<i>Coal Conveying to Stockpile</i>	$1,01 \times 10^{-1}$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$2,47 \times 10^{-1}$	

Tabel 8 Potensi Hujan Asam Utilitas

Proses	Nilai Dampak	Satuan
Reklamasi	$2,45 \times 10^{-5}$	kgSO ₂ eq/ton batubara
WWTP	$2,46 \times 10^{-4}$	
<i>Utility Mining</i>	$1,14 \times 10^{-2}$	
<i>Workshop</i>	$4,47 \times 10^{-7}$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$1,17 \times 10^{-2}$	

Tabel 9 Potensi Eutrofikasi Proses Produksi

Proses	Nilai Dampak	Satuan
<i>Land Clearing</i>	$1,91 \times 10^{-4}$	kgPO ₄ eq/ton batubara
<i>Soil Removal</i>	$1,37 \times 10^{-3}$	
<i>Drilling & Blasting</i>	$3,29 \times 10^{-4}$	
<i>Material Removal</i>	$3,37 \times 10^{-2}$	
<i>Coal Getting</i>	$3,69 \times 10^{-2}$	
<i>Coal Hauling</i>	$1,37 \times 10^{-3}$	
<i>Coal Crushing</i>	$3,49 \times 10^{-3}$	
<i>Coal Conveying to Stockpile</i>	$2,98 \times 10^{-1}$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$3,75 \times 10^{-1}$	

Tabel 10 Potensi Eutrofikasi Utilitas

Proses	Nilai Dampak	Satuan
Reklamasi	$4,27 \times 10^{-6}$	kgPO ₄ eq/ton batubara
WWTP	$9,53 \times 10^{-5}$	
<i>Utility Mining</i>	$1,41 \times 10^{-3}$	
<i>Workshop</i>	$8,52 \times 10^{-7}$	
TOTAL INDIKATOR DAMPAK	$1,51 \times 10^{-3}$	

3.4. Interpretasi

Interpretasi merupakan tahapan akhir dalam melakukan kajian dampak lingkungan dengan menggunakan metode *Life Cycle Assesment (LCA)*. Tahap ini akan memberikan rekomendasi yang dapat dilakukan dalam rencana perbaikan jangka panjang PT Berau Coal – Site Samarata (SMO) berdasarkan hasil analisis pada *Life Cycle Impact Assesment (LCIA)*.

Berdasarkan potensi dampak yang telah disajikan, diketahui bahwa pada setiap proses produksi yang dimulai dari *land clearing* hingga *coal conveying to stockpile* serta utilitas menghasilkan dampak potensi pemanasan global, potensi penipisan ozon, potensi hujan asam dan potensi eutrofikasi. Proses *material removal* memberikan dampak tertinggi pada setiap kategori dampak, yaitu sebesar $2,91 \times 10^{-1}$ kgCO₂eq/ton batubara untuk potensi pemanasan global, $6,60 \times 10^{-6}$ kgCFC-11eq/ton batubara untuk potensi penipisan ozon, $1,19 \times 10^{-1}$ kgSO₂eq/ton batubara untuk potensi hujan asam serta $3,37 \times 10^{-2}$ kgPO₄eq/ton batubara untuk potensi eutrofikasi. Tingginya dampak yang dihasilkan pada

proses *material removal* disebabkan oleh adanya penggunaan bahan bakar solar sebesar 38.539.302 L dengan menghasilkan emisi CO₂ sebesar 102.807,44 tonCO₂eq. Sementara pada proses *land clearing* memberikan dampak terendah pada setiap kategori dampak, yaitu sebesar $1,65 \times 10^{-1}$ kgCO₂eq/ton batubara untuk potensi pemanasan global, $3,74 \times 10^{-8}$ kgCFC-11eq/ton batubara untuk potensi penipisan ozon, $6,74 \times 10^{-4}$ kgSO₂eq/ton batubara untuk potensi hujan asam serta $1,91 \times 10^{-4}$ kgPO₄eq/ton batubara untuk potensi eutrofikasi.

Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa yang menjadi isu penting terdapat pada proses *material removal* akibat adanya penggunaan bahan bakar solar sebesar 38.539.302 Liter. Dengan demikian terdapat beberapa rekomendasi berupa program penurunan emisi CO₂ yang dapat dilakukan oleh PT Berau Coal – Site Samarata (SMO) untuk mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi dimulai dari *land clearing* hingga *coal crushing* yaitu sebagai berikut:

- a. Program pengurangan jarak radius perpindahan alat ditambang saat blasting dari yang sebelumnya 300 meter menjadi 200 meter. Program ini merupakan salah satu rekomendasi yang dapat diterapkan oleh PT Berau Coal – Site Samarata (SMO) dalam mengurangi pemakaian bahan bakar dan juga untuk menekan emisi CO₂.
- b. Program *Maintenance Turbocharger Genset* CPP Samarata BC-GE-P-01. Program ini dapat dijalankan untuk memperlancar buangan udara panas yang berdampak pada pengurangan energi yang digunakan dalam proses operasionalnya.
- c. Program penggantian penggunaan Bahan Bakar Biosolar B20 menjadi B30, dimana sebelumnya PT Berau Coal sudah menerapkan penggunaan bahan bakar Biosolar B20. Apabila melakukan penggantian bahan bakar menjadi Biosolar B30 tentunya dapat meminimasi beban emisi yang dihasilkan sekaligus pengurangan penggunaan bahan bakar.
- d. Program *Mining Eye (Supervisory Automation Implementation)*

4. Kesimpulan

Dampak Lingkungan yang dikaji dan menjadi tujuan dalam penelitian ini yaitu melakukan kajian dampak lingkungan yang meliputi potensi pemanasan global, potensi penipisan ozon, potensi hujan asam dan potensi eutrofikasi dengan ruang lingkup kajian adalah *cradle to gate*. Ruang lingkup kajian tersebut meliputi proses produksi dan utilitas yang ada di PT Berau Coal – Site Samarata (SMO) yaitu *land clearing, top soil removal, drilling and blasting, material removal, coal getting, coal hauling, coal crushing* dan *coal conveying to stockpile* serta untuk utilitas meliputi kegiatan reklamasi, WWTP, *utility mining* dan *workshop*. Proses *material removal* memberikan kontribusi dampak paling tinggi dengan menghasilkan potensi pemanasan global sebesar $2,91 \times 10^{-1}$ kgCO₂eq/ton batubara, potensi penipisan ozon sebesar $6,60 \times 10^{-6}$ kgCFC-11eq/ton batubara, potensi hujan asam sebesar $1,19 \times 10^{-1}$ kg SO₂eq/ton batubara dan potensi eutrofikasi sebesar $3,37 \times 10^{-2}$ PO₄eq/ton batubara. Potensi dampak lingkungan yang dihasilkan pada proses *material removal* disebabkan oleh penggunaan bahan bakar solar sebesar 38.539.302 L dengan emisi CO₂ yang dihasilkan sebesar 102.807,44 tonCO₂eq.

DAFTAR PUSTAKA

Auwah-Offei, K., & Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(1), 82-89.
<https://doi.org/10.1007/s11367-010-0246-6>

Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI ISO 14040:2016 – Manajemen Lingkungan – Penilaian Daur Hidup (ISO 14040:2006, IDT)*.

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI ISO 14040:2017 – Manajemen Lingkungan – Penilaian Daur Hidup = Persyaratan dan Panduan (ISO 14044:2006, IDT)*.

Curran, M. A. (Ed.). (2012). *Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products*. John Wiley & Sons.

GaBi Education. (2009). Handbook for Life Cycle Assessment (LCA), Using the GaBi Education Software Package. http://www.gabi-software.com/fileadmin/gabi/tutorials/tutorial1/GaBi_Education_Handbook.pdf

Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2018). Introduction to LCA with SimaPro, 2016.

International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044 – Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*. Geneva.

Istvánovics, V. (2010). Eutrophication of lakes and reservoirs. *Lake Ecosystem Ecology; Elsevier: San Diego, CA, USA*, 47-55.

Khairona, M. A. (2019). *ANALISIS GATE-TO-GATE PRODUK BATIK CAP MENGGUNAKAN METODE LIFE CYCLE ASSESMENT* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).
<https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/20338>

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2017). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.73/MENLHK/SETJEN/Kum.1/12/2017 tentang Pedoman Penyelenggaraan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 1 Tahun 2021 Tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Luthfia, A., Abfertiawan, M. S., Nuraprianisandi, S., Pranoto, K., Samban, P. R., & Elistyandari, A. (2021). Penggunaan Life Cycle Assessment dalam Penilaian Resiko Dampak Lingkungan dan Pemilihan Alternatif Teknologi di Pertambangan Batubara Indonesia. *Prosiding SATU BUMI*, 2(1).
<http://www.jurnal.upnyk.ac.id/index.php/satubumi/article/view/4455/3263>

Nasihah, M. (2018). Efek Hujan Asam terhadap Pertumbuhan Tanaman. *Jurnal EnviScience (Environment Science)*, 1(1).
<https://doi.org/10.30736/1ije.v1iss1.53>

Nurunnisa, S. (2020). Kajian dampak lingkungan sistem pengelolaan sampah di kawasan wisata Pantai Pariaman menggunakan metode life cycle assessment. *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri*, 1(2).
<https://doi.org/10.23960/jtvi.v1i2.21>

Putri, H. P. (2017). *Life cycle assessment (lca) emisi pada proses produksi bahan bakar minyak (bbm) jenis bensin dengan pendekatan metode analytical hierarchy process (ahp)* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya).
<https://repository.its.ac.id/id/eprint/43311>

Soeprbowati, T. R. (2012). Mitigasi danau eutrofik: studi kasus Danau Rawapening. In *Prosiding Seminar Nasional Limnologi IV* (pp. 36-48).
<https://mbio.fsm.undip.ac.id/v1/wp-content/uploads/2015/05/Prosiding-Seminar-Nasional-Limnologi-VI-2012.pdf>