

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) PRODUK SEMEN PORTLAND KOMPOSIT (STUDI KASUS: PT X)

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PORTLAND CEMENT COMPOSITE (CASE STUDY: PT X)

^{1*}Della Devia , ² Puji Lestari, dan ³Emenda Sembiring

^{1,2,3} Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jl Ganesha 10 Bandung 40132

¹delladevia@students.itb.ac.id, ²pujilest@indo.net.id, ³emendasembiring@ftsl.itb.ac.id

Abstrak: Industri semen dihadapkan pada tantangan dalam mengurangi konsumsi sumber daya alam dan energi, untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. PT X adalah salah satu industri semen di Indonesia yang memiliki produk semen portland komposit yang dianggap lebih ramah lingkungan karena memiliki kandungan klinker yang lebih sedikit dibandingkan dengan semen portland biasa. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi tahapan daur hidup produk yang menghasilkan dampak yang signifikan dan menentukan skenario alternatif perbaikan yang dapat menimbulkan potensi dampak paling minimum pada daur hidup produk semen portland komposit. Metode yang dipakai adalah Life Cycle Assessment (LCA) yang terdiri dari (1) Penentuan tujuan dan lingkup, (2) Analisis inventori, (3) Penilaian dampak dan (4) Interpretasi hasil. Lingkup kajian LCA yang akan dilakukan bersifat “*cradle-to-gate*” meliputi tahapan proses ekstraksi bahan baku, proses produksi hingga distribusi semen portland komposit. Potensi dampak lingkungan dari semen portland komposit menggunakan metode ReCiPe 2016 adalah pemanasan global (GWP) sebesar 768,43 kgCO₂eq, asidifikasi (AP) sebesar 0,75 kg SO₂eq, pembentukan partikulat (PMFP) sebesar 0,26 kgPM_{2,5}eq, pembentukan ozon fotokimia (POFP) sebesar 2,31 kgNO_xeq dan toksisitas pada manusia penyebab kanker sebesar 5,11E-03 kg 1,4DCBeq. Potensi dampak terbesar adalah GWP yang memiliki nilai normalisasi terbesar diantara potensi dampak lain, yaitu 1,51E-11 secara total. Kontribusi dampak terbesar ada pada tahapan proses produksi sebesar 88,84% yang disebabkan karena emisi CO₂ sebesar 98,63%. Skenario yang direkomendasikan untuk mereduksi potensi dampak GWP adalah teknologi penangkapan karbon yang dapat mereduksi dampak sebesar 57%.

Kata kunci: semen portland komposit, *life cycle assessment*, LCA, *cradle-to-gate*

Abstract : *Cement industry facing the challenge in reducing resource material consumption and energy through sustainable development. PT X is one of the cement industry in Indonesia which produced portland composite cement which is considered more environmentally friendly because it contains less clinker than ordinary portland cement. Purpose of this study is to identify the product life cycle stages that have a significant impact and define alternative improvement scenarios which have the least potential impact on the life cycle of portland composite cement. The method used is Life Cycle Assessment (LCA) which consists of (1) goal and scope definition, (2) inventory analysis, (3) impact assessment, and (4) interpretation. Scope of LCA is cradle-to-gate from material extraction, production process and cement distribution. The potential impact from portland cement composite are global warming potential (GWP) about 768.43 kgCO₂eq, acidification potential (AP) about 0.75 kgSO₂eq, particulate matter formation potential (PMFP) about 0.26 kgPM_{2,5}eq, photochemical ozone formation potential (POFP) about 2.31 kg NO_xeq and human toxicity with cancer (HTPc) about 5.11E-03 kg 1.4DCBeq. The biggest potential impact is GWP which has the greatest normalization value among others, about 1.51E-11 in total. The largest contribution is in the production process stage about 88.84%, which caused by CO₂ emissions about 98.63%. The recommended scenario for reducing the potential impact of GWP is carbon capture technology with a reduction of 57%.*

Key words: *portland composite cement, life cycle assessment, LCA, cradle-to-gate*

PENDAHULUAN

Industri semen merupakan salah satu sektor industri penting bagi pembangunan di Indonesia dan dapat mendorong pertumbuhan ekonomi. Indonesia merupakan salah satu negara dengan konsumsi dan produsen semen terbesar di ASEAN. Menurut data Asosiasi Semen Indonesia (2017), konsumsi semen domestik di Indonesia pada tahun 2015 mencapai 61,99 juta ton. Diprediksikan bahwa konsumsi semen akan terus meningkat hingga mencapai 100 juta ton pada tahun 2026, berdasarkan pada tren konsumsi dan anggaran infrastruktur yang terus meningkat. Untuk mendukung hal tersebut, kapasitas produksi industri semen di Indonesia pada tahun 2017 telah mencapai angka 107,9 ton.

Selain peran pentingnya, industri semen adalah industri dengan konsumsi energi dan emisi yang tinggi (Lin, 2017). Produksi semen berkontribusi sekitar 4% terhadap emisi CO₂ global (JRC, 2016) dan 7% penggunaan bahan bakar industri (Worrell, dkk., 2000). Di Indonesia, industri semen menduduki peringkat pertama penghasil emisi gas rumah kaca di sektor industri, yaitu sebesar 55% pada tahun 2013 (KLH, 2015). Oleh karena itu, industri semen merupakan industri yang berperan penting terhadap emisi gas rumah kaca dan pengurangan emisi pada sektor ini akan berpengaruh cukup besar terhadap pengurangan emisi GRK secara keseluruhan (Boesch dan Hellweg, 2010). Selain gas rumah kaca, industri semen juga menghasilkan emisi lain seperti NO_x, SO₂, PM, CO, logam berat dan lain-lain (Kuenen dkk., 2016). Emisi ini juga memiliki potensi dampak terhadap pernapasan, asidifikasi, toksik terhadap manusia dan potensi dampak lainnya (Li, dkk., 2014).

Konsep pembangunan berkelanjutan sangat penting diimplementasikan pada industri semen. Produksi semen yang berkelanjutan, termasuk potensi perbaikan dalam efisiensi energi, reduksi polutan, pemakaian kembali panas yang terbuang serta penggunaan bahan baku dan bahan bakar alternatif, dapat dievaluasi dengan *Life Cycle Assessment* (LCA) (Cankaya dan Pekey, 2015). LCA adalah suatu alat pengambil keputusan untuk mengidentifikasi beban lingkungan dan mengevaluasi dampak lingkungan dari suatu produk, proses atau servis dalam siklus daur hidupnya (WBCSD, 2006) dan berperan penting dalam pembangunan berkelanjutan (Young, dkk., 2002).

Semen portland komposit atau biasa disebut dengan PCC (*portland composite cement*) merupakan jenis semen campuran (*blended cement*) yang paling banyak dikonsumsi di Indonesia (ASI, 2017) dan dianggap lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan semen portland biasa atau OPC (*ordinary portland composite*). PCC adalah salah satu jenis produk semen dengan kandungan klinker yang lebih sedikit (65-95%) dibandingkan dengan semen portland biasa (95%) (SNI 7064, 2104). Klinker adalah produk antara dalam pembuatan semen yang terbentuk dari pembakaran batu kapur dan tanah liat dengan temperatur yang sangat tinggi. Menurut Boesch dan Hellweg (2010), klinker merupakan penyebab utama dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh industri semen. Semen PCC juga menggunakan limbah sebagai salah satu campuran bahan bakunya, yaitu *granulated blast furnace slag* dan *fly ash*.

Sebagian besar studi LCA semen membahas produk semen portland biasa dan terbatas pada lingkup *cradle-to-gate* hingga proses produksi saja (Chen dkk., 2010; García-Gusano dkk., 2014; Li dkk., 2015). Stafford dkk. (2016) membahas mengenai transportasi bahan baku semen dan menyatakan bahwa transportasi merupakan potensi dampak terbesar pada produk semen Brazil. Hal ini dikarenakan sebagian besar transportasi di negara Brazil adalah menggunakan truk. Sama halnya dengan Indonesia, transportasi truk digunakan untuk pendistribusian sebagian besar produk semen. Oleh karena itu, perlu juga dilakukan evaluasi mengenai potensi dampak dari distribusi produk semen.

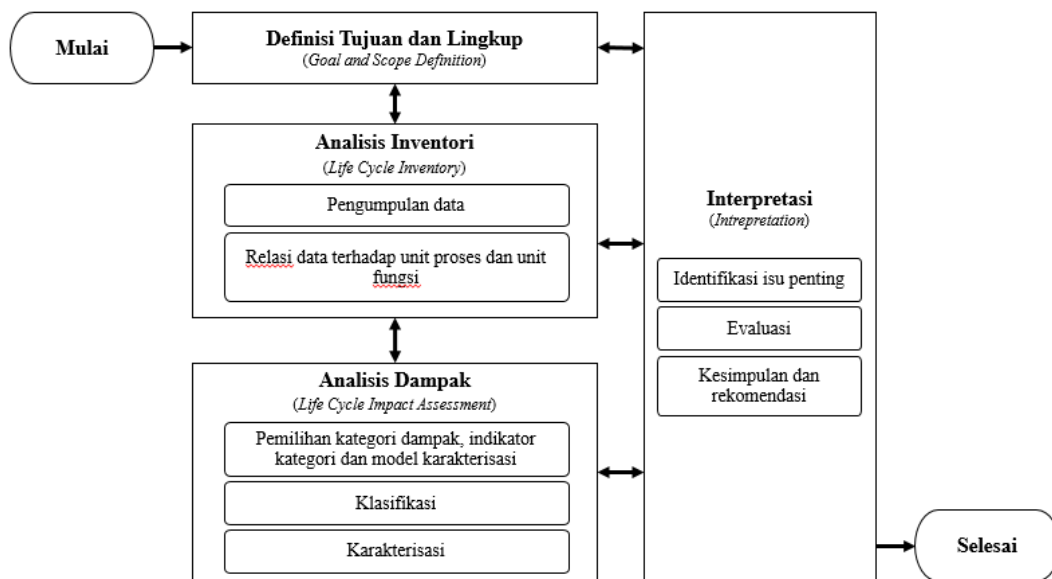
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi dampak dari semen portland komposit yang diproduksi oleh PT X, mulai dari tahapan ekstraksi, produksi dan distribusi, serta menentukan

rekomendasi perbaikan yang memiliki dampak paling minimum. LCA produk semen portland komposit ini juga dapat bermanfaat sebagai dasar pertimbangan pemilihan bahan baku untuk konstruksi

METODOLOGI

Penelitian dilakukan di salah satu kompleks pabrik yang berlokasi di Kabupaten Bogor, Jawa Barat, yang merupakan kompleks terbesar milik PT X. Di lokasi dengan luas sekitar 200 hektar, PT X mengoperasikan 10 pabrik dengan 5 diantaranya memproduksi semen portland komposit. Area penambangan batu kapur dan tanah liat berada tidak jauh dari area produksi. Area distribusi semen PT X mencakup pulau Jawa, Bali, Sumatera dan sebagian Kalimantan.

Metode penelitian terdiri dari 4 tahapan sesuai dengan ISO 14044 (2006), yang digambarkan pada **Gambar 1**.



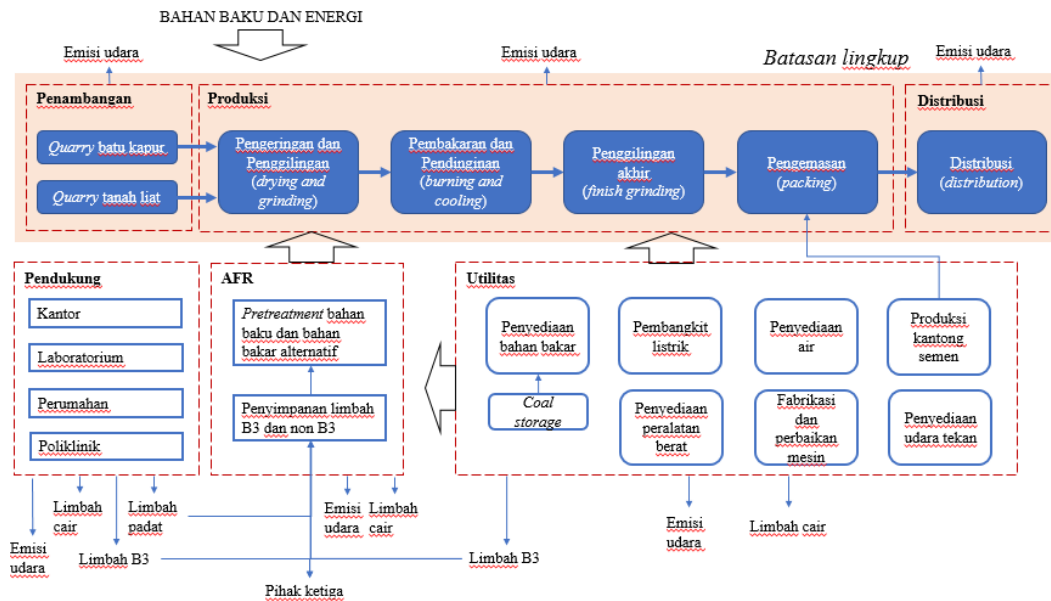
Gambar 1. Alur Penelitian

Penentuan tujuan dan lingkup

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi potensi dampak dari semen portland komposit yang diproduksi oleh PT X, mulai dari tahapan ekstraksi, produksi dan distribusi, serta menentukan rekomendasi perbaikan yang memiliki dampak paling minimum. Penelitian ini bersifat *cradle-to-gate* mulai dari proses ekstraksi bahan baku (*cradle*) hingga tahap distribusi ke gudang distributor (*gate*), yang ditunjukkan **Gambar 2**.

Kegiatan ekstraksi bahan baku tambahan, bahan bakar, bahan peledak dan pembangkitan energi listrik tidak termasuk dalam kajian ini. Dampak lingkungan yang diakibatkan oleh kegiatan penyimpanan (*storage*) dan pemeliharaan mesin dan peralatan tidak diperhitungkan. Karena PT X menggunakan metode *dry process* dalam proses produksinya, buangan yang diperhitungkan hanya emisi udara.

Functional unit yang dipakai adalah 1 ton semen portland komposit. Potensi dampak lingkungan yang diukur adalah *global warming potential* (GWP), *acidification potential* (AP), *particulate matter formation potential* (PMFP), *photochemical ozone formation potential* (POFP) dan *human toxicity with cancer* (HTPC).



Gambar 2. Lingkup Penelitian

Perhitungan beban emisi untuk listrik dan transportasi menggunakan pendekatan sebagai berikut:

- Faktor emisi listrik adalah sebesar 0,903 ton CO₂/MWh, yang merupakan faktor emisi GRK tahun 2015 untuk sistem interkoneksi Jawa, Madura dan Bali (www.djk.esdm.go.id).
- Estimasi beban emisi untuk transportasi truk, dilakukan berdasarkan pendekatan jarak tempuh kendaraan (VKT) dan faktor emisi gas buang, yang ditunjukkan dalam **Tabel 1**.
- Estimasi emisi CO₂ untuk transportasi kereta, menggunakan metode Tier 1 berdasarkan pada data aktivitas (konsumsi bahan bakar) dan faktor emisi. Data faktor emisi transportasi kereta ditunjukkan pada **Tabel 1**. Estimasi emisi ini belum memungkinkan untuk menggunakan metode Tier 2, karena belum adanya referensi faktor emisi kereta di Indonesia. Konsumsi bahan bakar kereta yang dipakai adalah 0,407 liter/km berdasarkan perhitungan dari PT X. Sedangkan untuk estimasi emisi SO₂, menggunakan asumsi kandungan maksimal sulfur dalam bahan bakar solar yang dikeluarkan oleh Pertamina, yaitu 2500 ppm.

Tabel 1. Faktor Emisi Kendaraan Distribusi

Emisi	Faktor emisi truk		Faktor emisi kereta	
	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
CO ₂	771,15 ^a	g/km	3140 ^c	kg/ton
CH ₄	0,0596 ^a	g/km	4,15 ^c	kg/TJ
CO	8,4 ^b	g/km	10,7 ^c	kg/ton
NO _x	17,7 ^b	g/km	52,4 ^c	kg/ton
PM	1,4 ^b	g/km	1,52 ^c	kg/ton
SO ₂	0,84 ^b	g/km	2500 ^d	mg/l
N ₂ O	3,9 ^e	kg/TJ	28,6 ^e	kg/TJ

^a Lestari, P. dan Adolf (2008)

^b Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 12 Tahun 2010

^c EMEP/EEA *emission inventory guidebook* Tier 1

^d Kandungan maksimal sulfur dalam bahan bakar solar yang dikeluarkan oleh Pertamina (satuan dalam ppm)

^e Faktor emisi default IPCC Tier 1

- d. Jarak yang dihitung antara pabrik dan distributor menggunakan transportasi darat untuk satu kali jarak tempuh dan muatan kendaraan diasumsikan 100% terisi penuh barang sejenis.

Analisis Inventori (*Life Cycle Inventory*)

Tahap kedua adalah analisis inventori. Data yang digunakan adalah data sekunder tahun 2015 yang bersumber dari PT X. Seluruh data masukan dan keluaran disesuaikan berdasarkan *functional unit* yang dipakai, yaitu ton semen portland komposit (semen PCC). Perhitungan analisis inventori diolah menggunakan software *Microsoft Excel*.

Penilaian Dampak (*Life Cycle Impact Assessment*)

Tahap ketiga adalah penilaian dampak (LCIA). LCIA dapat membantu menginterpretasikan studi LCA dengan cara menerjemahkan emisi dan sumber daya yang digunakan menjadi sejumlah angka skor dampak lingkungan. Angka ini yang disebut dengan faktor karakterisasi, yang mengindikasikan dampak lingkungan per unit dari sumber daya yang digunakan atau emisi yang dikeluarkan (Huijbregts, dkk., 2016). Menurut Menoufi (2011), terdapat dua metode pendekatan untuk melakukan penilaian dampak, yaitu orientasi pada masalah (*problem-oriented*) atau *midpoint* dan orientasi pada kerusakan (*damage-oriented*) atau *endpoint*.

LCIA dilakukan dengan cara mengklasifikasikan hasil analisis inventori terhadap kategori dampak yang akan diukur, dan dikonversi menggunakan faktor karakterisasi yang didapat dari model karakterisasi. Kemudian dilakukan normalisasi untuk menentukan potensi dampak yang terbesar. **Gambar 3** menunjukkan klasifikasi hasil analisis inventori terhadap kategori dampak berdasarkan metode karakterisasi ILCD 2011.

Penelitian ini akan membandingkan antara dua metode karakterisasi pada tingkat *midpoint* yaitu ILCD 2011 dan ReCiPe 2016. Metode ILCD 2011 berisi tentang model dan faktor karakterisasi yang direkomendasikan oleh *The Joint Research Center* (JRC). Sebagian besar model dapat berlaku secara global, kecuali untuk asidifikasi dan pembentukan ozon fotokimia yang hanya valid digunakan untuk wilayah Eropa. Sedangkan ReCiPe 2016 menyediakan nilai faktor karakterisasi dengan skala global dan dapat digunakan di Indonesia.

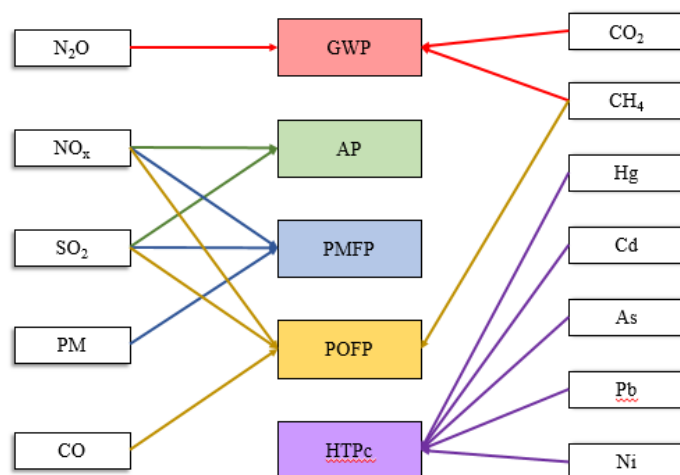
Perhitungan dampak menggunakan Persamaan (1) (Curran, 2012).

$$I = \sum CF_{c,s} \times m_s \quad (1)$$

dimana: I adalah hasil indikator untuk kategori dampak c , $CF_{c,s}$ adalah faktor karakterisasi dari senyawa s terhadap kategori dampak c , dan m_s adalah jumlah massa senyawa s yang diemisikan.

Interpretasi hasil

Tahap terakhir adalah interpretasi hasil analisa LCI dan LCIA yang disesuaikan dengan tujuan dan lingkup kajian yang mencakup: (1) identifikasi isu penting, (2) rekomendasi, (3) kesimpulan.



Gambar 3. Klasifikasi hasil analisis inventori terhadap kategori dampak berdasarkan metode karakterisasi ILCD 2011

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Inventori

Tabel 2 menunjukkan hasil analisis inventori dari daur hidup *cradle-to-gate* produk semen portland komposit.

Tabel 2. Hasil analisis inventori *cradle-to-gate* produk semen portland komposit

Masukan	Satuan	Total	Keluaran	Satuan	Total
Bahan baku utama			Emisi		
Batu kapur	ton	1,048	CO ₂		
Tanah liat berpasir	ton	0,132	proses	kg	594,008 ^a + 74,438 ^b
Pasir silika	ton	0,004			
Pasir besi	ton	0,014	listrik	kg	89.328
Kaolin	ton	0,003	CH ₄	kg	0,007 ^a + 0,006 ^b
Copper Slag	ton	0,005			
Laterite	ton	0,004	CO	kg	1,214 ^a + 0,807 ^b
Material alternatif	ton	0,003			
Bahan baku tambahan			NO _x	kg	0,672 ^a + 1,705 ^b
Gypsum	ton	0,025			
Batu kapur	ton	0,177	PM	kg	0,151 ^a + 0,134 ^b
Trass	ton	0,038			
GBFS	ton	0,074	SO ₂	kg	0,837 ^a + 0,081 ^b
Bahan bakar fosil			N ₂ O	kg	0,034 ^b
Batu bara	ton	0,629	Hg	kg	6,16E-02
IDO	liter	0,006	Cd	kg	2.13E-07
Solar	liter	0,562 ^a + 0,204 ^b			
ANFO	kg	0,173	As	kg	2.00E-07
Bahan bakar alternatif			Pb	kg	1.42E-05
<i>Biomass</i>			Ni	kg	3.74E-06
Sekam padi	GCal	0,001	Produk Antara		

Masukan	Satuan	Total	Keluaran	Satuan	Total
Serbuk gergaji	GCal	0,011	Klinker	ton	0,700
Biomass lain	GCal	4,75E-04	Produk		
<i>Non biomass</i>			Semen portland komposit	ton	1,000
Ban bekas	GCal	0,003			
<i>Sludge Oil</i>	GCal	0,004			
Bahan bakar bekas	GCal	2,97E-04			
Plastik	GCal	0,002			
Cat	GCal	7,28E-05			
Tekstil	GCal	6,58E-05			
<i>High carbon</i>	GCal	1,93E-06			
Non biomas lain	GCal	8,73E-04			
<i>Sampah RT</i>	GCal	1,61E-04			
Listrik	kWh	98,923			
Air	m ³	0,164			

Keterangan:

^a Nilai inventori proses ekstraksi-produksi

^b Nilai inventori proses distribusi

Pemakaian dan Transportasi Bahan Baku

Bahan baku utama yang dipakai untuk memproduksi 1 ton semen portland komposit adalah batu kapur (*limestone*) sebesar 1,048 ton dan tanah liat berpasir (*sandyclay*) sebesar 0,132 ton. Bahan baku ini diambil dari hasil penambangan sendiri dengan menggunakan bahan peledak jenis *Ammonium Nitrate Fuel Oil* (ANFO) sebesar 0,173 kg/ton semen PCC. Bahan baku yang telah dihancurkan diangkut ke area pabrik dengan menggunakan *belt conveyor* sepanjang 5 km.

Batu kapur dan tanah liat berpasir dicampurkan dengan bahan baku korektif agar komposisi oksidanya memenuhi persyaratan kualitas dan kuantitas. Bahan baku korektif ini adalah pasir silika, pasir besi, *kaolin*, *copper slag*, *laterite* dan material alternatif lainnya dengan komposisi berturut-turut sebesar 0,004 ton, 0,014 ton, 0,003 ton, 0,005 ton, 0,004 ton dan 0,003 ton.

Konsumsi Energi

Bahan bakar alternatif hanya digunakan pada tahapan proses produksi, sedangkan pada tahap ekstraksi dan distribusi menggunakan bahan bakar diesel. Untuk proses pembakaran awal pada unit kiln, digunakan *Industrial Diesel Oil* (IDO) dengan panas sebesar 0,006 GCal/ton semen PCC dan batu bara pada keadaan *steady state* sebesar 0,629 GCal/ton semen PCC. Bahan bakar alternatif yang digunakan berasal dari biomass, yaitu sekam padi dan serbuk gergaji, dan non biomass diantaranya ban bekas, *sludge oil*, bahan bakar bekas, plastik, cat, tekstil dan lain-lain. Total energi panas dari bahan bakar alternatif yang dipakai hanya sebesar 3%. Kecilnya proporsi energi bahan bakar alternatif dikarenakan minimnya ketersediaan bahan bakar alternatif yang memenuhi syarat. Total bahan bakar biomass yang dipakai baru mencapai 2,92 kg/ton semen PCC, sangat jauh dengan industri semen Jepang yang mengkonsumsi sebesar 13,58 kg/ton semen portland (Chen, 2015).

Total energi listrik yang digunakan adalah sebesar 98,923 kwh/ton semen PCC. Dengan penggunaan terbesar pada unit finish mill sebesar 41,2%, diikuti dengan unit *raw mill* sebesar 30,1% dan kiln sebesar 25,7%.

Emisi

Emisi terbesar yang dikeluarkan adalah emisi CO₂ yang mencapai 757,774 kg/ton semen PCC dengan proporsi terbesar berasal dari tahapan proses produksi karena adanya kalsinasi dan pembakaran bahan bakar. Emisi dari pemakaian listrik menyumbang sebesar 11,8%. PT X

menggunakan sarana transportasi truk dan kereta api untuk mendistribusikan produknya. Namun proporsi penggunaan kereta api masih sangat kecil, yaitu sekitar 12%. Sekitar 90% lebih, beban emisi dari tahapan proses distribusi berasal dari emisi truk.

Tabel 3. Nilai potensi dampak menggunakan metode ILCD 2011 dan ReCiPe 2016

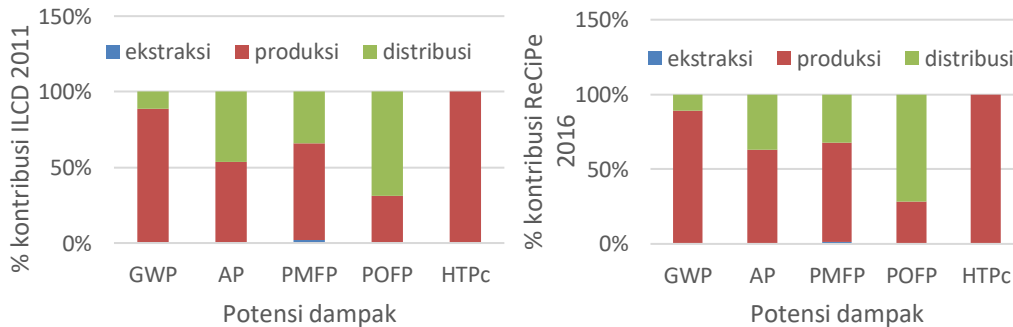
Potensi dampak	ILCD 2011		ReCiPe 2016	
	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
GWP	768,32	kg CO ₂ eq	768,43	kg CO ₂ eq
AP	2,96	mol H ⁺ eq	0,75	kg SO ₂ eq
PMFP	0,14	kg PM _{2,5} eq	0,26	kg PM _{2,5} eq
POFP	2,54	kg NMVOCeq	2,31	kg NO _x eq
HTPc	3,82E-07	CTUh	5,11E-03	kg 1,4DCBeq

Penilaian Dampak

Potensi dampak dari produk semen portland komposit PT X menggunakan metode ILCD 2011 dan ReCiPe 2016 ditunjukkan dalam **Tabel 3**. Terdapat adanya perbedaan model pendekatan dari kedua metode, kecuali untuk perhitungan GWP, model yang dipakai sama yaitu IPCC.

Interpretasi Hasil

Gambar 4 menunjukkan kontribusi dampak potensial untuk setiap tahapan proses. Kedua metode memperlihatkan kecenderungan yang sama. Proses produksi merupakan tahapan proses yang memiliki potensi dampak paling besar diantara tahapan proses yang lain, dengan proporsi untuk setiap potensi dampak lebih dari 50%, kecuali untuk potensi dampak POFP, yang merupakan kontribusi terbesar dari tahapan proses distribusi. Sedangkan untuk tahapan proses ekstraksi, potensi dampak yang ditimbulkan sangat kecil, atau kurang dari 2%.



Gambar 4. Kontribusi dampak potensial untuk setiap tahapan proses

Untuk mengetahui potensi dampak yang paling signifikan, harus dilakukan normalisasi. Metode normalisasi yang digunakan adalah EC-JRC 2010 yang sesuai (*compliant*) dengan metode ILCD 2011. Metode ini memiliki inventori data yang lebih lengkap dan substansi yang lebih banyak dibandingkan dengan metode yang lain (Sala, dkk., 2016). Sementara metode ReCiPe 2016 belum menyediakan faktor normalisasi yang sesuai. Dari hasil normalisasi, didapat bahwa potensi dampak yang terbesar adalah GWP dengan nilai normalisasi sebesar 1,51E-11, yang dihasilkan dari tahapan proses produksi. Diikuti dengan potensi dampak POFP yang dihasilkan dari tahapan proses distribusi.

Rekomendasi

Ditetapkan beberapa alternatif skenario perbaikan untuk mengurangi dampak potensial GWP yang berasal dari tahapan proses produksi. Alternatif skenario yang direkomendasikan untuk mengurangi emisi CO₂, yang merupakan kontribusi terbesar penyebab dampak GWP, yaitu (1) Substitusi bahan bakar dengan *Refuse Derived Fuel* (RDF), (2) Penggunaan kembali sisa panas dengan *waste heat recovery* dan (3) Teknologi penangkapan karbon (*Carbon Capture*). Selain itu, ditetapkan pula alternatif skenario perbaikan untuk mengurangi dampak potensial POFP, yaitu (1) Peralihan moda transportasi dari truk ke kereta sebesar 10% dan (2) Menetapkan standar emisi truk menjadi EURO 4.

Dari **Tabel 4**, dapat dilihat bahwa skenario 3-CO₂ memberikan nilai potensi dampak GWP yang terkecil. Sementara skenario 2-NO_x, memberikan nilai potensi dampak POFP yang terkecil.

Tabel 4. Perbandingan alternatif skenario

Potensi dampak	Skenario					
	Dasar	1-CO ₂	2-CO ₂	3-CO ₂	1-NO _x	2-NO _x
GWP	768.43	740.06	747.21	329.00	759,10	758,30
AP	0.75	0.75	0.75	0.29	0,72	0,51
PMFP	0.26	0.26	0.26	0.10	0,25	0,18
POFP	2.31	2.31	2.31	1.71	2,12	0,67
HTPc	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007

KESIMPULAN

Dampak potensial yang signifikan dari *cradle-to-gate* semen portland komposit adalah pemanasan global sekitar 768,43 kg CO₂eq yang disebabkan dari proses produksi. Dampak ini dapat diminimalisir dengan cara mengurangi emisi CO₂ menggunakan teknologi penangkapan karbon (*carbon capture*) yang dapat mereduksi potensi dampak GWP sebesar 57%. Sedangkan untuk menurunkan potensi dampak POFP yang disebabkan dari proses distribusi adalah dengan mengganti standar emisi bahan bakar menjadi EURO 4.

DAFTAR PUSTAKA

- Asosiasi Semen Indonesia. (2017): *Cement Industry in Indonesia*. Jakarta.
- Boesch, M.E. dan Hellweg, S. (2010): Identifying Improvement Potentials in Cement Production with Life Cycle Assessment. *Environ. Sci. Technol.* 2010, **44**, 9143-9149
- BSN. (2014): *SNI 7064:2014 – Semen Portland Komposit*. Badan Standardisasi Nasional. ICS 91.100.10
- Cankaya, S. dan Pekey, B. (2015): Identifying Environmental Impacts of Cement Production With Life Cycle Assessment: Literature Review. *Journal of International Scientific Publications - Ecology & Safety* ISSN 1314-7234, Volume **9**, 2015
- Chen Li, Suping Cui, Zuoren Nie, Xianzheng Gong, Zhihong Wang & Norihiro Itsubo. (2015): The LCA of portland cement production in China. *Int J Life Cycle Assess*, **20**, **117–127**
- Curran, M. A. (2012): *Life Cycle Assessment Handbook*. Scrivener Publishing LLC
- European Commission - Joint Research Centre (2010): *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for LCIA Models and Indicators*. EUR 24586 EN. Luxembourg. *Publications Office of the European Union*
- EEA. (2016): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016: Technical guidance to prepare national emission inventories. *European Environment Agency Report*. ISSN 1977-8449

- García-Gusano, D., Herrera, I., Garraín, D., Lechón, Y., Cabal, H. (2014): LCA of the Spanish cement industry: implementation of environmental-friendly solutions. *Clean Techn Environ Policy*
- ISO. (2006): ISO 14044:2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirement and Guidelines. *International Standard Organization*
- JRC. (2016): Trends in Global CO₂ Emissions - 2016 Report. *PBL Netherlands Env. Assm. Agency*
- KLH. (2010): Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara di Daerah
- Kuenen J., Berdowski J., Van der Most P., Boer R.W., Rentz O., Oertel D., Pacyna J.M., Pierce M., Trozzi C., Pulles T., dan Appelman W. (2016): *Cement production. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016: NFR 2.A.1*. European Environment Agency.
- Lestari, Puji dan Adolf S. (2008): Emission Inventory of GHGs of CO₂ and CH₄ From Transportation Sector Using Vehicles Kilometer Travelled (VKT) and Fuel Consumption Approaches in Bandung City. *Journal of Better Air Quality*, **159**(2008)